

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

José Henrique de Freitas Gomes

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA SOLDAGEM DE
REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇO ABNT
1020 COM UTILIZAÇÃO DE ARAME TUBULAR
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

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.
Co-orientador: Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

**Itajubá
2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

José Henrique de Freitas Gomes

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA SOLDAGEM DE
REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇO ABNT
1020 COM UTILIZAÇÃO DE ARAME TUBULAR
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 08 de Abril de 2010, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira (CEFET – MG)

Prof. Dr. João Roberto Ferreira (UNIFEI)

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (Co-orientador)

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (Orientador)

Itajubá

2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por fazer parte da minha vida, me abençoando com a força, a sabedoria e a persistência necessárias para o alcance dos meus objetivos.

À minha família, pela educação e pelo exemplo de vida e de seres humanos.

Aos professores e amigos Sebastião Carlos da Costa e Anderson Paulo de Paiva, pela orientação, pela paciência e pelas importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

À minha namorada Bruna Leão, pelo apoio, carinho, tolerância e compreensão.

Aos funcionários da oficina mecânica da UNIFEI, em especial Luiz Fernando Rodrigues Alves e Antonio Benedito da Silva, pela ajuda e dicas nas atividades de laboratório.

Ao professor Carlos Eduardo Sanches da Silva e ao colega de Mestrado Fernando Ferraz Amaral, pela ajuda em momentos importantes do trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, em especial Danielle Fernandes Campos, Rafael Florêncio da Silva Costa, Antônio Duarte Figueira e Eduardo Miguel da Silva, pela convivência, amizade e apoio.

A todos os professores do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

À FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

A todos os meus amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis tem ganhado destaque no meio industrial nos últimos anos por permitir que superfícies com propriedades anti-corrosivas sejam obtidas a partir de materiais de baixo custo, como os aços carbono ou aços de baixa liga. No entanto, visando garantir a qualidade final dos revestimentos, é importante que o procedimento de soldagem empregado seja bem ajustado, para que os cordões sejam depositados com a geometria desejada, apresentando ao mesmo tempo bons índices de produtividade e ocorrência nula de defeitos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo a otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arames tubulares de aço inoxidável ABNT 316L. Buscou-se identificar a combinação ótima dos parâmetros que oferecessem os melhores resultados quanto à geometria do cordão de revestimento e à produtividade do processo, garantindo ao mesmo tempo níveis mínimos de qualidade superficial. As respostas analisadas incluíram a largura do cordão, penetração, reforço e diluição, que representam as características geométricas do cordão. A produtividade foi otimizada através da taxa de deposição e do rendimento do processo. Como respostas de qualidade, foram consideradas a formação de escória e o aspecto superficial. Os parâmetros do processo analisados foram velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça. Para a obtenção dos resultados ótimos, utilizou-se um método experimental dividido em duas fases. Inicialmente, empregou-se a Metodologia de Superfície de Resposta para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados e análise dos efeitos dos parâmetros. A otimização do processo foi realizada através do Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM). Apesar de o EQMM ser uma ferramenta indicada para o tratamento de múltiplas respostas correlacionadas, verificou-se que o mesmo ainda não contemplava a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com níveis de importância diferentes. Assim, foi desenvolvida neste trabalho uma estratégia de ponderação das respostas para este método. Os resultados mostram que todos os parâmetros analisados foram significativos, sendo que o grau de importância entre eles varia de acordo com as respostas de interesse. A estratégia de ponderação proposta para o EQMM foi utilizada com sucesso, o que permitiu alcançar os resultados ótimos.

Palavras-chave: Soldagem de revestimento, Revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis, Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfície de Resposta, Erro Quadrático Médio Multivariado

ABSTRACT

The stainless steel cladding applications have gained throughout the industry in recent years for allowing anti-corrosive surfaces are made from low cost materials, such as carbon steel or low alloy steels. However, in order to ensure the claddings final quality, it is important to adjust the welding procedure used, so that the process allows depositing weld beads with the desired geometry, while providing good levels of productivity and occurrence of zero defects. In this context, this study aimed to optimize the cladding process of ABNT 1020 carbon steel using ABNT 316L flux cored stainless steel wire. We tried to identify the parameters optimal combination that offer the best results on the weld bead geometry and process productivity, while ensuring minimum quality standards. The responses analyzed included the bead width, penetration, reinforcement and dilution, which represent the weld bead geometry. Productivity has been optimized through the deposition rate and process yield. The quality responses considered were the slag formation and surface appearance. The process parameters examined were the wire feed rate, arc voltage, welding speed and contact tip to workpiece distance. To obtain the optimal results, the experimental method was divided into two phases. Initially, it was used the Response Surface Methodology for the experiments planning, data collection and parameters effects analysis. The optimization process was performed using the Multivariate Mean Square Error (MMSE). Although MMSE be a suitable tool for the multiple correlated responses optimization, it was found that it still didn't include the multiple responses correlated optimization with different levels of importance. Thus, a strategy for weighting responses was developed in this study for optimization by this method. The results show that all parameters were considered significant, and the degree of importance among them varies according to the responses. The weighting responses strategy proposed for the MMSE was successfully used, which allowed the optimum results were achieved.

Keywords: Welding, Stainless steel cladding, Design of Experiments, Response Surface Methodology, Multivariate Mean Square Error.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Princípio de operação da soldagem de revestimento.....	9
Figura 2.2 – Exemplos de camadas de revestimento depositadas a partir de processos de soldagem.....	9
Figura 2.3 – Perfil geométrico desejado do cordão de solda.....	10
Figura 2.4 – Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40% (Adaptado de KANNAN e MURUGAN, 2006a).....	11
Figura 2.5 – Aumento da difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função do aumento do nível de diluição.....	13
Figura 2.6 – Formato dos arames tubulares.....	15
Figura 2.7 – Soldagem com arame tubular autoprottegido (FORTES, 2004).....	16
Figura 2.8 – Soldagem com arame tubular com gás de proteção (FORTES, 2004).....	16
Figura 2.9 – Instalação para a soldagem automática MIG/MAG ou com arame tubular (FORTES, 2005).....	18
Figura 2.10 - Quantidade de publicações a cada três anos relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	20
Figura 2.11 – Influência da corrente, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre a geometria do revestimento (Adaptado de PALANI e MURUGAN, 2006a).....	25
Figura 2.12 – Efeito da interação entre corrente e velocidade de soldagem sobre a geometria do revestimento (Adaptado de PALANI e MURUGAN, 2007).....	26
Figura 2.13 – Arranjo composto central para três fatores.....	37
Figura 2.14 – Procedimentos para obtenção do EQMM (Adaptado de PAIVA, 2008).....	40
Figura 2.15 – Estratégia de ponderação das respostas proposta para o EQMM.....	43
Figura 2.16 – Decodificação do cromossomo em variáveis de controle (Adaptado de BUSACCA <i>et al.</i> , 2001).....	45
Figura 2.17 – Exemplo de crossover (Adaptado de BUSACCA <i>et al.</i> , 2001).....	46
Figura 2.18 – Exemplo de mutação.....	46
Figura 2.19 – Procedimento de otimização utilizado pelo Algoritmo Genético (Adaptado de CORREIA <i>et al.</i> , 2005).....	47
Figura 3.1 – Esquematização do objeto de estudo.....	51

Figura 3.2 – Método experimental – Fase 1: Metodologia de Superfície de Resposta.....	52
Figura 3.3 – Método experimental – Fase 2: Otimização EQMM.....	53
Figura 4.1 – Equipamentos utilizados.....	56
Figura 4.2 – Avaliação da formação de escória.....	58
Figura 4.3 – Avaliação do aspecto superficial.....	58
Figura 4.4 – Procedimento para medição da geometria do cordão.....	60
Figura 4.5 – Geometrias dos cordões após a preparação dos corpos de prova.....	60
Figura 4.6 – Efeitos principais sobre a largura do cordão.....	67
Figura 4.7 – Efeitos principais sobre a penetração.....	68
Figura 4.8 – Efeitos principais sobre o reforço.....	69
Figura 4.9 – Efeitos principais sobre a diluição.....	69
Figura 4.10 – Efeitos principais sobre a taxa de deposição.....	70
Figura 4.11 – Efeitos principais sobre o rendimento do processo.....	71
Figura 4.12 – Efeitos principais sobre a formação de escória.....	72
Figura 4.13 – Efeitos principais sobre o aspecto superficial.....	72
Figura 4.14 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e tensão sobre a largura do cordão.....	73
Figura 4.15 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem sobre a largura do cordão.....	74
Figura 4.16 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem sobre a penetração.....	74
Figura 4.17 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e distância bico de contato peça a penetração.....	75
Figura 4.18 - Efeito da interação entre tensão e velocidade de alimentação sobre o reforço..._	75
Figura 4.19 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e tensão sobre a diluição..._	75
Figura 4.20 – Efeito da interação entre tensão e distância bico de contato peça sobre a taxa de deposição.....	76
Figura 4.21 – Efeito da interação entre velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre a taxa de deposição.....	76

Figura 4.22 – Efeito da interação entre velocidade de alimentação e tensão sobre o rendimento	77
Figura 4.23 – Efeito da interação entre velocidade de alimentação e distância bico de contato peça sobre o rendimento	77
Figura 4.24 – Efeito da interação entre velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre a formação de escória	78
Figura 4.25 – Efeito da interação entre tensão e distância bico de contato peça sobre o aspecto superficial	78
Figura 4.26 – Estrutura de correlação entre as respostas	79
Figura 4.27 – Análise de Componentes Principais	80
Figura 4.28 – Planilha desenvolvida para a otimização da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L	82
Figura 4.29 – Geometria otimizada para o cordão de revestimento	83
Figura 4.30 – Análise de Componentes Principais para as respostas ponderadas	87
Figura 4.31 – Planilha desenvolvida para a otimização ponderada da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L	89
Figura 4.32 – Nova geometria otimizada	90
Figura 4.33 – Formação de escória ótima	92
Figura 4.34 – Aspecto superficial ótimo	92
Figura 4.35 – Geometria ótima	92
Figura 4.36 – Comparação entre a geometria ótima teórica e a geometria ótima real obtida para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Processos de soldagem empregados nas pesquisas anteriores relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	22
Tabela 2.2 – Parâmetros estudados nas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	24
Tabela 2.3 – Faixas de corrente (A) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	27
Tabela 2.4 – Faixas de velocidade de alimentação do arame (m/min) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	28
Tabela 2.5 – Faixas de tensão (V) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	28
Tabela 2.6 – Faixas de velocidade de soldagem (cm/min) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	29
Tabela 2.7 – Faixas de distância bico de contato peça (mm) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	30
Tabela 2.8 – Faixas de ângulo da tocha (°) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	30
Tabela 2.9 – Tipos de gases de proteção utilizados pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	31
Tabela 2.10 – Respostas analisadas nas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	32

Tabela 2.11 – Características fundamentais das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (Adaptado de NILO JÚNIOR, 2003).....	35
Tabela 4.1 – Parâmetros variáveis e níveis de trabalho.....	55
Tabela 4.2 – Parâmetros fixos.....	55
Tabela 4.3 - Composição química do metal base e metal de adição.....	55
Tabela 4.4 – Matriz experimental.....	61
Tabela 4.5 – Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos.....	63
Tabela 4.6 – Análise de Variância.....	64
Tabela 4.7 - Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos finais.....	65
Tabela 4.8 – Análise dos resíduos.....	66
Tabela 4.9 – Dados utilizados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais.....	81
Tabela 4.10 – Parâmetros ótimos da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L.....	83
Tabela 4.11 – Respostas Padronizadas.....	85
Tabela 4.12 – Ponderação das respostas.....	86
Tabela 4.13 – Dados utilizados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais para as respostas ponderadas.....	88
Tabela 4.14 – Parâmetros ótimos da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L considerando pesos diferentes entre as respostas.....	90
Tabela 4.15 – Resultados dos experimentos de confirmação.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP	Análise de Componentes Principais
AG	Algoritmo Genético
ANOVA	Análise de Variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central ou <i>Central Composite Design</i>
CCF	Arranjo Composto de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
DOE	<i>Design of Experiments</i> ou Projeto e Análise de Experimentos
EQMM	Erro Quadrático Médio Multivariado
EQMM _p	Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> ou Mínimos Quadrados Ordinários
PC	<i>Principal Component</i> ou Componente Principal

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Porcentagem de explicação do componente principal
Π	Produtório
η	Rendimento do processo
η_s	Rendimento do processo padronizado
Σ	Somatório
λ_{PC}	Autovalor do componente principal
λ^*_{PC}	Autovalor do componente principal das respostas ponderadas
ζ_y	Alvo definido para a resposta
σ_y	Desvio-padrão experimental da resposta
μ_y	Média experimental da resposta
A	Área de penetração
AD	Coefficiente de Anderson-Darling
B	Área de reforço
c	Coefficiente do autovetor do componente principal
C	Resistência à corrosão
CA	Corrente alternada
D	Diluição
D_s	Diluição padronizada
d_a	Densidade linear do arame
E	Formação de escória
e	Peso atribuído para a resposta
H	Dureza
I	Corrente de soldagem
l_a	Comprimento do arame consumido
M	Microestrutura
m_i	Massa da chapa antes da soldagem
m_f	Massa da chapa depois da soldagem
N	Distância bico de contato peça

P	Penetração
P_s	Penetração padronizada
PC	Modelo de superfície de resposta desenvolvido para os escores do componente principal
PC^*	Modelo de superfície de resposta desenvolvido para os escores do componente principal das respostas ponderadas
Q	Composição química
R	Reforço
R_s	Reforço padronizado
R^2	Coefficiente de determinação
S	Aspecto superficial
T	Tensão
T_{PC}	Alvo em termo do componente principal
T^*_{PC}	Alvo em termos do componente principal das respostas ponderadas
Ta	Ângulo da tocha
TD	Taxa de deposição
TD_s	Taxa de deposição padronizada
TF	Taxa de fusão
t_s	Tempo de soldagem
Va	Velocidade de alimentação do arame
V_s	Velocidade de soldagem
W	Largura do cordão
W_s	Largura do cordão padronizada
x	Variáveis independentes
y	Resposta de interesse
$Z(y \zeta_y)$	Valor padronizado da resposta em relação ao alvo
$Z(y)$	Valor padronizado da resposta
α	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
β	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
ε	Erro experimental

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Importância do tema	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Limitações.....	4
1.4. Estrutura do trabalho.....	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Considerações iniciais	7
2.2. Soldagem de revestimento	7
2.2.1. Conceitos e definições.....	7
2.2.2. Princípios de operação	8
2.2.3. Características do processo	10
2.3. Soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	11
2.3.1. Conceitos e definições.....	11
2.3.2. Controle da diluição	12
2.4. Soldagem com arame tubular	14
2.4.1. Fundamentos do processo	14
2.4.2. Equipamentos e aplicações industriais.....	17
2.4.3. Vantagens e limitações.....	19
2.5. Pesquisas anteriores relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	19
2.5.1. Objetivos e critérios de busca.....	19
2.5.2. Classificação dos trabalhos quanto à data de publicação.....	20
2.5.3. Classificação dos trabalhos quanto aos processos de soldagem empregados	21
2.5.4. Classificação dos trabalhos quanto aos parâmetros do processo de soldagem	24
2.5.5. Classificação dos trabalhos quanto às respostas analisadas.....	31
2.6. Projeto e Análise de Experimentos.....	33
2.7. Metodologia de Superfície de Resposta	36
2.8. Erro Quadrático Médio Multivariado	38
2.9. Proposta de ponderação das respostas para o Erro Quadrático Médio Multivariado	41
2.10. Algoritmo Genético.....	44
2.11. Considerações finais.....	47

3. MÉTODO EXPERIMENTAL.....	50
3.1. Considerações iniciais	50
3.2. Problema de pesquisa	50
3.3. Método experimental	51
3.4. Considerações finais	53
4. APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL	54
4.1. Considerações iniciais	54
4.2. Metodologia de Superfície de Resposta	54
4.2.1. Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho	54
4.2.2. Escolha das respostas de interesse	55
4.2.3. Definição da matriz experimental	56
4.2.4. Execução dos experimentos e registro das respostas	56
4.2.5. Modelagem matemática das respostas	62
4.2.6. Adequação e ajuste dos modelos.....	63
4.2.7. Análise dos resíduos.....	65
4.2.8. Obtenção das superfícies de resposta.....	66
4.2.9. Análise dos efeitos principais dos parâmetros	66
4.2.10. Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros.....	73
4.3. Otimização EQMM	78
4.3.1. Análise da correlação entre as respostas	79
4.3.2. Análise de Componentes Principais.....	80
4.3.3. Modelos matemáticos para os componentes principais	80
4.3.4. Alvos em termos dos componentes principais	81
4.3.5. Formulação EQMM	81
4.4. EQMM Ponderado.....	84
4.4.1. Padronização das respostas	84
4.4.2. Ponderação das respostas	84
4.4.3. Análise de Componentes Principais.....	87
4.4.4. Modelos matemáticos para os componentes principais	87
4.4.5. Alvos em termos dos componentes principais	88
4.4.6. Formulação EQMM Ponderado	88
4.5. Validação dos resultados	91
4.6. Considerações finais	93

5. CONCLUSÕES.....	94
5.1. Conclusões gerais	94
5.2. Contribuições do trabalho.....	96
5.3. Sugestões para estudos futuros	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS	102
ANEXO A – Formações de escória observadas nos experimentos	102
ANEXO B – Aspectos superficiais observados nos experimentos.....	106
ANEXO C – Geometrias dos cordões observadas nos experimentos (Medição 2).....	110
ANEXO D – Dados coletados durante a realização dos experimentos	112
ANEXO E – Avaliação da qualidade superficial.....	113
ANEXO F – Cálculo das respostas de produtividade.....	114
ANEXO G – Medição da largura do cordão.....	115
ANEXO H – Medição da penetração	116
ANEXO I – Medição do reforço.....	117
ANEXO J – Medição da área de penetração	118
ANEXO K – Medição da área total	119
ANEXO L – Cálculo da diluição	120

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância do tema

Os processos de fabricação sempre se caracterizaram como elementos importantes dentro de um sistema produtivo, sendo responsáveis por boa parte das operações de transformação e agregação de valor dos bens produzidos. Alguns exemplos incluem a usinagem, soldagem, forjamento, fundição, laminação, trefilação e extrusão, além de vários outros. Entre os exemplos anteriores, a soldagem aparece como um dos processos de fabricação mais empregados pelos diversos ambientes industriais e sua importância está associada ao fato de permitir a união dos materiais para a fabricação desde estruturas simples, como grades e portões, até a produção de componentes necessários para aplicações com alto grau de responsabilidade.

Sendo assim, a *American Welding Society* (AWS) define a soldagem como o processo de junção que produz a coalescência dos materiais pelo seu aquecimento a elevados níveis de temperatura, com ou sem a aplicação de pressão e com ou sem o uso de metal de adição (PHILLIPS, 1965a). Uma definição apresentada por Marques *et al.* (2005) coloca a soldagem como o processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas.

A soldagem é o principal processo usado para a união permanente de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Entretanto, apesar de ser considerada classicamente como um processo de união, verifica-se que nos últimos anos vários processos de soldagem vêm sendo utilizados para a deposição de material sobre uma determinada superfície com a finalidade de recuperar peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Tal aplicação caracteriza o que chamamos de soldagem de revestimento.

A possibilidade de deposição de material para a criação de superfícies com características especiais tem feito da soldagem de revestimento uma aplicação crescente em vários tipos de indústrias. Este interesse é justificado pelo fato de que revestimentos com propriedades e dimensões desejadas podem ser produzidos de forma rápida e econômica, através de um procedimento de soldagem.

Considerando os vários tipos de materiais para revestimentos, os aços inoxidáveis se mostram como uma das aplicações mais frequentes. Para estes casos, aços inoxidáveis são

geralmente depositados sobre superfícies de aços carbono ou aços de baixa liga, produzindo uma camada com propriedades anti-corrosivas e de resistência necessárias para suportar ambientes sujeitos ao alto desgaste por corrosão. Os resultados deste processo têm tornado essa aplicação bastante atrativa, na medida em que superfícies resistentes à ambientes corrosivos podem ser produzidas a partir de materiais comuns e de menor custo, como os aços carbono, em comparação ao emprego de componentes puramente de aços inoxidáveis, que são extremamente caros.

Vários processos de soldagem podem ser empregados para as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. Portanto, casos empregando a soldagem MIG/MAG, TIG, arco submerso, arame tubular, plasma, laser, entre outros, podem ser frequentemente encontrados. Dos processos anteriores, a soldagem com arame tubular, segundo Jeffus (2004), tem apresentado algumas vantagens condizentes com as atuais necessidades industriais no que diz respeito à obtenção de processos produtivos e econômicos. Entre essas vantagens, destacam-se a deposição de materiais com altas taxas de produção, excelente controle da poça de fusão e mínimo desperdício de eletrodo.

Embora apresente potenciais vantagens produtivas e econômicas, a soldagem com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se caracteriza como uma atividade criteriosa. O fato de que elevados níveis de temperatura e energia, necessários para provocar a fusão e união dos materiais, são alcançados em curto espaço de tempo, pode tornar o processo instável e dependente de alguns cuidados. Além disso, a soldagem é um processo que apresenta vários parâmetros de entrada e múltiplas variáveis de resposta, o que faz com que o adequado controle do processo seja fundamental para o alcance da qualidade desejada do cordão de solda.

Nesse contexto, o aprimoramento dos processos e a busca por condições de soldagem otimizadas são elementos fundamentais para que as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis sejam capazes de depositar cordões com as características geométricas desejadas, apresentando ao mesmo tempo bons índices de produtividade e ocorrência nula de defeitos. Tais aspectos contribuem diretamente para que as propriedades finais dos revestimentos, representadas principalmente pela resistência à corrosão, sejam as melhores possíveis.

A necessidade de processos cada vez mais eficientes e econômicos proporcionou que diversos métodos de otimização fossem desenvolvidos nas últimas décadas. Assim, métodos como o *desirability*, que permite a otimização simultânea de múltiplas características, e algoritmos de busca como o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o Algoritmo

Genético (AG) vêm sendo constantemente empregados. Da mesma forma, a utilização de ferramentas estatísticas sofisticadas como o Projeto e Análise de Experimentos permite uma ampla compreensão a respeito de um dado fenômeno, o que tem contribuído substancialmente para a melhoria da eficiência dos processos e aumento dos níveis de qualidades dos produtos. Apesar de inúmeras vantagens, os métodos de otimização tradicionais podem conduzir a resultados ótimos inapropriados quando se trata da otimização de múltiplas características correlacionadas. Diante desta necessidade, o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) foi desenvolvido recentemente por Paiva (2008), sendo esta uma ferramenta que combina as técnicas da Metodologia de Superfície de Resposta e da Análise de Componentes Principais para a otimização simultânea de múltiplas respostas correlacionadas. No entanto, por ser um método recente, o EQMM ainda não contempla a atribuição de pesos para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes, o que faz desta constatação uma oportunidade para o estudo e aprimoramento desta ferramenta.

1.2. Objetivos

Em função do que foi exposto no item anterior, este trabalho foi desenvolvido com o propósito de cumprir com dois objetivos principais:

- 1º) Otimização do processo de soldagem com arame tubular para o revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L, visando identificar a combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização das características geométricas do cordão de revestimento e da produtividade do processo, garantindo ao mesmo tempo a deposição de cordões livres de defeitos e com mínimas falhas de formação da escória.
- 2º) Proposição de uma estratégia de ponderação das respostas para o Erro Quadrático Médio Multivariado, já que o método ainda não contempla a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes.

A condução desta pesquisa foi realizada através da deposição de aço inoxidável ABNT 316L sobre superfícies de aço carbono ABNT 1020, empregando o processo de soldagem com arame tubular. Os parâmetros do processo estudados incluíram a velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça. A geometria do cordão de revestimento foi analisada através da largura do cordão, penetração, reforço e diluição. A produtividade considerou a taxa de deposição e o rendimento do

processo. A qualidade superficial dos revestimentos foi avaliada através da formação de escória e do aspecto superficial.

O método de pesquisa utilizado foi baseado nas técnicas do Projeto e Análise de Experimentos, sendo dividido em duas fases: 1º) Metodologia de Superfície de Resposta, para desenvolvimento de modelos matemáticos e análise da influência dos parâmetros; 2º) otimização EQMM, para determinação dos parâmetros ótimos.

Com isso, os objetivos gerais enunciados anteriormente podem ser desdobrados nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de modelos matemáticos relacionando os parâmetros da soldagem com arame tubular com as respostas de interesse;
- Análise da influência dos parâmetros sobre a geometria, a produtividade e a qualidade superficial dos revestimentos;
- Identificação de uma combinação ótima dos parâmetros visando a:
 - Maximização da largura do cordão
 - Maximização do reforço
 - Minimização da penetração
 - Minimização da diluição
 - Maximização da taxa de deposição
 - Maximização do rendimento do processo
 - Garantia de um cordão de revestimento isento de defeitos e com pequenas falhas de recobrimento da escória
- Definição de um procedimento para atribuição de pesos às repostas na otimização EQMM;
- Comparação dos resultados do EQMM ponderado com os do EQMM sem ponderação;
- Validação experimental dos resultados.

1.3. Limitações

O presente trabalho encontra-se limitado pelos seguintes elementos:

- O processo de soldagem estudado foi somente o processo com arame tubular. Portanto, os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros casos como, por exemplo, a soldagem MIG/MAG;

- Os únicos materiais empregados foram o aço carbono ABNT 1020 como metal base e o arame tubular de aço inoxidável ABNT 316L como metal de adição, o que também não permite a extrapolação dos resultados para outras especificações de aços carbono ou aços inoxidáveis;
- Como parâmetros do processo, foram analisados a velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça. Outras variáveis como o ângulo da tocha, o tipo de gás de proteção, a vazão do gás de proteção ou o diâmetro do eletrodo foram considerados como parâmetros fixos;
- Entre as repostas do processo, este trabalho se propôs à otimização apenas da geometria, da produtividade e da qualidade superficial dos revestimentos. Sendo assim, propriedades como a dureza, microestrutura e resistência à corrosão não foram analisadas;
- Entre as técnicas do Projeto e Análise de Experimento, foi utilizado somente a Metodologia de Superfície de Resposta;
- Como método de otimização, foi empregado somente o EQMM;
- O único algoritmo de otimização utilizado foi o Algoritmo Genético, executado a partir de softwares comerciais.

1.4. Estrutura do trabalho

Este primeiro capítulo teve como objetivo a introdução do problema de pesquisa. Dentro desta proposta, a importância da soldagem foi contextualizada frente aos diversos processos de fabricação existentes. Entre suas várias aplicações, procurou-se introduzir a relevância da soldagem de revestimento na obtenção de superfícies com propriedades de anti-corrosão e as características que tem feito desta uma aplicação de crescente interesse pelos ambientes industriais. Os fatores que motivaram a realização desta pesquisa foram também apresentados, entre eles a viabilidade econômica do processo de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis e a possibilidade de aprimoramento do EQMM como método de otimização. Com isso, os objetivos e as limitações deste trabalho foram estabelecidos juntamente com uma breve descrição de como a pesquisa foi desenvolvida. Finalmente, levando em consideração o que foi discutido anteriormente e para que os objetivos definidos pudessem ser devidamente alcançados, os capítulos seguintes foram organizados da seguinte forma:

- O **Capítulo 2** apresenta os conceitos necessários para a fundamentação teórica desta pesquisa. São apresentados os principais conceitos relacionados à soldagem de revestimento, revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis, soldagem com arame tubular e uma análise das pesquisas anteriores desenvolvidas sobre este tema. Quanto às técnicas de experimentação e otimização, discute-se o Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfícies de Resposta, EQMM e Algoritmo Genético. Os aspectos teóricos para a estratégia de ponderação das respostas no EQMM são desenvolvidos neste capítulo.
- O **Capítulo 3** descreve o método experimental utilizado, detalhando os equipamentos empregados e as etapas seguidas em cada fase do estudo.
- No **Capítulo 4** o método experimental é aplicado para a otimização da soldagem com arame tubular no revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, apresentando e discutindo simultaneamente os resultados obtidos em cada etapa do estudo. A estratégia de ponderação das respostas para o EQMM é verificada experimentalmente ao final deste capítulo.
- O **Capítulo 5** encerra o trabalho, apresentando as conclusões, contribuições e sugestões para estudos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Considerações iniciais

Conforme discutido brevemente no final do capítulo anterior, este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos que compõem o suporte teórico deste trabalho. Em relação à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, a discussão de tais idéias é importante para que as características desse processo sejam bem conhecidas, bem como suas aplicações, vantagens e desafios. Dessa forma, são apresentados os principais conceitos e definições acerca da soldagem de revestimento, soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis e soldagem com arame tubular. Uma análise das pesquisas anteriores envolvendo este processo também é apresentada com a finalidade de identificar como este assunto vem sendo abordado pela literatura. Esta análise se mostra como um fator fundamental para o alinhamento dos objetivos definidos no Capítulo 1, na medida em que permite compreender o que já existe em relação ao tema e quais contribuições ainda podem ser feitas. Quanto às ferramentas de análise e otimização, o conhecimento dos conceitos envolvendo o Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfície de Resposta, EQMM e Algoritmo Genético é relevante para que o método experimental a ser seguido seja definido com clareza e objetividade, permitindo a extração de informações importantes e confiáveis em relação ao fenômeno estudado. Para o EQMM, a partir da discussão dos conceitos desenvolvidos por Paiva (2008), busca-se estabelecer neste capítulo os aspectos teóricos envolvendo a estratégia de ponderação das respostas para o respectivo método.

2.2. Soldagem de revestimento

2.2.1. Conceitos e definições

A soldagem de revestimento é definida pela AWS como a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas (PHILLIPS, 1965b). Basicamente, este processo é empregado quando se deseja uma das seguintes aplicações:

- Prorrogação da vida útil de peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação;
- Recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão;

- Criação de superfícies com características especiais.

Palani e Murugan (2006a) argumentam que os componentes industriais estão sujeitos aos mais diversos tipos de desgaste, o que demanda manutenções frequentes e faz com que os custos de suas substituições sejam elevados. Consequentemente, a extensão da vida útil de tais componentes pode resultar em economias significativas.

Portanto, os diversos metais de adição são depositados com a finalidade de melhorar as propriedades de resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência a altas temperaturas, aumento da dureza, controle dimensional ou para obtenção de algumas necessidades metalúrgicas (MURUGAN e PARMAR, 1997b). Tais características contribuem para que a soldagem de revestimento apresente as seguintes vantagens:

- Melhoria das propriedades superficiais no local desejado;
- Fácil uso de materiais de dureza elevada e ligas resistentes ao desgaste;
- Aplicação rápida do processo de revestimento;
- Uso econômico de elementos de liga de custos elevados;
- Proteção das peças;
- Obtenção de economias em função da extensão da vida útil dos componentes, redução de manutenção, substituição e recuperação de peças desgastadas, utilização de materiais base de baixo custo, redução do consumo de energia em serviço, aumento da eficiência dos componentes.

2.2.2. Princípios de operação

Os revestimentos são geralmente depositados por processos de soldagem a arco elétrico ou gás combustível (PHILLIPS, 1965b). Técnicas manuais, semi-automáticas ou automáticas podem ser utilizadas independentemente do processo empregado. Quanto aos materiais de adição, compostos na forma de eletrodos nus, eletrodos revestidos, bobinas de arames, pastas e pós são disponíveis em uma grande variedade. A adesão com o material base ocorre pela fusão ou união metalúrgica.

Alguns cuidados importantes no uso da soldagem de revestimento devem ser tomados em relação à geometria da peça, custo do procedimento de soldagem, desenvolvimento de trincas ou distorções a partir das tensões térmicas de soldagem e a qualidade desejada do

revestimento. A qualidade do material depositado varia amplamente, dependendo da aplicação, do material utilizado e da habilidade do soldador.

Com isso, o processo de revestimento ocorre de forma que os cordões sejam depositados lateralmente e com um dado nível de sobreposição até que toda a região de interesse seja recoberta (**Figura 2.1**). O nível de sobreposição dos cordões depende da aplicação do revestimento e do processo de soldagem empregado.

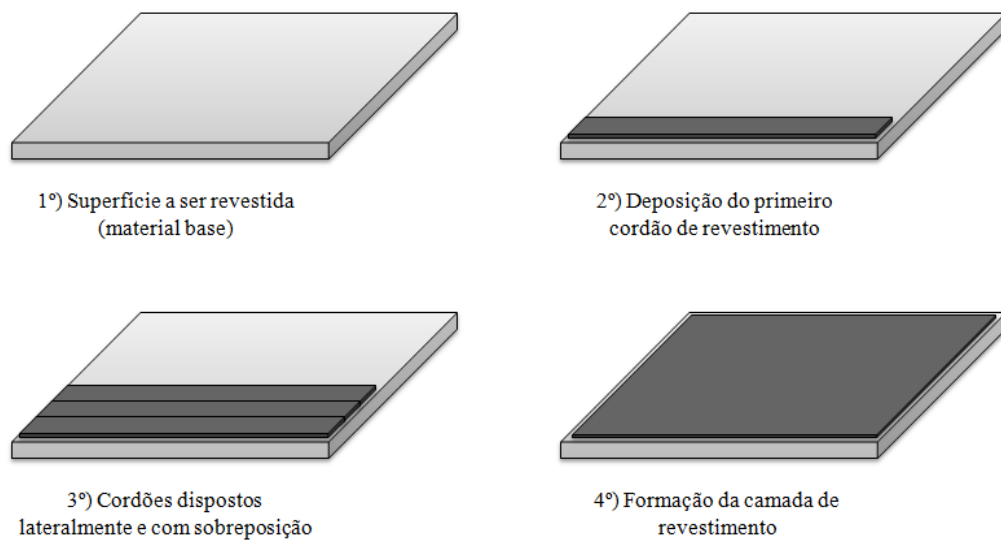


Figura 2.1 – Princípio de operação da soldagem de revestimento

A **Figura 2.2** ilustra três exemplos reais de camadas de revestimentos depositados a partir de processos de soldagem.



Figura 2.2 – Exemplos de camadas de revestimento depositadas a partir de processos de soldagem

2.2.3. Características do processo

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem diz respeito à geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada (*Figura 2.3a*), na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D) (*Figura 2.3b*). A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo. Assim, um dos maiores desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado dos parâmetros do processo para que o material depositado adquira a geometria desejada.

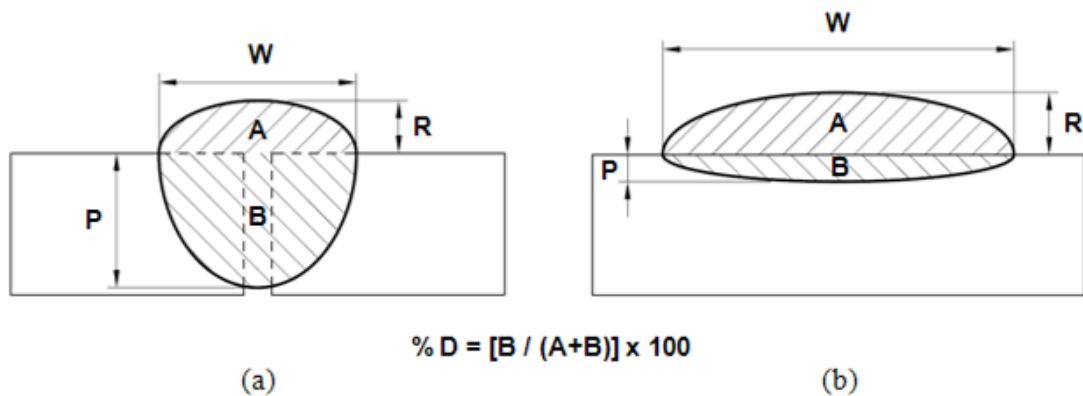


Figura 2.3 – Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento

A importância de que os cordões de revestimento apresentem a geometria definida pela *Figura 2.3* vem sendo destacada por autores como Kannan e Murugan (2006a) e Shahi e Pandey (2006). A *Figura 2.4* descreve o perfil geométrico desejado, segundo Kannan e Murugan (2006a), após a deposição de três cordões com uma sobreposição de 40% para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis duplex.

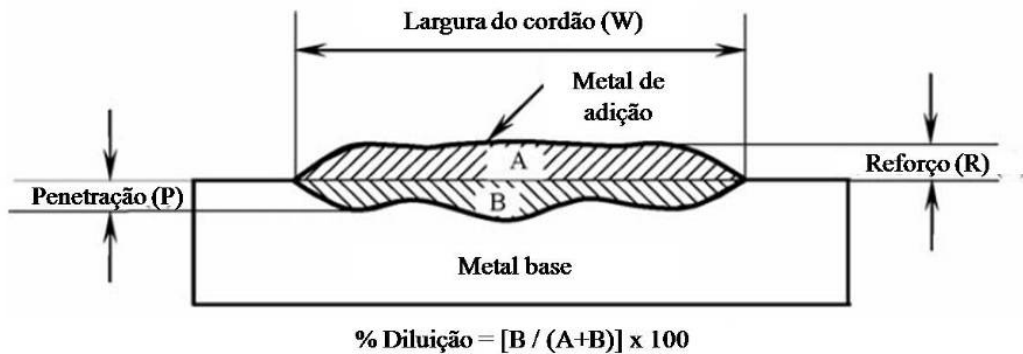


Figura 2.4 – Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40% (Adaptado de KANNAN e MURUGAN, 2006a)

2.3. Soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

2.3.1. Conceitos e definições

Considerando as possíveis aplicações da soldagem de revestimento apresentadas no item 2.2, verifica-se que o desenvolvimento do presente trabalho está ligado ao terceiro caso de aplicação, ou seja, a criação de superfícies com características especiais. Sendo assim, a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis é definida por Palani e Murugan (2006a, 2007) como a deposição de uma camada de aço inoxidável sobre superfícies de aços carbono ou aços de baixa liga com o objetivo de obter revestimentos com propriedades de anti-corrosão. Visto que o preço dos aços inoxidáveis é aproximadamente dez vezes maior que o preço dos aços carbono, a principal vantagem deste processo está relacionada ao fato de que camadas anti-corrosivas podem ser produzidas de forma mais barata, a partir de materiais de menor custo, como os aços carbono. Além disso, o emprego de um procedimento de soldagem contribui para que os revestimentos sejam depositados com rapidez e economia de material.

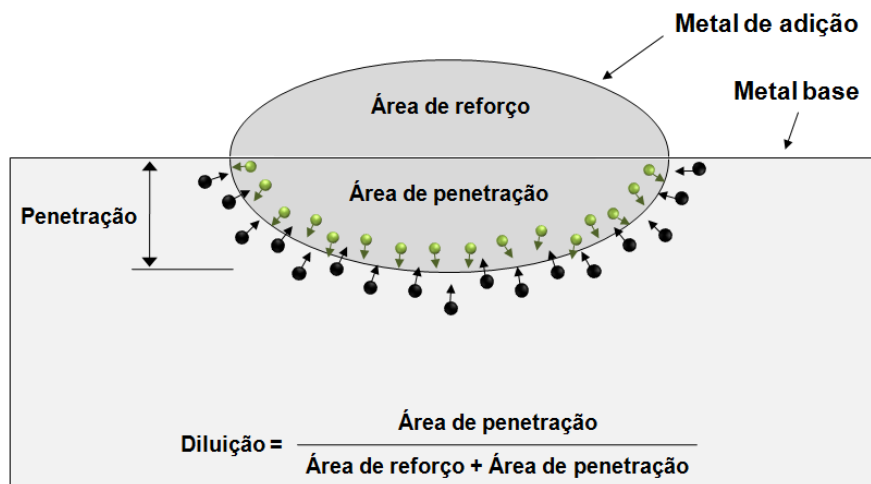
Quanto às propriedades dos revestimentos de aços inoxidáveis, as características desejadas do material depositado, segundo Kannan e Murugan (2006b), se resumem a uma resistência razoável, boa soldabilidade com o metal base e boas propriedades de resistência à corrosão geral e à corrosão localizada. Para Ferriere *et al.* (2006), os revestimentos de aços inoxidáveis sobre aços carbono se mostram como uma boa solução para os problemas de elaboração de materiais que combinem altos níveis de propriedades mecânicas com boa resistência à corrosão.

As características anteriores têm feito da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis uma operação de crescente aplicabilidade entre os mais diversos tipos de indústrias, como por exemplo, as indústrias petrolíferas, químicas, alimentícias, agrícolas, nucleares, navais, ferroviária, de construção civil, além várias outras (MURUGAN e PARMAR, 1994; KANNAN e MURUGAN, 2006a).

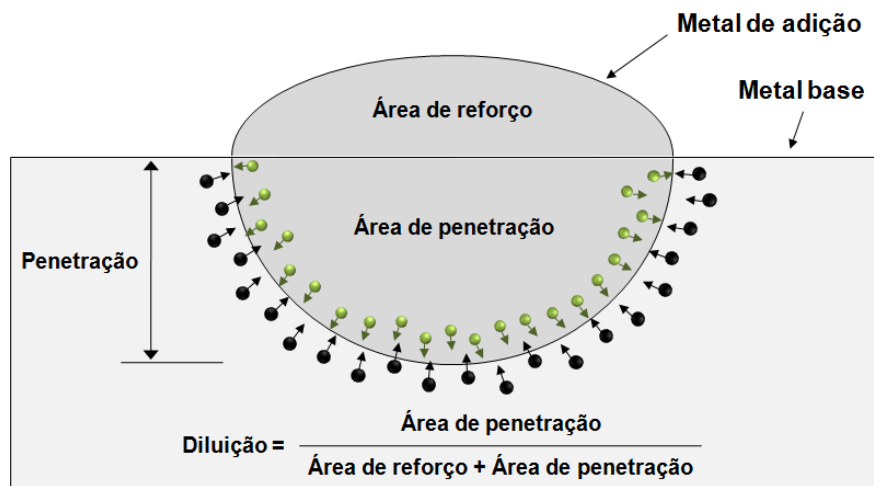
Entretanto, a existência de todos esses fatores positivos faz com que este processo apresente suas peculiaridades. Conforme apresentado anteriormente, um dos principais desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado do procedimento de soldagem para que o cordão seja depositado com a geometria desejada. Além disso, para o caso de revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis, verifica-se que as propriedades e a qualidade final dos revestimentos são fortemente influenciadas pelo percentual de diluição. Na medida em que este processo se propõe à união de materiais com composições químicas diferentes, a mistura dos elementos presentes no aço carbono com os elementos do aço inoxidável pode comprometer as propriedades finais de anti-corrosão, o que inviabiliza esta operação. Portanto, o controle da diluição se caracteriza como um dos requisitos mais importantes da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. A importância do controle da diluição para a deposição de revestimentos anti-corrosivos é discutida em maiores detalhes a seguir.

2.3.2. Controle da diluição

A diluição é definida, de acordo com a **Figura 2.5** como a relação entre a área de penetração e a área total da seção transversal do cordão de solda. Assim, o aumento da penetração provoca o aumento da área de penetração e esta, conseqüentemente, aumenta o nível de diluição. No caso da união de materiais diferentes, o aumento da diluição faz com que exista uma maior difusão entre os elementos presentes na composição química dos respectivos materiais. A **Figura 2.5** ilustra a afirmação anterior, indicando que a união de materiais com composições químicas diferentes tende a difundir os elementos entre o metal base e do metal de adição, o que pode resultar na formação de novos compostos (**Figura 2.5a**). Dessa forma, o aumento da penetração e, conseqüentemente, da diluição, faz com que a região de contato entre os materiais também aumente, resultando em uma maior difusão entre os seus elementos (**Figura 2.5b**).



(a)



(b)

Figura 2.5 – Aumento da difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função do aumento do nível de diluição

Quando se trata do revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, o aumento da interação entre os materiais se mostra como um fator prejudicial aos resultados do processo, já que compromete as propriedades finais de resistência à corrosão. Isto explica porque diversos pesquisadores apresentam o controle da diluição como um dos fatores de maior importância para a qualidade final dos revestimentos de aços inoxidáveis (MURUGAN e PARMAR, 1997b; GHOSH *et al.*, 1998; PALANI e MURUGAN, 2007; SHAHI e PANDEY, 2008b; BALASUBRAMANIAN *et al.*, 2009a).

Kannan e Murugan (2006b) e Shahi e Pandey (2008b) afirmam que o aumento da diluição reduz os elementos de liga e aumenta o conteúdo de carbono da camada revestida,

reduzindo as propriedades de resistência à corrosão além de causar outros problemas metalúrgicos.

Para Palani *et al.* (2006), o nível de diluição depende da diferença entre as composições químicas do metal base e metal de adição, da diluição inerente ao processo de soldagem utilizado e da técnica de soldagem. Além disso, independentemente do processo de soldagem escolhido, as variações na diluição são fortemente influenciadas pelas variáveis do processo, tais como corrente, tensão e velocidade de soldagem.

A existência de todas essas características tem contribuído para que o estudo e desenvolvimento de procedimentos capazes de oferecer uma diluição ótima se tornassem de grande importância nos últimos anos. Entretanto, apesar de valores mínimos de diluição serem desejados, Murugan e Parmar (1997b) sugerem que esta diluição mínima deve variar entre 10% e 15%, para satisfazer a resistência de união entre o metal base e o metal de adição.

2.4. Soldagem com arame tubular

2.4.1. Fundamentos do processo

A soldagem a arco com arame tubular (Flux Cored Arc Welding – FCAW) é o processo que produz a coalescência dos metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho (MARQUES *et al.*, 2005; RODRIGUES, 2005). A proteção do arco e do cordão é feita por um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo, que pode ser suplementada por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa.

O fluxo de soldagem, conforme indica a **Figura 2.6**, consiste em um pó localizado no interior do invólucro metálico, o qual contém minerais, ferros-liga, e materiais que forneçam gases de proteção, desoxidantes e elementos formadores de escória. Os ingredientes do fluxo promovem a estabilidade do arco, influenciando nas propriedades mecânicas do metal de solda, bem como no perfil da solda.

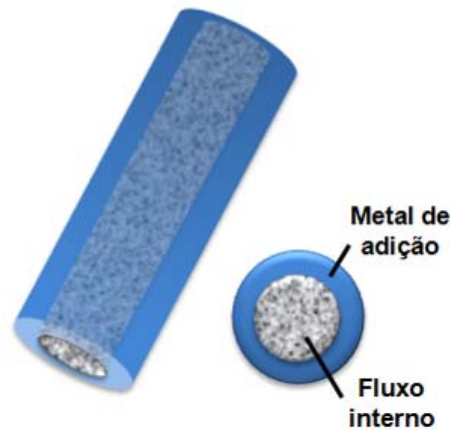


Figura 2.6 – Formato dos arames tubulares

Segundo Fortes (2004), as funções básicas dos componentes do fluxo são:

- **Desoxidante e formadores de nitretos:** como o nitrogênio e o oxigênio podem causar porosidade e fragilidade, são adicionados ao fluxo desoxidantes como o manganês e o silício. No caso de arames tubulares autoprotetidos, são adicionados formadores de nitretos como o alumínio. Ambos auxiliam na purificação do metal de solda;
- **Formadores de escória:** compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga;
- **Estabilizadores do arco:** elementos como o potássio e o sódio auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos;
- **Elementos de liga:** elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio são empregados para aumentar a resistência, a ductilidade, a dureza e a tenacidade;
- **Geradores de gases:** minerais como a fluorita e o calcário são normalmente usados para formar uma atmosfera protetora nos arames tubulares autoprotetidos.

Existem duas variações básicas do processo de soldagem com arame tubular, uma em que toda a proteção necessária é gerada pelo próprio fluxo contido no eletrodo, camada de arame autoprotetido (*Figura 2.7*), e outra em que a proteção é complementada por uma nuvem de gás, geralmente o CO₂ (*Figura 2.8*).

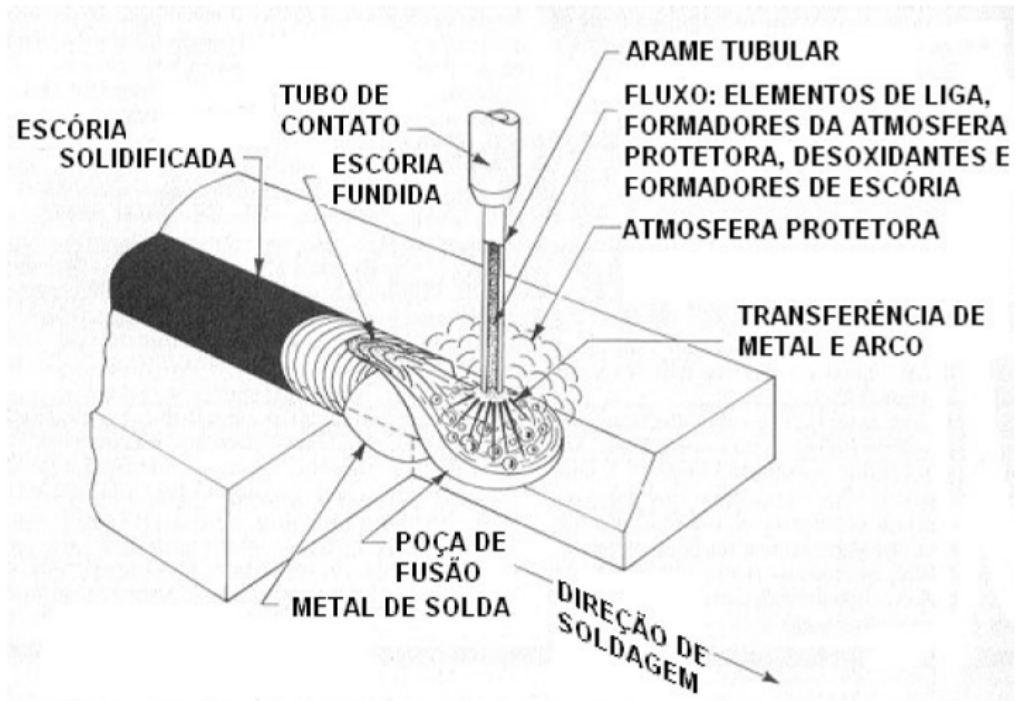


Figura 2.7 – Soldagem com arame tubular autoprottegido (FORTES, 2004)

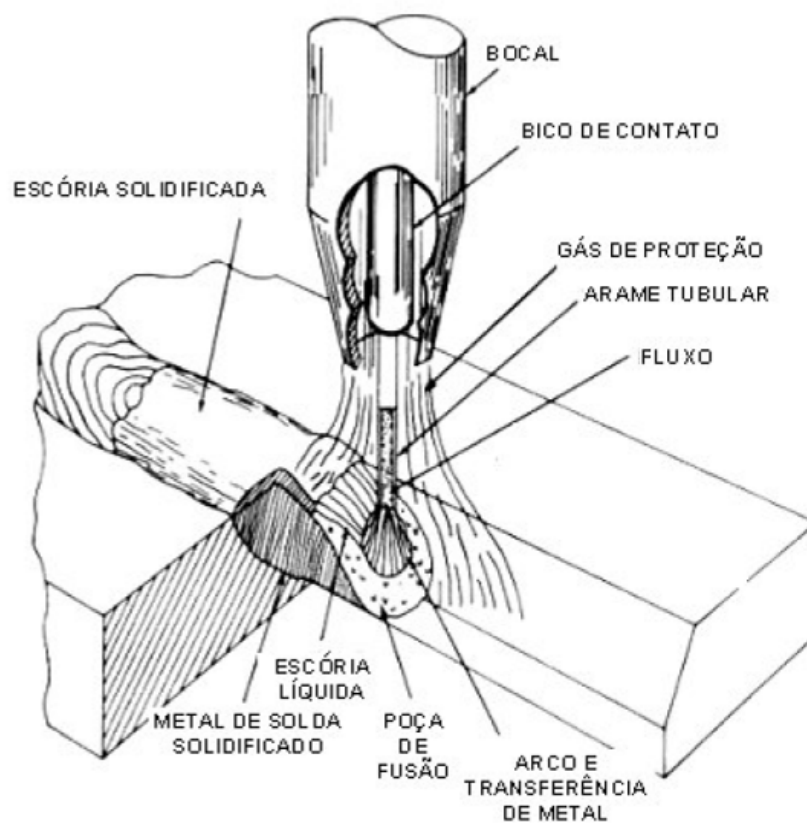


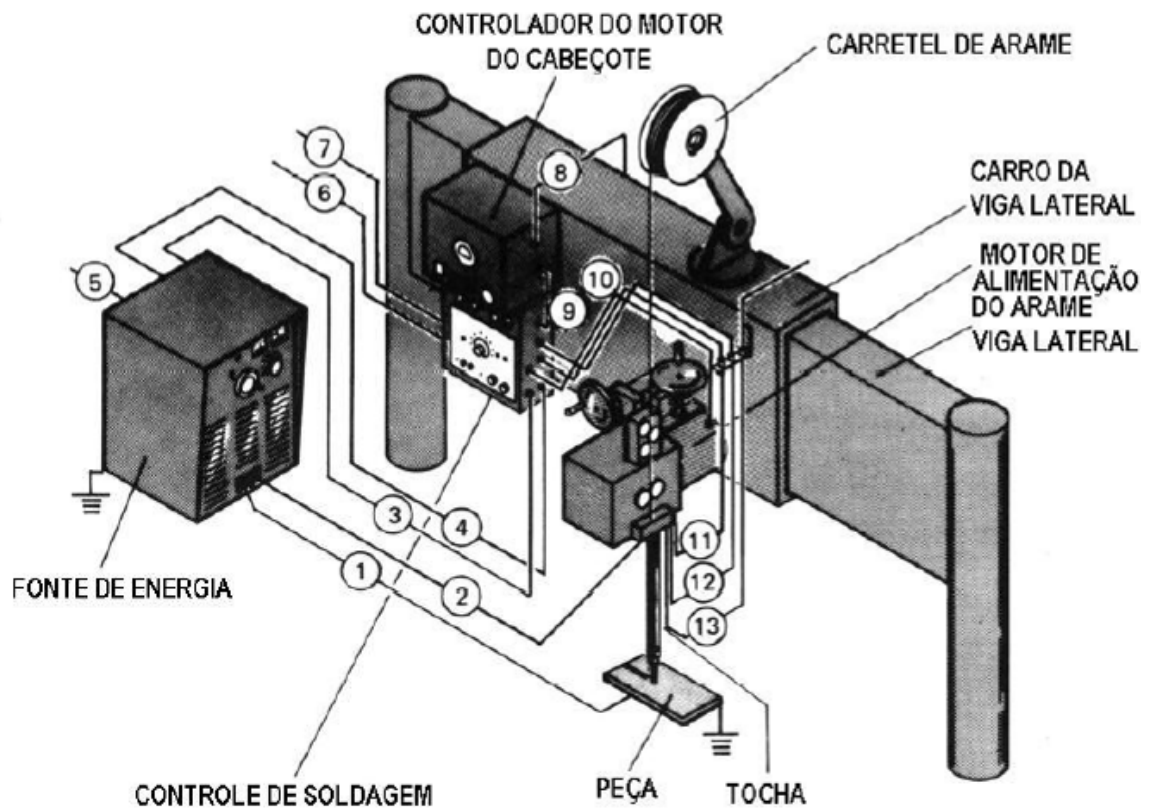
Figura 2.8 – Soldagem com arame tubular com gás de proteção (FORTES, 2004)

A soldagem com arames tubulares, segundo Marques *et al.* (2005), é normalmente um processo semi-automático e muito semelhante ao processo MIG/MAG, no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Por outro lado, o processo também tem suas semelhanças com a soldagem com eletrodos revestidos, sob o ponto de vista metalúrgico. Assim, a soldagem com arames tubulares é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem MIG/MAG, como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e alto rendimento, que resultam em grande produtividade, e as vantagens da soldagem com eletrodos revestidos, como a alta versatilidade, possibilidade de ajustes de composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo. Na verdade, a soldagem com arame tubular apresenta características em termos de flexibilidade e produtividade às vezes superiores às da soldagem com eletrodos revestidos e MIG/MAG. Para Fortes (2004), a diferença mais importante da soldagem com arame tubular em relação à soldagem MIG/MAG é o seu desempenho em termos de maior produtividade e melhor integridade do metal de solda.

2.4.2. Equipamentos e aplicações industriais

O equipamento básico usado para a soldagem com arame tubular é semelhante ao da soldagem MIG/MAG. A **Figura 2.9** descreve a configuração dos equipamentos necessários para aplicações automatizadas da soldagem MIG/MAG ou com arame tubular.

A utilização da soldagem com arame tubular tem aumentado muito nos últimos anos, devido às suas características e ao desenvolvimento de novos consumíveis. No Brasil, o interesse por arames tubulares também tem aumentado muito. Assim, além de ser uma alternativa à soldagem com eletrodos revestidos e arames sólidos, em muitas situações a soldagem com arame tubular tem sido usada nas indústrias naval e nuclear, na construção de plataformas marítimas para exploração de petróleo e na fabricação de componentes e estruturas de aço carbono, aço de baixa liga e aço inoxidáveis (MARQUES *et al.*, 2005).



1. Cabo de solda (negativo)
2. Cabo de solda (positivo)
3. Detecção de corrente e tensão de soldagem
4. Entrada de 42 V (CA)
5. Conexão para a fonte primária (220/380/440 V)
6. Entrada de água de refrigeração
7. Entrada do gás de proteção
8. Saída para o motor de deslocamento do pórtico
9. Entrada 42 V (CA) para a movimentação / parada do cabeçote
10. Motor de alimentação do arame
11. Entrada do gás de proteção
12. Entrada de água de refrigeração
13. Saída de água de refrigeração

Figura 2.9 – Instalação para a soldagem automática MIG/MAG ou com arame tubular (FORTES, 2005)

2.4.3. Vantagens e limitações

As principais vantagens da soldagem com arame tubular, de acordo com Jeffus (2004), estão relacionadas aos seguintes elementos:

- Altas taxas de deposição;
- Mínimo desperdício de eletrodo;
- Permite a soldagem em todas as posições;
- Flexibilidade;
- Alta qualidade da solda;
- Excelente controle da poça de fusão.

Quanto às limitações, consideram-se os seguintes fatores:

- Processo limitado à soldagem de metais ferrosos e ligas de níquel;
- Maior custo dos equipamentos e eletrodos;
- Exige operações de remoção da escória;
- Maior geração de fumos.

2.5. Pesquisas anteriores relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

2.5.1. Objetivos e critérios de busca

Uma pesquisa nas principais bases de dados do portal de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) foi realizada com o objetivo de analisar a forma com que o tema da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis vem sendo tratado na literatura. Dessa forma, a busca pelos trabalhos foi feita através das expressões “*stainless steel cladding*”, “*stainless steel hardfacing*” e “*stainless steel surfacing*” (“*revestimentos de aços inoxidáveis*”), definidas como palavras-chave ou palavras contidas nos títulos dos artigos. Para a seleção dos trabalhos, foram adotados os seguintes critérios:

- Data de publicação igual ou superior a 1990;

- Utilização do aço carbono ou aço de baixa liga como metal base;
- Utilização do aço inoxidável como metal de adição.

Assim, foram identificados trinta e oito artigos abordando a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. A análise dessas pesquisas foi feita através da classificação dos trabalhos quanto à data de publicação, processos de soldagem empregados, variáveis estudadas e respostas analisadas. Tais análises encontram-se discutidas em maiores detalhes nos itens seguintes.

2.5.2. Classificação dos trabalhos quanto à data de publicação

A **Figura 2.10** apresenta a classificação das pesquisas anteriores quanto ao período de publicação. Observa-se que o número de publicações abordando a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis vem crescendo nos últimos anos. Esta constatação vai de encontro ao que foi exposto anteriormente, no que diz respeito ao fato de que o interesse industrial por esta aplicação de soldagem tem aumentado (MARQUES *et al.*, 2005; PALANI e MURUGAN, 2006a, 2007). Consequentemente, o aumento do interesse industrial também aumenta a necessidade por investigações científicas que permitam elucidar e melhor compreender os fenômenos que envolvem o respectivo processo. Sendo assim, tais observações colocam a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis como uma linha de pesquisa atual e de relevância científica.

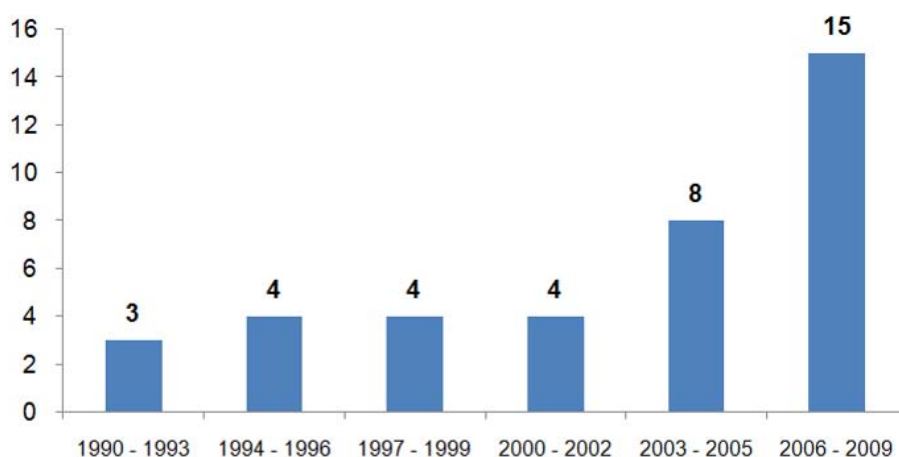


Figura 2.10 - Quantidade de publicações a cada três anos relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

2.5.3. Classificação dos trabalhos quanto aos processos de soldagem empregados

A análise das pesquisas anteriores também mostrou que vários processos de soldagem podem ser utilizados para as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. Portanto, casos empregando a soldagem MIG/MAG, arame tubular, arco submerso, TIG, laser, plasma e processos menos convencionais como a soldagem por explosão e soldagem com energia solar podem ser comumente encontrados. A *Tabela 2.1* relaciona as pesquisas analisadas com os respectivos processos de soldagem empregados.

Pela *Tabela 2.1*, observa-se que a soldagem a laser se caracterizou como o processo mais utilizado, estando presente em 24% das pesquisas analisadas. Os processos menos comuns para as operações de revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis incluíram a soldagem com plasma, soldagem por explosão e soldagem com feixe de elétrons, cada uma aparecendo em apenas uma publicação. Além disso, foi também observado um equilíbrio quanto ao emprego das soldagens MIG/MAG, arame tubular e arco submerso, já que cada um dos respectivos processos foi utilizado por 18% dos trabalhos.

Mesmo que vários processos de soldagem possam ser utilizados para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, verifica-se que as variáveis operacionais ou os parâmetros de soldagem divergem entre os processos. Além disso, conforme apresentado anteriormente, o desenvolvimento do presente trabalho se propôs ao estudo do processo de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis empregando a soldagem com arame tubular. Sendo assim, as pesquisas anteriores que utilizaram a soldagem com arame tubular foram analisadas com maior profundidade, considerando agora as variáveis do processo e as repostas analisadas para os revestimentos. Considerando que a soldagem com arame tubular é semelhante à MIG/MAG, as publicações considerando este último processo também foram analisadas sob esta dimensão. Os resultados desta análise são apresentados a seguir.

Referência	Processos de soldagem empregados								
	MIG/MAG	Arame tubular	Arco submerso	Laser	Plasma	Explosão	Feixe de elétrons	Energia solar	Vários processos
Ishida (1991)									*
Mallya e Srinivas (1993)			*						
Murugan <i>et al.</i> (1993)			*						
Murugan e Parmar (1994)	*								
Tosto <i>et al.</i> (1994)							*		
Li <i>et al.</i> (1996a)				*					
Li <i>et al.</i> (1996b)				*					
Anjos <i>et al.</i> (1997)				*					
Murugan e Parmar (1997a)			*						
Murugan e Parmar (1997b)	*								
Ghosh <i>et al.</i> (1998)	*								
Corrêa <i>et al.</i> (2000)	*								
Rajeev <i>et al.</i> (2001)		*							
Sha e Tsai (2001)									*
Tarng <i>et al.</i> (2002)			*						
Pinkerton e Li (2003)				*					
Kacar e Acarer (2004)						*			
Kim <i>et al.</i> (2004)			*						
Lee <i>et al.</i> (2004)			*						
Pinkerton e Li (2004)				*					

Tabela 2.1 – Processos de soldagem empregados nas pesquisas anteriores relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

Referência	Processos de soldagem empregados								
	MIG/MAG	Arame tubular	Arco submerso	Laser	Plasma	Explosão	Feixe de elétrons	Energia solar	Vários processos
Sha e Tsai (2004)				*					
Abbas e Ghazanfar (2005)				*					
Majumdar <i>et al.</i> (2005)				*					
Ferriere <i>et al.</i> (2006)								*	
Kannan e Murugan (2006a)		*							
Kannan e Murugan (2006b)		*							
Palani e Murugan (2006a)		*							
Palani e Murugan (2006b)		*							
Palani <i>et al.</i> (2006)		*							
Shahi e Pandey (2006)	*								
Song <i>et al.</i> (2006)				*					
Palani e Murugan (2007)		*							
Bautista <i>et al.</i> (2008)								*	
Shahi e Pandey (2008a)	*								
Shahi e Pandey (2008b)	*								
Balasubramanian <i>et al.</i> (2009a)					*				
Balasubramanian <i>et al.</i> (2009b)									*
Kuo <i>et al.</i> (2009)			*						
Ocorrência	7	7	7	9	1	1	1	2	3
Porcentagem	18%	18%	18%	24%	3%	3%	3%	5%	8%

Tabela 2.1 – Processos de soldagem empregados nas pesquisas anteriores relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis (continuação)

2.5.4. Classificação dos trabalhos quanto aos parâmetros do processo de soldagem

Para os casos da soldagem MIG/MAG ou com arame tubular, verifica-se que os principais parâmetros compreendem a corrente, velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem, distância bico de contato peça, ângulo da tocha em relação à peça e o tipo de gás de proteção. Sendo assim, as pesquisas anteriores que utilizaram a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis foram classificadas considerando os parâmetros estudados, visando identificar quais entre eles são provavelmente mais importantes. A **Tabela 2.2** apresenta os parâmetros analisados por esses trabalhos.

Referência	I	Va	T	Vs	N	Ta
Murugan e Parmar (1994) ¹		*	*	*	*	
Murugan e Parmar (1997b) ¹	*			*	*	
Ghosh <i>et al.</i> (1998) ¹	*					
Corrêa <i>et al.</i> (2000) ¹	*					
Rajeev <i>et al.</i> (2001) ²	*		*	*	*	
Kannan e Murugan (2006a) ²	*			*	*	*
Kannan e Murugan (2006b) ²	*			*	*	*
Palani e Murugan (2006a) ²	*			*	*	
Palani e Murugan (2006b) ²	*			*	*	
Palani <i>et al.</i> (2006) ²	*			*	*	
Shahi e Pandey (2006) ¹		*	*	*	*	
Palani e Murugan (2007) ²	*			*	*	
Shahi e Pandey (2008a) ¹		*	*	*	*	
Shahi e Pandey (2008b) ¹		*	*	*	*	

I – Corrente (A); Va – Velocidade de alimentação do arame (m/min); T – Tensão (V);
Vs – Velocidade de soldagem (cm/min); N – Distância bico de contato peça (mm); Ta - Ângulo da tocha (°)

Tabela 2.2 – Parâmetros estudados nas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

A análise da tabela anterior mostra que a corrente, a velocidade de soldagem e a distância bico de contato peça se caracterizam como parâmetros importantes para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis empregando a soldagem MIG/MAG ou

com arame tubular. Tais parâmetros foram considerados por quase todos os trabalhos analisados. Para a velocidade de alimentação do arame, verifica-se que esta se encontra diretamente relacionada com o efeito da corrente. Na medida em que a velocidade de alimentação foi considerada pelos trabalhos que não incluíram a corrente como parâmetros de análise, pode-se afirmar que o efeito da corrente foi estudado por todos os trabalhos relacionados pela **Tabela 2.2**. Considerando a tensão e o ângulo da tocha, poucos trabalhos se propuseram ao estudo desses parâmetros.

A título de ilustração, a **Figura 2.11** mostra os efeitos da corrente, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre as características geométricas dos revestimentos de aço inoxidável 317 L depositados sobre superfícies de aços estruturais. Tais informações foram obtidas por Palani e Murugan (2006a), mostrando que os respectivos parâmetros afetam significativamente os resultados dos revestimentos. Entretanto, o grau de significância dos parâmetros varia entre as respostas.

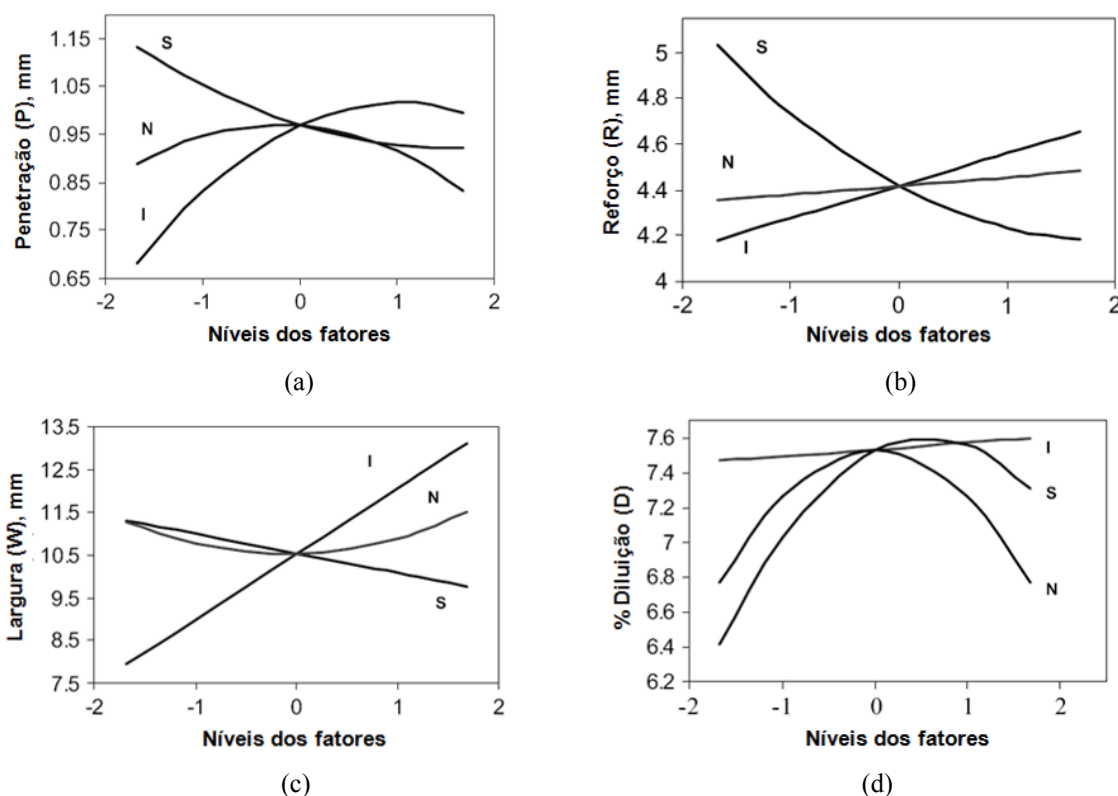


Figura 2.11 – Influência da corrente (I), velocidade de soldagem (S) e distância bico de contato peça (N) sobre a geometria do revestimento: a) penetração; b) reforço; c) largura do cordão; d) diluição (Adaptado de PALANI e MURUGAN, 2006a)

Outro ponto importante destacado pelos autores e também observado em outros trabalhos como os de Kannan e Murugan (2006b), Palani e Murugan (2007), Shahi e Pandey

(2008b) e Balasubramanian *et al.* (2009a) diz respeito ao fato de que o efeito conjunto de dois parâmetros pode influenciar de maneira significativa as propriedades finais dos revestimentos, conforme mostra a **Figura 2.12**. Sendo assim, esta análise das interações entre os parâmetros não pode ser desconsiderada.

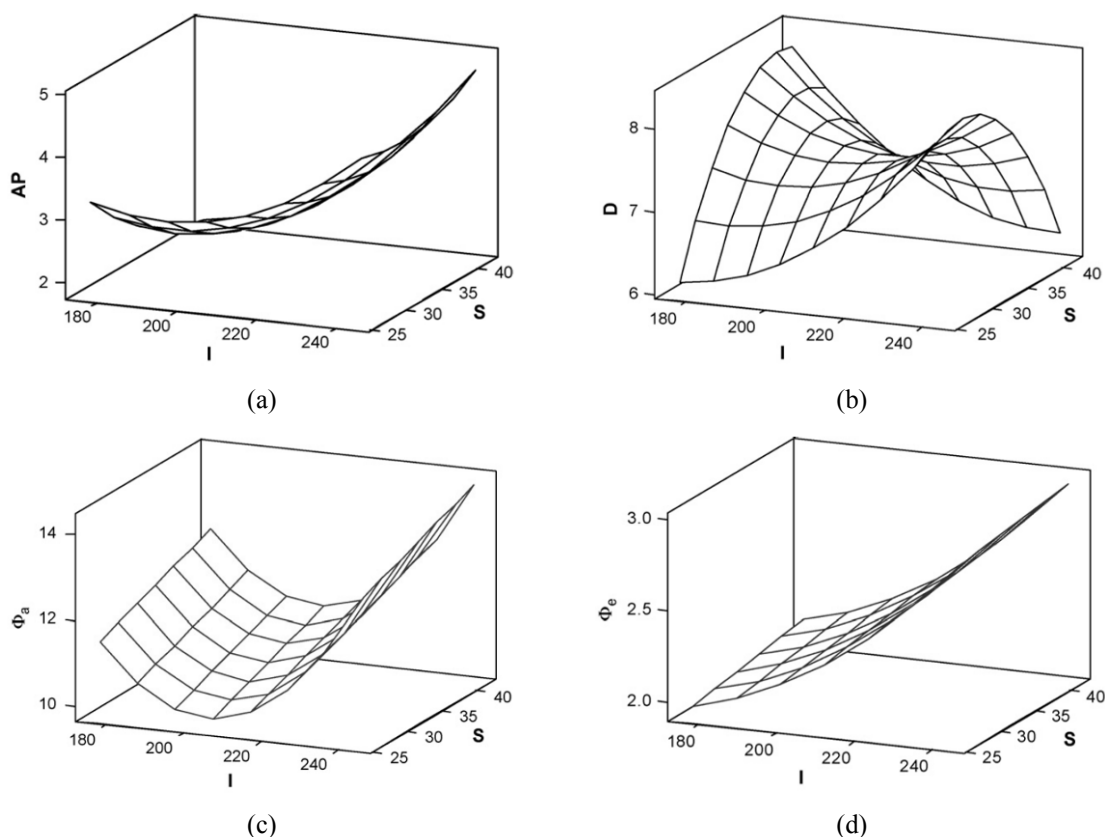


Figura 2.12 – Efeito da interação entre corrente (I) e velocidade de soldagem (S) sobre a geometria do revestimento: a) área de penetração (AP); b) diluição (D); c) coeficiente de forma interno (ϕ_a); d) coeficiente de forma externo (ϕ_e) (Adaptado de PALANI e MURUGAN, 2007)

Após a classificação das pesquisas anteriores com relação aos parâmetros estudados, as faixas de trabalho de cada um deles foram também comparadas, com a finalidade de se ter uma idéia do espaço experimental analisado para o estudo dos revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis. Esta análise foi de grande relevância para a definição dos níveis de trabalho dos parâmetros considerados pelo presente trabalho. As **Tabelas 2.3 – 2.9** apresentam as faixas de trabalho analisadas pelas pesquisas anteriores. Vale destacar que todos os pesquisadores relacionados pelas tabelas seguintes, exceto Shahi e Pandey (2006, 2008a, 2008b), trabalharam com arames de aços inoxidáveis com diâmetro de 1,2 mm. Para os três casos em exceção, foram utilizados respectivamente arames com diâmetros de 1,14 mm, 1,14 mm e 1,6 mm.

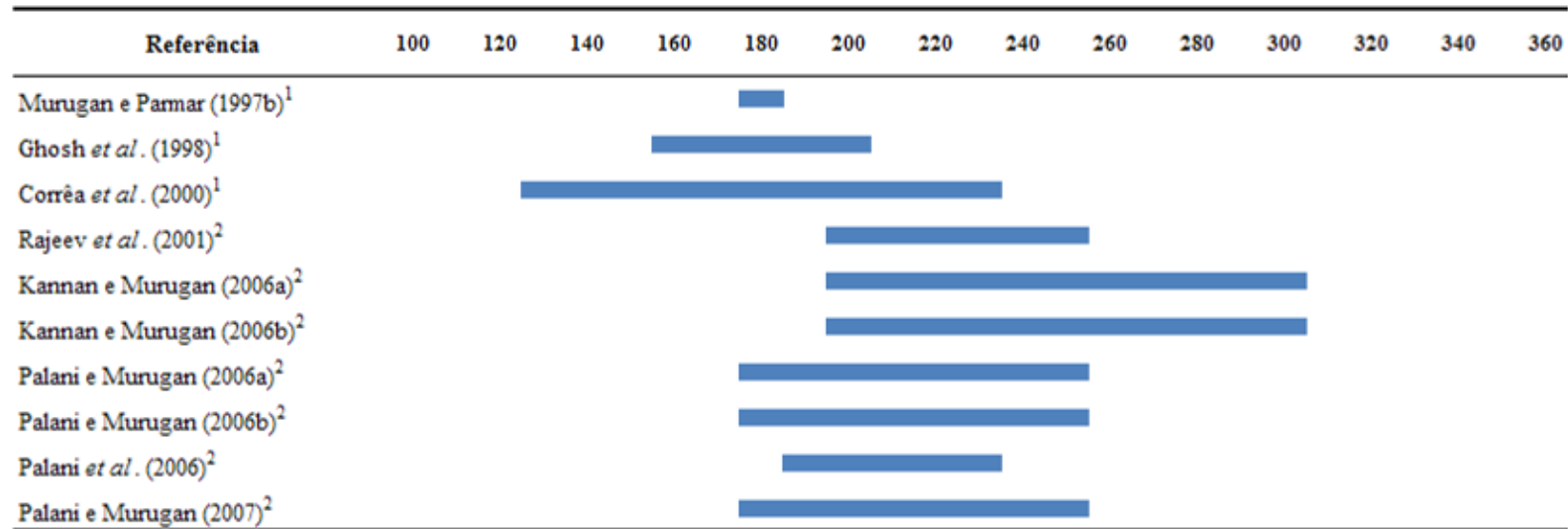
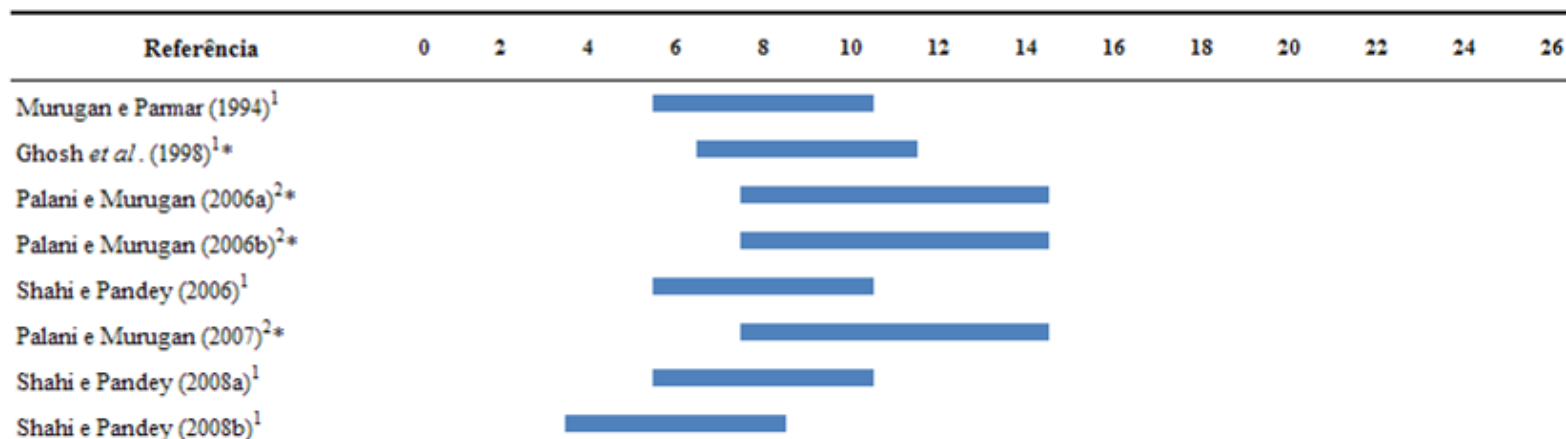


Tabela 2.3 – Faixas de corrente (A) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis



* Apresentam a velocidade de alimentação como função da corrente de soldagem, sendo esta última a variável estudada.

Tabela 2.4 – Faixas de velocidade de alimentação do arame (m/min) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

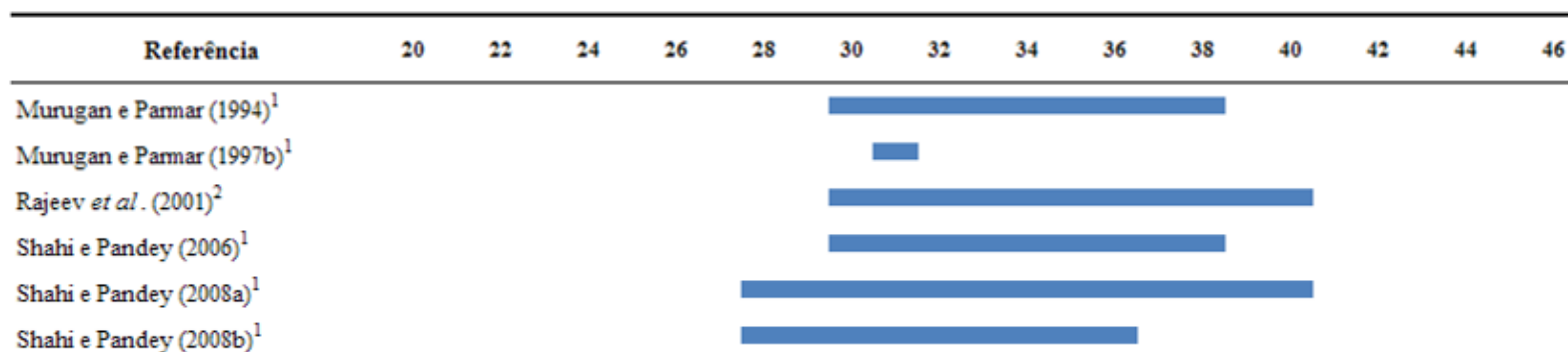


Tabela 2.5 – Faixas de tensão (V) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

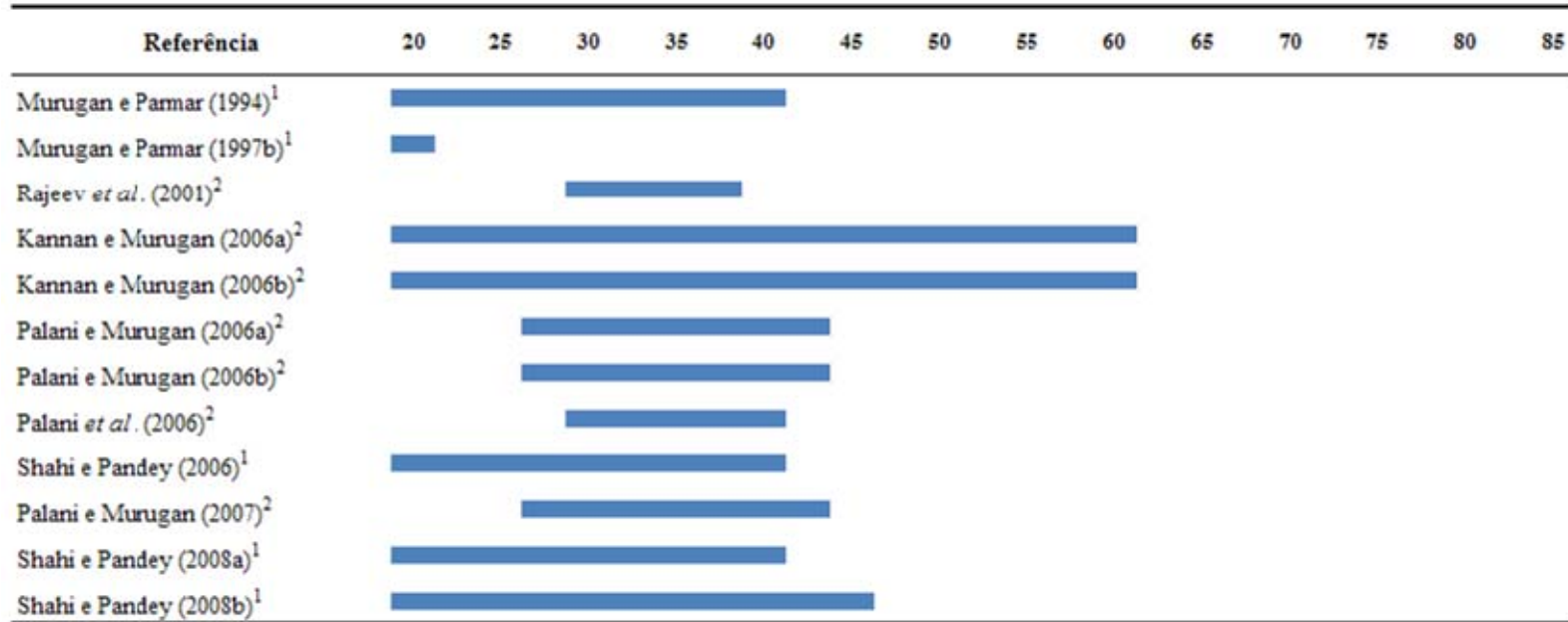


Tabela 2.6 – Faixas de velocidade de soldagem (cm/min) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

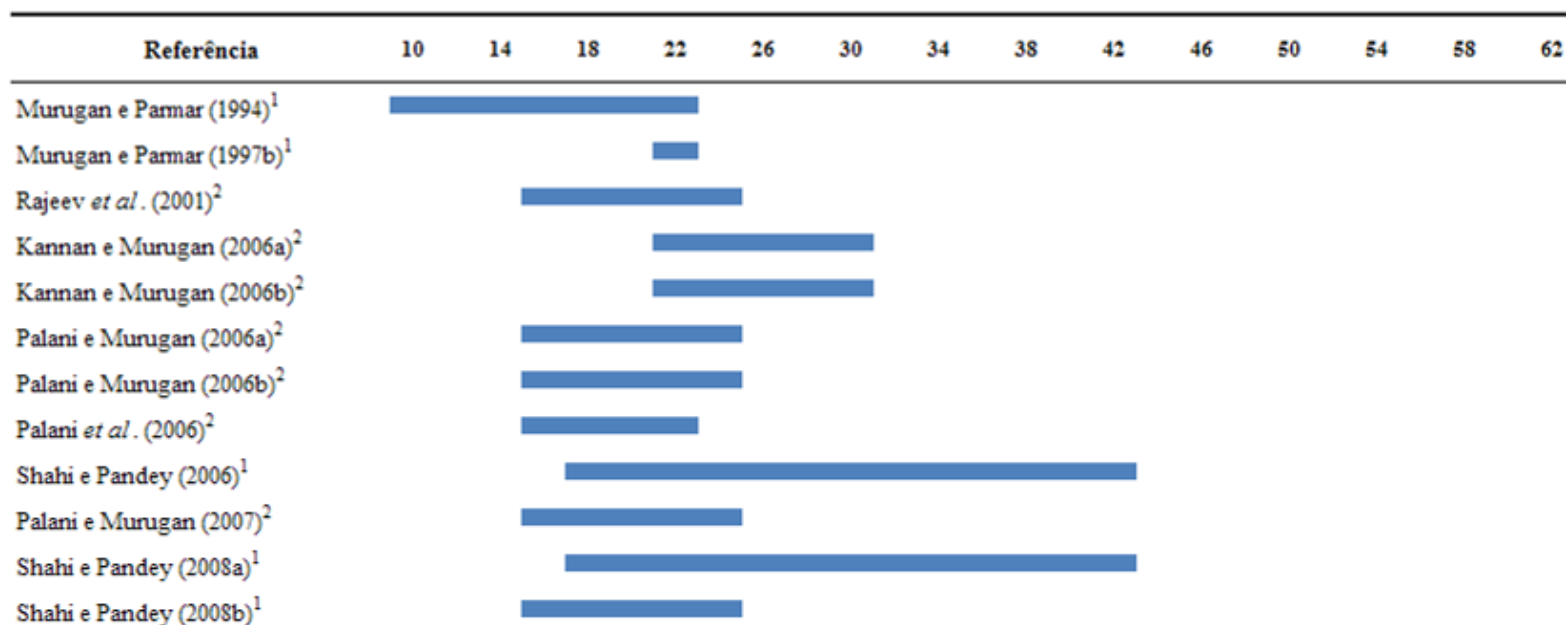


Tabela 2.7 – Faixas de distância bico de contato peça (mm) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

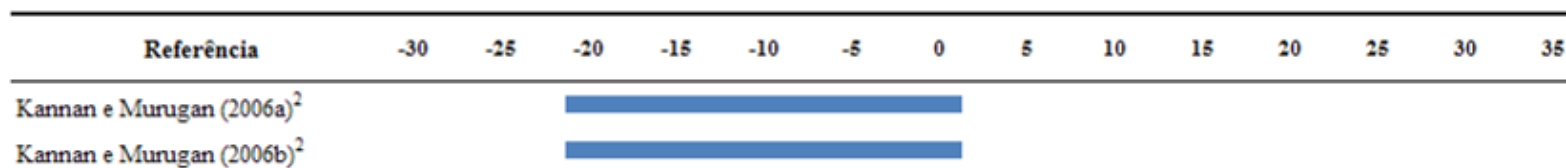


Tabela 2.8 – Faixas de ângulo da tocha (°) utilizadas pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

Referência	Ar	CO ₂	98% Ar + 2% O ₂	95% Ar + 5% CO ₂	80% Ar + 20% CO ₂
Murugan e Parmar (1994) ¹	*				
Murugan e Parmar (1997b) ¹	*				
Ghosh <i>et al.</i> (1998) ¹	*				
Corrêa <i>et al.</i> (2000) ¹			*		
Rajeev <i>et al.</i> (2001) ²					*
Kannan e Murugan (2006a) ²		*			
Kannan e Murugan (2006b) ²		*			
Palani e Murugan (2006a) ²				*	
Palani e Murugan (2006b) ²				*	
Palani <i>et al.</i> (2006) ²				*	
Shahi e Pandey (2006) ¹	*				
Palani e Murugan (2007) ²				*	
Shahi e Pandey (2008a) ¹	*				
Shahi e Pandey (2008b) ¹	*				

Tabela 2.9 – Tipos de gases de proteção utilizados pelas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

2.5.5. Classificação dos trabalhos quanto às respostas analisadas

A análise das pesquisas anteriores considerando as respostas analisadas teve o objetivo de identificar como os diversos pesquisadores têm focado sobre as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis empregando a soldagem MIG/MAG ou com arame tubular. Dessa forma, a **Tabela 2.10** relaciona as pesquisas anteriores com as respostas analisadas, sendo estas divididas em três categorias: características geométricas, respostas de produtividade e propriedades finais dos revestimentos. As características geométricas envolvem penetração, reforço, largura do cordão e diluição; as respostas de produtividade são a taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento do processo; as propriedades do revestimento compreendem a dureza, composição química, microestrutura e resistência à corrosão.

Observando a **Tabela 2.10**, pode-se afirmar que o estudo sobre o processo de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se divide entre a análise das características geométricas e a análise das propriedades finais dos cordões de revestimento.

Considerando que a principal diferença entre a soldagem de revestimento e as aplicações convencionais de soldagem diz respeito à geometria do cordão de solda, alguns autores como Murugan e Parmar (1994), Kannan e Murugan (2006a) e Palani e Murugan (2006a) têm se dedicado ao estudo da penetração, reforço, largura do cordão e diluição nos

processos de revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis. Entre os principais objetivos, esses trabalhos buscam compreender das relações entre os parâmetros de soldagem e a geometria estudada, visando estabelecer um melhor controle do processo. Como métodos de análise, tais autores têm se baseado no uso de ferramentas estatísticas aprimoradas, como o Projeto e Análise de Experimentos e algumas técnicas tradicionais de otimização.

Referência	P	R	W	D	TF	TD	%	H	Q	M	C
Murugan e Parmar (1994) ¹	*	*	*	*							
Murugan e Parmar (1997b) ¹				*				*	*	*	
Ghosh <i>et al.</i> (1998) ¹	*	*		*				*	*	*	
Corrêa <i>et al.</i> (2000) ¹					*	*	*				
Rajeev <i>et al.</i> (2001) ²				*				*	*	*	
Kannan e Murugan (2006a) ²	*	*	*	*							
Kannan e Murugan (2006b) ²				*						*	
Palani e Murugan (2006a) ²	*	*	*	*							
Palani e Murugan (2006b) ²	*	*	*	*							
Palani <i>et al.</i> (2006) ²	*	*	*	*							
Shahi e Pandey (2006) ¹				*							
Palani e Murugan (2007) ²	*	*	*	*							
Shahi e Pandey (2008a) ¹				*		*			*	*	*
Shahi e Pandey (2008b) ¹				*							

P – Penetração (mm); R – Reforço (mm); W – Largura do cordão (mm); D – Diluição (%);
 TF – Taxa de fusão (kg/h); TD – Taxa de deposição (kg/h); % - Rendimento (%); H – Dureza (HV);
 Q – Composição química; M - Microestrutura; C - Resistência à corrosão

Tabela 2.10 – Respostas analisadas nas pesquisas anteriores abordando a soldagem MIG/MAG¹ ou com arame tubular² para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

Por outro lado, o estudo das propriedades finais dos revestimentos como a dureza, a composição química, a microestrutura e a resistência à corrosão tem sido o foco de pesquisas como as de Murugan e Parmar (1997b), Ghosh *et al.* (1998) e Shahi e Pandey (2008a). Dentro desta abordagem, o principal objetivo tem sido o de investigar se o procedimento de soldagem empregado é capaz de produzir revestimentos com as especificações necessárias para suportar condições de desgaste por corrosão. Se considerarmos os demais trabalhos, ou seja, aqueles que utilizaram outros processos de soldagem além do MIG/MAG ou com arame tubular, observa-se que boa parte das publicações anteriores relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis foram desenvolvidas com esta proposta. Portanto,

diferentes formas de análise das propriedades finais dos revestimentos podem ser observadas em Li *et al.* (1996a, 1996b), Anjos *et al.* (1997), Sha e Tsai (2001), Majumdar *et al.* (2005), Ferriere *et al.* (2006) e Song *et al.* (2006). As principais ferramentas utilizadas por esses pesquisadores se resumem à análise metalográfica, testes de dureza, testes de resistência à corrosão e análise de composição química.

Quanto à produtividade do processo, a **Tabela 2.10** indica que poucos trabalhos têm se preocupado com a análise das respostas relacionadas a esta categoria (CORRÊA *et al.*, 2000; SHAHI e PANDEY, 2008a). Portanto, dado que os atuais ambientes industriais são cada vez mais exigentes com relação a processos eficientes e econômicos, a inclusão das respostas de produtividade ao estudo da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se caracteriza como um fator ainda escasso na literatura.

Por fim, a **Tabela 2.10** também mostra que treze das quatorze publicações consideradas se preocuparam com a análise da diluição. Assim, a diluição se mostra como uma das principais respostas para a obtenção da qualidade final dos revestimentos anti-corrosivos, confirmando o que foi discutido no item 2.3.2.

2.6. Projeto e Análise de Experimentos

Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes em que mudanças propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema com o objetivo de observar e identificar a forma como as respostas desse sistema são afetadas em função das mudanças provocadas nas variáveis de entrada. Assim, a experimentação, segundo Montgomery (2005), se caracteriza como uma parte fundamental para o método científico na análise das diversas aplicações de engenharia.

O Projeto e Análise de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*), de acordo com o mesmo autor, é então definido como o processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Dessa forma, qualquer problema experimental deve ser sustentado por dois elementos: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos dados.

As técnicas do Projeto e Análise de Experimentos têm encontrado uma ampla aplicação em diversas áreas de conhecimento, se mostrando como um conjunto de ferramentas importantes para o desenvolvimento de produtos e processos. Os principais benefícios alcançados com o emprego das técnicas do DOE podem ser resumidos a:

- Melhoria do rendimento dos processos;
- Redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais;
- Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
- Redução de custos.

Os três princípios básicos do Projeto de Experimentos, segundo Montgomery (2005), são a aleatorização, a replicação e a blocagem. A aleatorização consiste na execução dos experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação. A replicação é a repetição de um mesmo teste várias vezes, criando uma variação para a variável de resposta utilizada para avaliação do erro experimental. A blocagem deve ser utilizada quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais. Esta técnica permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados.

O emprego da abordagem estatística no Projeto e Análise de Experimentos necessita que as pessoas envolvidas nos experimentos tenham uma idéia clara a respeito do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e de um entendimento básico das ferramentas de análise utilizadas. Assim, Montgomery (2005) propõe que o emprego do Projeto e Análise de Experimentos deve considerar as seguintes etapas:

1. Definição do problema;
2. Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho;
3. Seleção das variáveis de resposta;
4. Escolha do projeto experimental;
5. Execução dos experimentos;
6. Análise estatística dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

Com relação aos projetos experimentais, tem-se que técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta. Dessa forma, a **Tabela 2.11**, apresentada por Nilo Júnior (2003), reúne as principais características relacionadas a cada uma dessas técnicas experimentais.

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis	Processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo
Fatorial Fracionado $2^{(k-p)}$	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas	Não promove a varredura completa da região experimental	Processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada Corridas que demandam maior tempo ou custo
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos	Fornece uma idéia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão

Tabela 2.11 – Características fundamentais das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (Adaptado de NILO JÚNIOR, 2003)

Entre os projetos experimentais anteriores, o presente trabalho utilizou a Metodologia de Superfície de Resposta, já que este estudo se propõe à otimização da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. Sendo assim, os principais conceitos que fundamentam a Metodologia de Superfície de Resposta são discutidos com maiores detalhes no item seguinte.

2.7. Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), segundo Montgomery (2005), é uma coleção de ferramentas matemáticas e estatísticas utilizada para a modelagem e análise de problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é a otimização desta resposta.

Para a maioria dos problemas, verifica-se que as relações entre a resposta e as variáveis independentes são desconhecidas. Assim, o primeiro passo consiste em encontrar uma aproximação adequada para representar a resposta de interesse em função das variáveis do processo. Geralmente, funções polinomiais são empregadas para a descrição de tais relações. Dessa forma, se a resposta for bem modelada por uma função linear, a relação aproximada pode ser representada pelo seguinte modelo de primeira ordem:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

onde: y – Resposta de interesse
 x_i – Variáveis independentes
 β_i – Coeficientes a serem estimados
 k – Número de variáveis independentes
 ε – Erro experimental

Se o sistema apresentar curvatura, então um polinômio de maior grau deve ser usado, como o modelo de segunda ordem descrito pela Eq. (2):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Quase todos os problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os modelos acima. Além disso, é improvável que o modelo polinomial se comporte como uma aproximação adequada para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes. Entretanto, para uma região específica, tais modelos tem se mostrado eficientes.

Para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das Eqs. (1) e (2), o algoritmo tipicamente usado é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares* – *OLS*). Com isso, fica construída a função aproximada que relaciona a resposta de

interesse com as variáveis do processo. Após a construção do modelo, a significância do mesmo é verificada através de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância). Este teste de significância é importante para avaliar se o modelo é estatisticamente significativo. Além disso, o ANOVA também permite verificar quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos. O ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o R^2 ajustado (R^2 (adj.)), que considera o fato de que R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Uma visão mais detalhada envolvendo o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, Análise de Variância e ajuste dos modelos pode ser observada em Paiva (2006), juntamente com outras análises importantes como a análise de resíduos e o teste de falta de ajuste (*Lack-of-fit*).

O arranjo experimental mais utilizado para a coleta de dados na Metodologia de Superfícies de Resposta é o arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*). Outro arranjo que também pode ser utilizado é o arranjo de Box-Behnken, porém pouco aplicado em comparação ao emprego do CCD.

Um arranjo composto central para k fatores é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo (2^k) ou fracionado (2^{k-p} , p a fração desejada do experimento), um conjunto de pontos centrais (m) e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados pontos axiais ($2k$) (**Figura 2.13**). O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. Em função da localização dos pontos axiais, o CCD pode ser circunscrito, inscrito ou de face centrada.

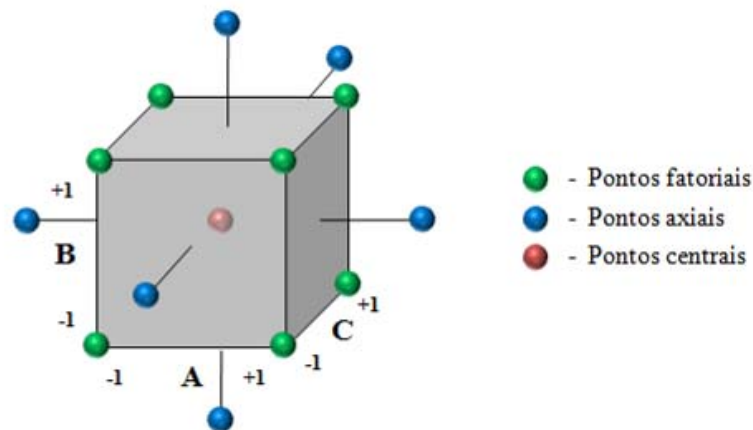


Figura 2.13 – Arranjo composto central para três fatores

O arranjo composto circunscrito (CCC) corresponde ao CCD original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância α dos pontos centrais, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator. O arranjo inscrito (CCI) é adequado para situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis. O arranjo de face centrada (CCF) caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja, $\alpha = +1$ ou -1 . Requer três níveis para cada fator.

Um CCC explora o maior espaço experimental possível, enquanto um CCI explora o menor. O valor de α depende do número de experimentos da porção fatorial do CCD. Assim, segundo Box e Drapper (1987), $\alpha = (2^k)^{1/4}$, sendo k o número de fatores analisados.

Como uma das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta tem sido utilizada com frequência por vários pesquisadores, contribuindo para a otimização e para um melhor entendimento acerca dos fenômenos que caracterizam os mais diversos processos de fabricação. Sendo assim, casos de sucesso no emprego desta metodologia podem ser observados em Nilo Júnior (2003), Correia *et al.* (2005), Palani e Murugan (2007), Rodrigues *et al.* (2008), Balasubramanian *et al.* (2009a) e Lakshminarayanan e Balasubramanian (2009).

2.8. Erro Quadrático Médio Multivariado

A otimização dos processos de fabricação geralmente considera um grande número de características, sendo algumas desejáveis e outras exigíveis. Assim, o desafio dos métodos de otimização consiste em proporcionar um equacionamento matemático capaz de determinar soluções que atendam a todas, ou à maioria dessas características. Essas preocupações têm feito com que os métodos tradicionais utilizassem duas estratégias: (a) a priorização das funções objetivo e b) a aglutinação das funções objetivo (BUSACCA *et al.*, 2001; OZEL e KARPAT, 2005).

Na priorização, o que ocorre é a eleição de uma resposta mais importante em relação às demais. Dessa forma, essa característica é escolhida como função objetivo, enquanto que as demais são alocadas como restrições. O atendimento de todas as restrições faz com que a resposta ótima conduza a soluções que atendam a todos os objetivos. A estratégia de aglutinação faz com que as diversas funções objetivo sejam combinadas em uma única

função, que passa a ser tratada como a função objetivo de otimização global do processo. A otimização desta função global garante que as características individuais sejam também otimizadas. Dentro desta abordagem, métodos como o *desirability* e os índices de capacidade C_p , C_{pk} e C_{pm} podem ser citados como exemplos.

Os métodos tradicionais têm sido bastante úteis para a otimização e melhoria do desempenho dos mais diversos processos e operações, sejam eles univariados ou multivariados. No entanto, para o caso da otimização de problemas multivariados, ou seja, problemas em que se deseja a otimização de múltiplas respostas, os métodos tradicionais não consideram a estrutura de correlação existente entre as respostas. De acordo com Paiva (2008), a existência de correlações entre as várias respostas de interesse exerce uma forte influência sobre as funções de transferência utilizadas para representar as características de qualidade. Considerando que o modelo matemático é de grande importância para a determinação do ponto de ótimo, a negligência da estrutura de correlação pode conduzir a pontos de ótimo inapropriados (KHURI e CONLON, 1981; BRATCHELL, 1989). Esta necessidade vem fazendo com que vários pesquisadores, ao longo dos últimos anos, se preocupassem em oferecer um tratamento mais adequado para este tipo de problema.

Nesse contexto, Paiva (2008) desenvolveu o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), que é uma ferramenta que combina as técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e Análise de Componentes Principais (ACP) para a otimização de problemas multivariados considerando a estrutura de correlação existente entre as respostas. A Análise de Componentes Principais, conforme apresentado por Paiva (2006), é uma técnica estatística multivariada que se dedica à explicação da estrutura de variância-covariância existente entre um conjunto de dados, utilizando combinações lineares das variáveis originais. Seus principais objetivos se resumem à redução da dimensionalidade e à interpretação dos dados. Sendo assim, o fluxograma da **Figura 2.14** apresenta os procedimentos empregados para a otimização baseada no EQMM.

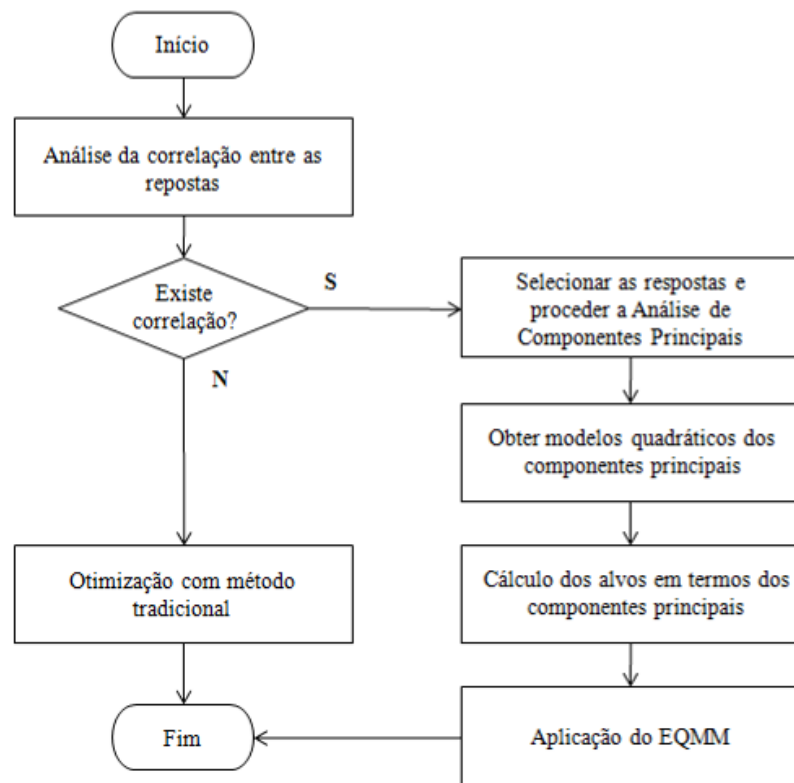


Figura 2.14 – Procedimentos para obtenção do EQMM
(Adaptado de PAIVA, 2008)

Após o cumprimento das etapas definidas pelo fluxograma anterior, a otimização pelo EQMM é obtida a partir da seguinte formulação matemática:

$$\text{Minimizar } EQMM = \left[\prod_{i=1}^n (PC_i - T_{PC_i})^2 + \lambda_{PC_i} \right]^{1/n} \quad (3)$$

$$\text{sujeito a: } x^T x \leq \rho^2 \quad (4)$$

onde: $EQMM$ – Erro Quadrático Médio Multivariado

n – Número de componentes principais utilizados

PC_i – Modelos de superfície de resposta desenvolvidos para os escores dos componentes principais

T_{PC_i} – Alvos em termos dos componentes principais

λ_{PC_i} – Autovalores dos componentes principais

$x^T x \leq \rho^2$ – Restrição do espaço experimental para regiões esféricas (no caso de se utilizar um arranjo CCD), $\rho = \alpha$

Os alvos em termos dos componentes principais são calculados a partir de uma combinação linear entre os autovetores dos componentes principais e os valores padronizados das respostas em relação aos seus alvos. As Eqs. (5) e (6) demonstram este procedimento:

$$T_{PC} = \sum_{j=1}^k c_j \cdot Z(y_j | \zeta_{y_j}) \quad (5)$$

onde: T_{PC} – Alvo em termos do componente principal

k – Número de respostas consideradas

c_j – Coeficientes dos autovetores do componente principal

$Z(y_j | \zeta_{y_j})$ – Valores padronizados das respostas em relação aos alvos, calculados por:

$$Z(y_j | \zeta_{y_j}) = \frac{\zeta_{y_j} - \mu_{y_j}}{\sigma_{y_j}} \quad (6)$$

sendo: ζ_{y_j} – Alvos definidos para as respostas

μ_{y_j} – Média experimental das respostas

σ_{y_j} – Desvio-padrão experimental das respostas

Para a resolução da formulação definida pelas Eqs. (3) e (4), algoritmos de busca como o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o Algoritmo Genético (GA) podem ser utilizados.

2.9. Proposta de ponderação das respostas para o Erro Quadrático Médio Multivariado

A seção anterior mostrou que a principal vantagem do EQMM em relação aos métodos tradicionais de otimização diz respeito ao fato desta ferramenta tratar da otimização de múltiplas respostas considerando a estrutura de correlação existente entre elas. Na medida em que a negligência dessa estrutura de correlação pode conduzir a pontos de ótimo inadequados, o EQMM tem se mostrado como um método eficiente (PAIVA, 2008).

Entretanto, em muitos problemas de otimização, os níveis de importância entre as respostas são diferentes, dado que uma determinada característica pode ser mais importante em relação às demais. Diante dessa consideração, o EQMM se propõe à otimização de

múltiplas respostas correlacionadas atribuindo a elas o mesmo nível de importância. Dessa forma, quando se deseja a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes, a otimização da resposta mais importante pode ser prejudicada em favor da otimização da resposta menos importante, já que o método as considerou com o mesmo peso. Sendo assim, esta seção tem o objetivo de propor uma estratégia de ponderação para o Erro Quadrático Médio Multivariado, dado que esta ferramenta ainda não contempla a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes.

No caso dos métodos tradicionais, a atribuição de pesos às respostas é feita diretamente nas funções objetivo, através da multiplicação das respostas pelas respectivas ponderações. O mesmo procedimento, entretanto, não pode ser atribuído para o Erro Quadrático Médio Multivariado. Considerando que a função objetivo do EQMM, expressa pela Eq. (3), é escrita em função dos componentes principais e que estes se caracterizam como uma combinação linear das respostas a serem otimizadas, a atribuição de pesos diretamente na função objetivo não significa que as respostas estão sendo ponderadas. Essa estratégia fará com que os pesos sejam atribuídos aos componentes principais utilizados, o que não garante a ponderação das respostas de interesse.

Portanto, para o EQMM, propõe-se que a atribuição dos pesos às respostas seja realizada antes da Análise de Componentes Principais e que esta última seja desenvolvida levando em consideração a matriz de variância-covariância. Vale lembrar que o EQMM proposto por Paiva (2008) desenvolve a Análise de Componentes Principais considerando a matriz de correlação. Além disso, é necessário que as respostas sejam padronizadas antes da ponderação, visando à unificação dos dados. A **Figura 2.15** apresenta os procedimentos necessários para a ponderação das respostas no EQMM.

Dessa forma, é realizada inicialmente a padronização das respostas, sendo este procedimento desenvolvido através do seguinte cálculo:

$$Z(y) = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \quad (7)$$

- onde:
- $Z(y)$ – Valores padronizados da resposta
 - y – Valores experimentais obtidos para a resposta
 - μ_y – Média experimental da resposta
 - σ_y – Desvio-padrão experimental da resposta

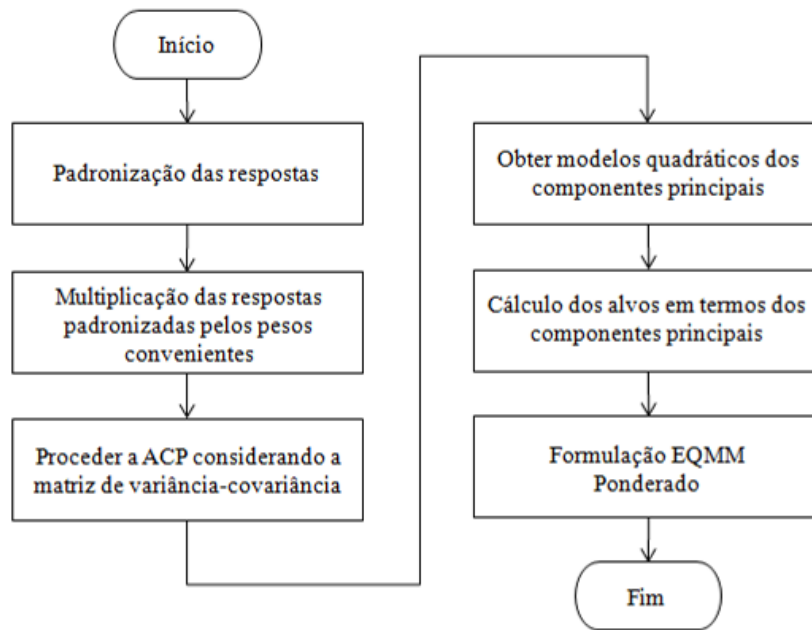


Figura 2.15 – Estratégia de ponderação das respostas proposta para o EQMM

Em seguida, as respostas padronizadas são multiplicadas pelas respectivas ponderações. Várias formas de ponderação podem ser utilizadas. Entre elas, Ch'ng *et al.* (2005) sugerem que os pesos sejam atribuídos de forma que a soma entre eles seja igual a um, ou seja:

$$\sum_{i=1}^k e_i = 1 \quad (8)$$

onde: e_i – Pesos atribuídos para as respostas
 k – Número de respostas consideradas

Após a padronização e ponderação das respostas, procede-se com a Análise de Componentes Principais, de forma que os componentes sejam extraídos levando em consideração a matriz de variância-covariância. Os passos seguintes consistem no desenvolvimento de modelos quadráticos para os componentes principais e cálculo dos alvos em termos dos componentes. Tais procedimentos são idênticos aos realizados pelo EQMM sem ponderação.

Finalmente, chega-se à formulação para o EQMM ponderado. Nesta etapa também é proposta uma modificação para a função objetivo do EQMM, que passa a ser expressa através de um somatório dos EQMMs ao invés do produtório descrito pela Eq. (3). Os componentes principais utilizados são também ponderados considerando as porcentagens de explicação das variáveis oferecidas por eles. Com isso, propõe-se que a otimização de múltiplas respostas

correlacionadas considerando níveis de importância diferentes entre as respostas seja realizada a partir do seguinte equacionamento:

$$\text{Minimizar } EQMM_P = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{\rho_T} \left[(PC_i^* - T_{PC_i}^*)^2 + \lambda_{PC_i}^* \right] \quad (9)$$

$$\text{sujeito a: } x^T x \leq \rho^2 \quad (10)$$

onde: $EQMM_P$ – Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado

n – Número de componentes principais utilizados

ρ_i – Porcentagens de explicação dos componentes principais

$$\rho_T = \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (11)$$

PC_i^* – Modelos de superfície de resposta desenvolvidos para os escores dos componentes principais das respostas ponderadas extraídos da matriz de variância-covariância

$T_{PC_i}^*$ – Alvos em termos dos componentes principais das respostas ponderadas extraídos da matriz de variância-covariância

$\lambda_{PC_i}^*$ – Autovalores dos componentes principais das respostas ponderadas extraídos da matriz de variância-covariância

$x^T x \leq \rho^2$ – Restrição do espaço experimental para regiões esféricas (no caso de se utilizar um arranjo CCD), $\rho = \alpha$

Semelhantemente ao que ocorre no EQMM sem ponderação, a formulação definida pelas Eqs. (9) e (10) pode ser resolvida com o emprego do algoritmo GRG ou do Algoritmo Genético.

2.10. Algoritmo Genético

Os Algoritmos Genéticos, segundo Correia *et al.* (2005), são procedimentos computacionais de busca e otimização baseados no conceito de seleção natural. Busacca *et al.* (2001) o caracterizam como uma técnica de otimização que utiliza uma população de soluções (ou pontos) ao contrário de se utilizar um único ponto, como visto nos métodos gradientes. A solução que melhor atender a função objetivo é aquela que sobreviverá às mutações e combinações. Com isso, os Algoritmos Genéticos operam através de um grupo de indivíduos, geralmente representados por sequências binárias formadas pelos números 0 e 1. Esta

codificação binária é gerada aleatoriamente sobre a região de busca e cada indivíduo se caracteriza como uma possível solução para o problema.

Existem basicamente seis etapas para o processo de otimização utilizando os algoritmos genéticos (BUSACCA *et al.*, 2001, CORREIA *et al.*, 2005):

1º) Decodificação: é o processo de conversão das variáveis de entrada, que estão codificadas como sequências binárias, em números reais. Dessa forma, conforme ilustrado pela **Figura 2.16**, cada cromossomo é dividido em genes. Os genes, representados pelas sequências binárias, constituem os genótipos dos cromossomos. A decodificação das sequências binárias em números reais gera as variáveis de controle ou fatores, que constituem o fenótipo. Quando a função objetivo é avaliada considerando os valores dos fatores, tem-se o *fitness*. Assim, cada cromossomo se caracteriza como uma potencial solução para o problema.

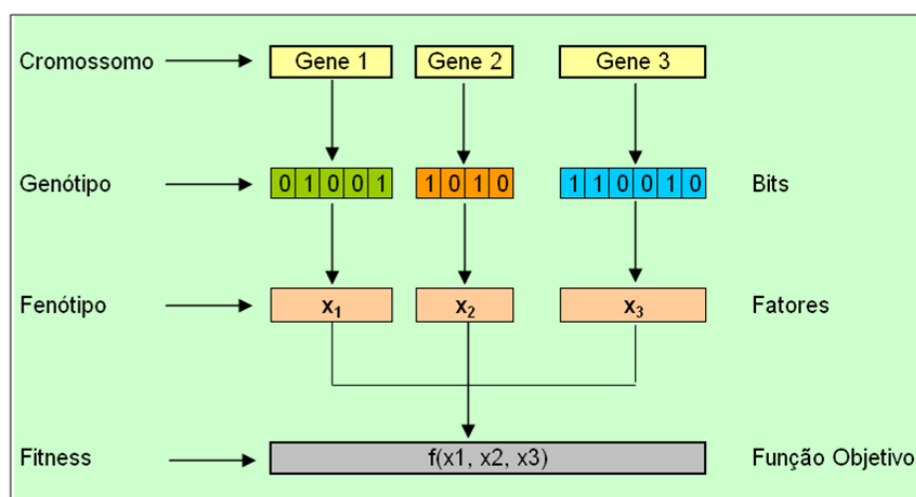


Figura 2.16 – Decodificação do cromossomo em variáveis de controle (Adaptado de BUSACCA *et al.*, 2001)

2º) Criação da população inicial: a criação do grupo inicial de indivíduos é realizada de forma aleatória.

3º) Avaliação dos indivíduos: após a geração da população inicial, os indivíduos são ordenados de acordo com o seu *fitness*. Esta ordem é utilizada para definir quais indivíduos sobrevivem para a próxima geração.

4º) Seleção dos pares de indivíduos (pais): nesta etapa, a soma acumulada dos valores da função *fitness* de cada cromossomo é normalizada para totalizar 1. Em seguida, uma nova população é gerada aleatoriamente seguindo as probabilidades estabelecidas em função das frequências acumuladas. Os indivíduos com os melhores valores da função *fitness* têm

maiores chances de sobrevivência. Após a geração da população temporária, os pares de indivíduos são sorteados aleatoriamente e independentemente dos seus valores de *fitness*.

5º) Crossover: os pares selecionados na etapa anterior são divididos em posições aleatórias e as partes são recombinadas para gerar uma descendência de dois filhos (**Figura 2.17**). Entretanto, o *crossover* não é realizado em todos os pares de cromossomos. Em geral, este rearranjo é feito em uma porção da população de pares de pais, com probabilidade igual ou superior a 60%. Para os pares em que o *crossover* não for realizado, os filhos serão iguais aos pais. Finalmente, os pais são substituídos pelos filhos.

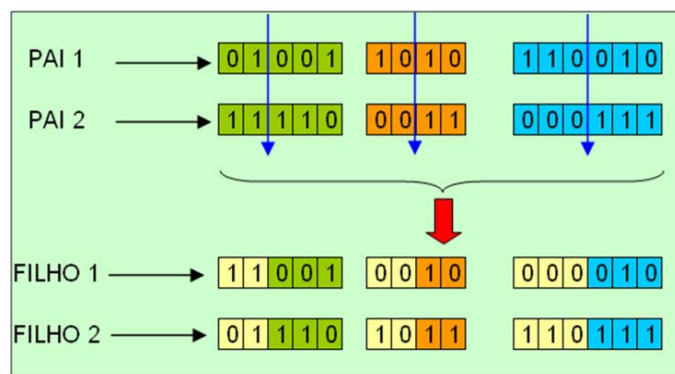


Figura 2.17 – Exemplo de *crossover* (Adaptado de BUSACCA *et al.*, 2001)

6º) Mutação: é a alteração de um bit (0→1 ou 1→0) na população de bits (**Figura 2.18**). A mutação é importante para manter a diversidade da população e reduzir a possibilidade de que o Algoritmo Genético encontre um ponto de ótimo local ao invés de um ponto de ótimo global.

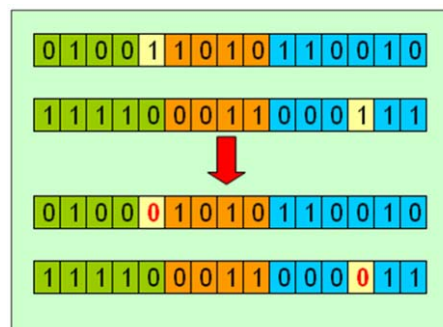


Figura 2.18 – Exemplo de mutação

A **Figura 2.19** apresenta a sequência em que o Algoritmo Genético executa as etapas anteriores na busca por pontos de otimização:

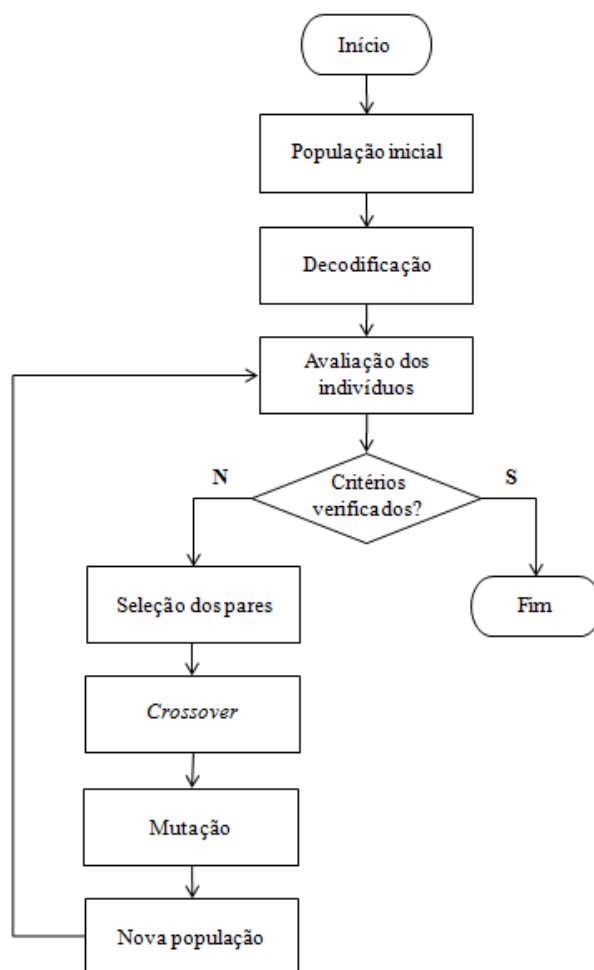


Figura 2.19 – Procedimento de otimização utilizado pelo Algoritmo Genético
(Adaptado de CORREIA *et al.*, 2005)

A sequência de gerações populacionais sucessivas é interrompida quando se atinge um dos seguintes critérios de parada:

- O número de gerações alcança o valor pré-estabelecido;
- O tempo de processamento atinge o valor previsto;
- O *fitness* do indivíduo mais fraco atinge um mínimo pré-estabelecido;
- O *fitness* do indivíduo mais forte atinge um valor desejado.

2.11. Considerações finais

Este capítulo teve o objetivo de apresentar todo o suporte teórico necessário para o desenvolvimento do presente trabalho. Dessa forma, a partir da discussão dos conceitos relacionados à soldagem de revestimentos, foi verificado que este processo se caracteriza

como uma alternativa rápida e econômica quando se deseja a prorrogação da vida útil de peças, a recuperação de componentes desgastados ou à criação de superfícies com propriedades desejadas. Além disso, foi mostrado que a principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem corresponde ao perfil geométrico do cordão de solda, o que faz do ajuste adequado do procedimento de soldagem um fator de fundamental importância para a qualidade final dos revestimentos. Entre as aplicações da soldagem de revestimento, o presente trabalho se dedicou à deposição de camadas de revestimento para a obtenção de superfícies resistentes à corrosão. Nesse contexto, foi definida a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, mostrando que a grande vantagem desta operação consiste na deposição de camadas anti-corrosivas a partir de materiais de baixo custo, dado que os componentes de aços inoxidáveis apresentam custos elevados. Entretanto, além do perfil geométrico desejado, a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis também deve se preocupar com o controle da diluição entre o metal base e o metal de adição, para que as propriedades da camada protetora não sejam prejudicadas. Em seguida, os fundamentos da soldagem com arame tubular foram apresentados, caracterizando este como um processo de elevada produtividade e qualidade do material soldado. Considerando que este trabalho se propõe à otimização da geometria e da produtividade da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, obtendo níveis mínimos de qualidade superficial, fica justificada a escolha da soldagem com arame tubular como o processo de soldagem empregado.

A análise das pesquisas anteriores relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis mostrou que o interesse industrial e acadêmico pelo processo vem crescendo nos últimos anos, caracterizando este como um tema de pesquisa atual e de relevância científica. Foi também verificado que vários processos de soldagem podem ser utilizados para a deposição de aços inoxidáveis sobre superfícies de aços carbono. Considerando as pesquisas que empregaram a soldagem com arame tubular ou MIG/MAG, observou-se que a análise da geometria dos cordões juntamente com variáveis de produtividade é ainda um elemento escasso na literatura. Assim, identifica-se aqui a primeira lacuna com que o presente trabalho se propõe a contribuir. Além disso, a análise das respostas consideradas pelos trabalhos anteriores confirmou a importância da diluição para a qualidade final dos revestimentos anti-corrosivos. Com relação aos parâmetros do processo de soldagem com arame tubular ou MIG/MAG, a corrente, a velocidade de soldagem e a distância bico de contato peça foram caracterizados como variáveis importantes, já que foram consideradas

pela maioria dos trabalhos. Por fim, a interação entre os parâmetros foi identificada como um fator também significativo, de modo que sua análise não pode ser negligenciada.

Quanto às ferramentas de análise e otimização, foram apresentados os conceitos que envolvem o Projeto e Análise de Experimentos, caracterizando esta como uma importante técnica para o estudo científico dos problemas de engenharia. Entre os seus projetos experimentais, foi discutida a Metodologia de Superfície de Resposta, que é um conjunto de ferramentas indicado para a otimização de problemas e, portanto, é o projeto experimental utilizado neste trabalho. Em seguida, foi apresentado o EQMM como método de otimização, mostrando que sua principal vantagem em relação aos métodos tradicionais diz respeito ao fato deste tratar da otimização de múltiplas respostas considerando a estrutura de correlação entre elas. No entanto, o EQMM considera as respostas com o mesmo nível de importância. Sendo assim, foi proposta uma estratégia de ponderação das respostas para o EQMM, visando contribuir para o aprimoramento do método quanto à otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes. Finalmente, foram apresentados os conceitos relacionados ao Algoritmo Genético, que é o algoritmo utilizado neste trabalho para a solução das formulações do EQMM. A escolha por este algoritmo de busca se justifica pelo fato deste ser um algoritmo de otimização global, ao contrário dos métodos gradientes, que podem estacionar em pontos de ótimos locais.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Considerações iniciais

A partir dos conceitos apresentados no capítulo anterior, este capítulo tem o objetivo de descrever o método experimental utilizado neste trabalho. A definição do método de pesquisa a ser seguido é importante para que o processo estudado seja tratado de forma sistemática, contribuindo para a obtenção de informações objetivas e de relevância científica. Sendo assim, inicia-se com uma reafirmação do problema de pesquisa para, em seguida, ocorrer a definição do método experimental.

3.2. Problema de pesquisa

Conforme apresentado pelo Capítulo 1, o presente trabalho tem como principal objetivo a otimização do processo de soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L. Busca-se identificar a combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização das características geométricas do cordão de revestimento e da produtividade do processo, garantido, ao mesmo tempo, níveis mínimos de qualidade. Dessa forma, considerando a geometria do cordão de revestimento, deseja-se a:

- Maximização da largura do cordão;
- Maximização do reforço;
- Minimização da penetração;
- Minimização da diluição.

Para a produtividade do processo, busca-se a:

- Maximização da taxa de deposição;
- Maximização do rendimento.

Quanto à qualidade superficial dos revestimentos, deseja-se que os cordões sejam otimizados considerando as seguintes condições:

- Ocorrência nula de defeitos;
- Pequenas falhas quanto ao recobrimento da escória.

A descrição do objeto de estudo anterior o caracteriza como um problema complexo de otimização, na medida em que se deseja a otimização de múltiplas respostas e considerando que o processo de soldagem empregado é governado por múltiplos parâmetros de entrada (*Figura 3.1*). Portanto, uma abordagem científica para este tipo de problema se torna importante para que as ferramentas de análise sejam corretamente definidas, permitindo que os resultados alcançados sejam coerentes e significativos.

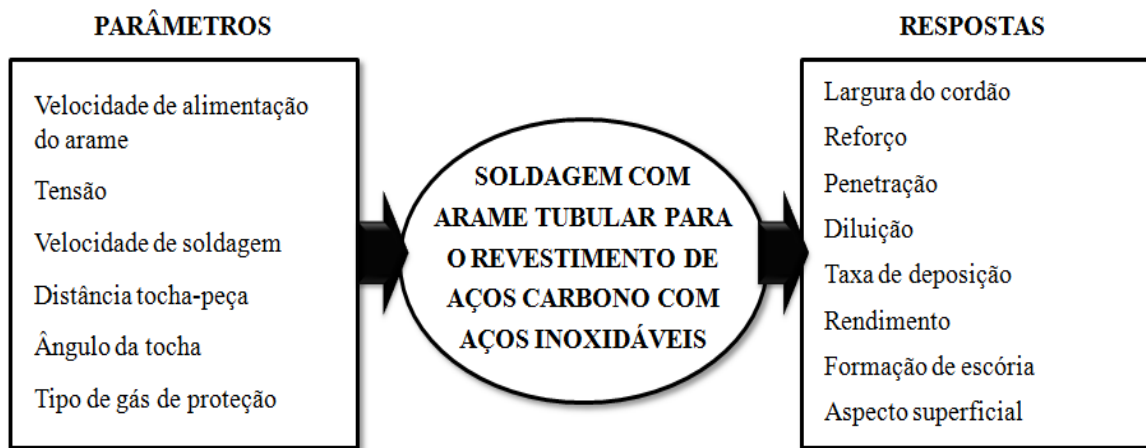


Figura 3.1 – Esquemática do objeto de estudo

3.3. Método experimental

Para a otimização do objeto de estudo descrito anteriormente, o presente trabalho utilizou, como método de pesquisa, a experimentação. Assim, entre as técnicas de experimentação, foi empregado o Projeto e Análise de Experimentos, definido no item 2.6 como o processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2005). Considerando os projetos experimentais do DOE, foi utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta, que se caracteriza como um conjunto de ferramentas indicado para a otimização de processos, além de permitir um amplo conhecimento a respeito do fenômeno estudado. Por fim, para a otimização propriamente dita, foi empregado o Erro Quadrático Médio Multivariado (PAIVA, 2008), dado que o objeto de estudo apresenta múltiplas respostas com provável existência de correlação entre elas. Com isso, o método experimental pode ser dividido em duas fases:

1ª Fase – Metodologia de Superfície de Resposta: utilizada para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados, modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros.

2ª Fase – Otimização EQMM: utilizada para obter a combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização dos resultados do processo.

As *Figuras 3.2 e 3.3* apresentam as etapas seguidas em cada fase do método experimental.

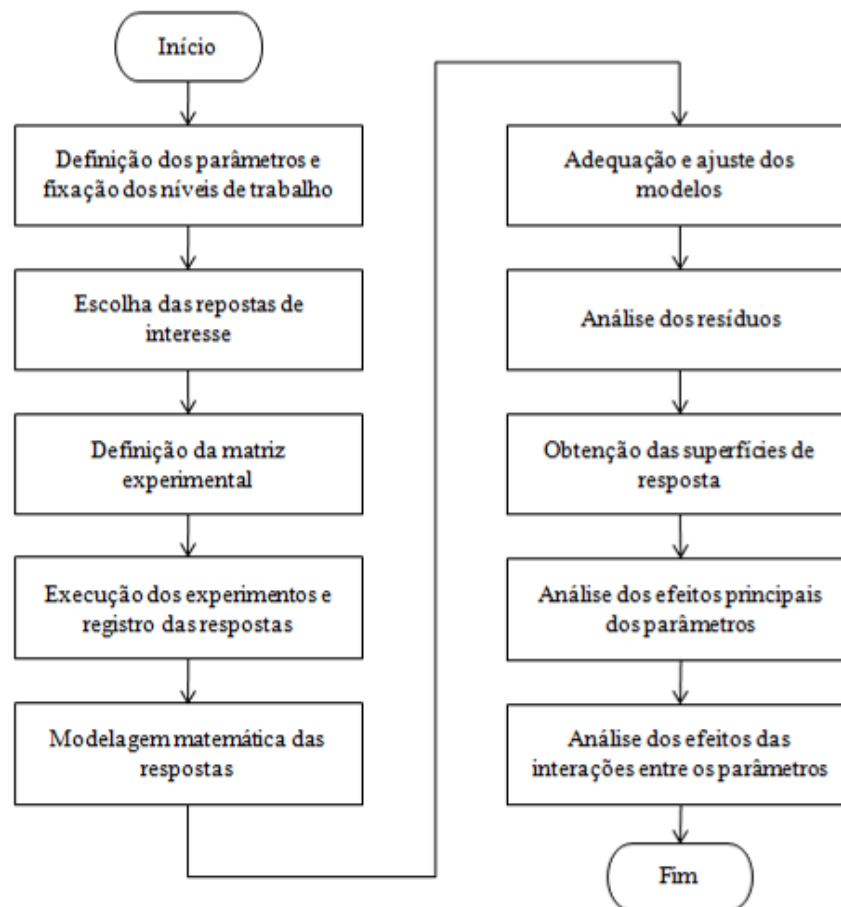


Figura 3.2 – Método experimental – Fase 1: Metodologia de Superfície de Resposta

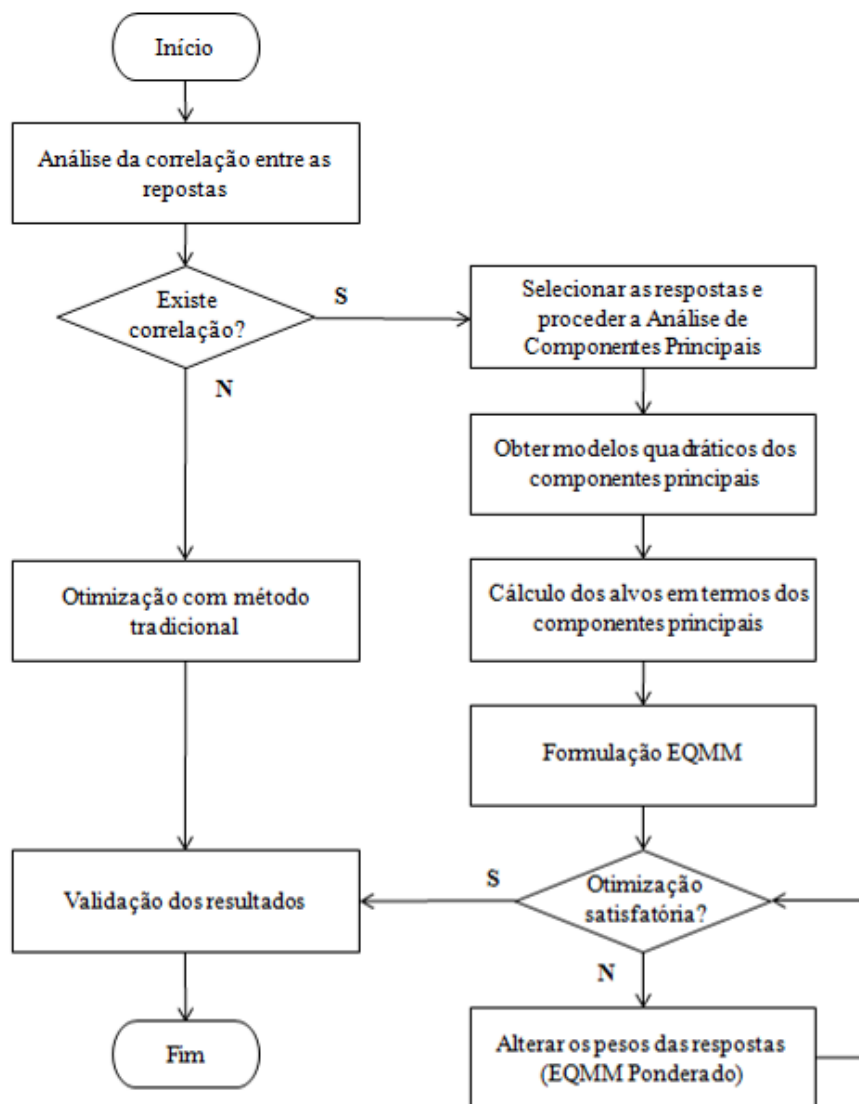


Figura 3.3 – Método experimental – Fase 2: Otimização EQMM

3.4. Considerações finais

Neste breve capítulo foi apresentado o método experimental utilizado para que os objetivos definidos para o presente trabalho pudessem ser alcançados. Considerando que o objeto de estudo foi considerado como um problema de otimização complexo, já que envolve múltiplos parâmetros de entrada e múltiplas variáveis de resposta, o método experimental ficou dividido em duas fases: a Metodologia de Superfície de Resposta e a otimização EQMM. As etapas seguidas para a condução de cada fase foram também definidas através dos fluxogramas apresentados.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL

4.1. Considerações iniciais

O Capítulo 4 descreve a aplicação do método experimental definido no capítulo anterior para se obter a otimização do processo de soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. Dessa forma, as etapas definidas em cada fase do método experimental são desenvolvidas no presente capítulo, juntamente com a apresentação e discussão dos resultados obtidos ao longo do estudo.

4.2. Metodologia de Superfície de Resposta

4.2.1. Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho

Conforme apresentado nas seções anteriores, os principais parâmetros de entrada do processo de soldagem com arame tubular compreendem a velocidade de alimentação do arame (corrente), tensão, velocidade de soldagem, distância bico de contato peça, ângulo da tocha e tipo de gás de proteção. Entre essas variáveis, Wainer *et al.* (1992) e Rodrigues (2005) sugerem que ângulos da tocha na posição “empurrando” são mais indicados quando se deseja menores penetrações e maiores larguras do cordão. Quanto ao tipo de gás de proteção, dados do fabricante mostram que para o tipo de metal de adição utilizado (arame tubular de aço inoxidável ABNT 316L), dois tipos de gases são empregados: o CO₂ ou a mistura de 75% Ar + 25% CO₂, chamada C₂₅ (ESAB, 2008). Desses dois últimos, o CO₂ é utilizado quando se deseja o aumento da penetração (FORTES, 2004). Diante dessas constatações, decidiu-se tratar o tipo de gás de proteção e o ângulo da tocha como parâmetros fixos. O C₂₅ foi escolhido como gás de proteção e o ângulo da tocha foi fixado em 15° na posição empurrando. Portanto, os demais parâmetros foram analisados neste trabalho, sendo eles a velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça.

A fixação dos níveis de trabalho foi feita através da análise das pesquisas anteriores e da execução de testes preliminares. Inicialmente os parâmetros foram pré-fixados baseando-se nos dados apresentados pelas **Tabelas 2.4 – 2.7**. Em seguida, testes preliminares foram realizados para verificar se o processo ocorria nas condições extremas de cada variável. Finalmente, após alguns ajustes, chegou-se aos limites finais para as faixas de trabalho de

cada parâmetro. A **Tabela 4.1** apresenta os parâmetros analisados juntamente com níveis de trabalho.

Parâmetros	Unidade	Notação	Níveis de trabalho				
			-2	-1	0	+1	+2
Velocidade de alimentação do arame	m/min	Va	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5
Tensão	V	T	24,5	27,0	29,5	32,0	34,5
Velocidade de soldagem	cm/min	Vs	20	30	40	50	60
Distância bico de contato peça	mm	N	10	15	20	25	30

Tabela 4.1 – Parâmetros variáveis e níveis de trabalho

Quanto às outras variáveis que também compõem a soldagem com arame tubular, estas foram tratadas como parâmetros fixos, conforme indica a **Tabela 4.2**. A **Tabela 4.3** apresenta a composição química dos materiais utilizados.

Parâmetro	Valor/tipo adotado
Material do metal base	Aço carbono ABNT 1020
Material do metal de adição	Aço inoxidável E316LT1-1/4
Espessura do metal base	6,35 mm
Diâmetro do eletrodo	1,2 mm
Tipo do eletrodo	Arame tubular
Posição de soldagem	Posição plana
Ângulo da tocha	15° (empurrando)
Recuo do bico de contato	5 mm
Tipo do gás de proteção	C ₂₅
Vazão do gás de proteção	16 l/min

Tabela 4.2 – Parâmetros fixos

Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
Aço inoxidável E316LT1-1/4	0,03	1,58	-	-	1,00	12,4	18,5	2,46
Aço carbono ABNT 1020	0,18/0,23	0,30/0,60	0,04	0,05	-	-	-	-

Tabela 4.3 - Composição química (%) do metal base e metal de adição

4.2.2. Escolha das respostas de interesse

As respostas analisadas compreendem a largura do cordão (W), penetração (P), reforço (R) e diluição (D), que representam as características geométricas do cordão de revestimento.

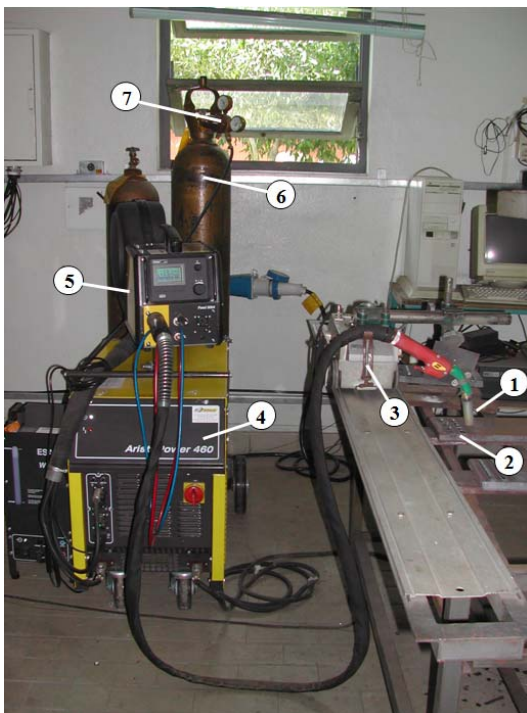
As respostas de produtividade são a taxa de deposição (TD) e o rendimento do processo (η). Para a qualidade superficial, foram consideradas a formação de escória (E) e o aspecto superficial (S).

4.2.3. Definição da matriz experimental

A matriz experimental adotada foi o arranjo composto central (CCD), contendo quatro fatores em dois níveis ($2^k = 2^4 = 16$), oito pontos axiais ($2k = 2 \cdot 4 = 8$), sete pontos centrais e 1 replicação, totalizando 31 experimentos. O valor adotado para α foi 2,0.

4.2.4. Execução dos experimentos e registro das respostas

A execução dos experimentos foi realizada no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Itajubá, utilizando como equipamentos uma fonte ESAB AristoPower 460, um módulo AristoFeed 30-4W MA6 para a alimentação do arame e um banco de testes com dispositivo para controle da velocidade de soldagem e ajuste da tocha em relação ao metal base (*Figura 4.1*).



1. Tocha
2. Corpo de prova
3. Dispositivo para condução da tocha
4. Fonte ESAB AristoPower 460
5. Alimentador AristoFeed 30-4W MA6
6. Cilindro de gás de proteção
7. Medidor de vazão do gás de proteção

Figura 4.1 – Equipamentos utilizados

Com isso, os experimentos foram realizados através da simples deposição de um cordão de aço inoxidável sobre os corpos de prova de aço carbono, cortados em chapas de dimensões 120 x 60 x 6,35 mm. Quanto aos parâmetros do processo, foram considerados os parâmetros

fixos definidos pela **Tabela 4.2** e os parâmetros variáveis foram combinados de acordo com a matriz experimental (**Tabela 4.4**). Em função da dificuldade no ajuste da distância bico de contato peça, optou-se pela realização dos experimentos na ordem padrão de execução.

O registro das respostas foi realizado na seguinte sequência: (1) avaliação das características de qualidade, (2) cálculo das respostas de produtividade e (3) medição da geometria do cordão.

4.2.4.1. Registro das respostas de qualidade

As características de qualidade foram avaliadas através de notas atribuídas pelos pesquisadores envolvidos nos experimentos. Assim, para a formação de escória, a atribuição das notas variou de 1 a 5, baseando-se nos seguintes critérios:

- **Nota 5:** boa formação de escória, com total recobrimento sobre o cordão de solda;
- **Nota 4:** formação de escória apresentando pequenas falhas de recobrimento;
- **Nota 3:** formação de escória com algumas áreas não recobertas;
- **Nota 2:** formação de escória com grandes falhas de recobrimento;
- **Nota 1:** formação de escória ruim, com aspecto irregular e cheio de defeitos.

O aspecto superficial dos cordões foi avaliado após a remoção da escória. Para esta avaliação, os critérios adotados tiveram uma amplitude de 1 a 10, sendo:

- **Nota 10:** cordão isento de defeitos e com aspecto superficial liso;
- **Nota 9:** cordão isento de defeitos e com aspecto superficial parcialmente liso e parcialmente rugoso;
- **Nota 8:** cordão isento de defeitos e com aspecto superficial rugoso;
- **Nota 7:** cordão com pouca ocorrência de defeitos (1 a 3) e aspecto superficial liso;
- **Nota 6:** cordão com pouca ocorrência de defeitos (1 a 3) e aspecto superficial rugoso;
- **Nota 5:** cordão com média ocorrência de defeitos (4 a 6) e aspecto superficial liso;
- **Nota 4:** cordão com média ocorrência de defeitos (4 a 6) e aspecto superficial rugoso;
- **Nota 2 – 3:** cordão com grande ocorrência de defeitos (acima de 6);
- **Nota 1:** cordão totalmente defeituoso

As **Figuras 4.2 e 4.3** apresentam alguns exemplos da avaliação das características de qualidade dos cordões revestimentos.

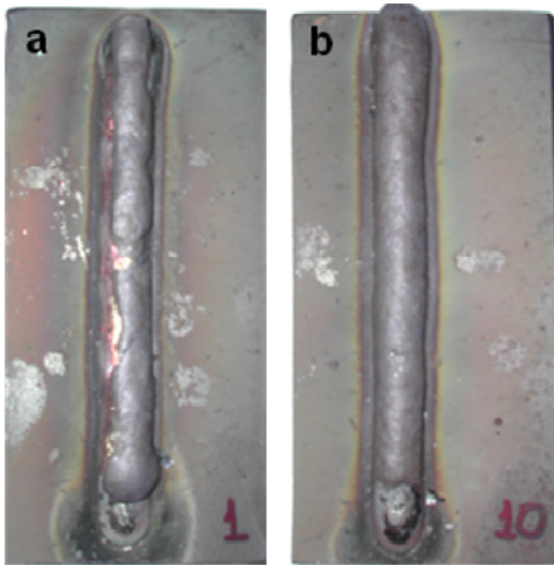


Figura 4.2 – Avaliação da formação de escória: (a) Nota 3; (b) Nota 5

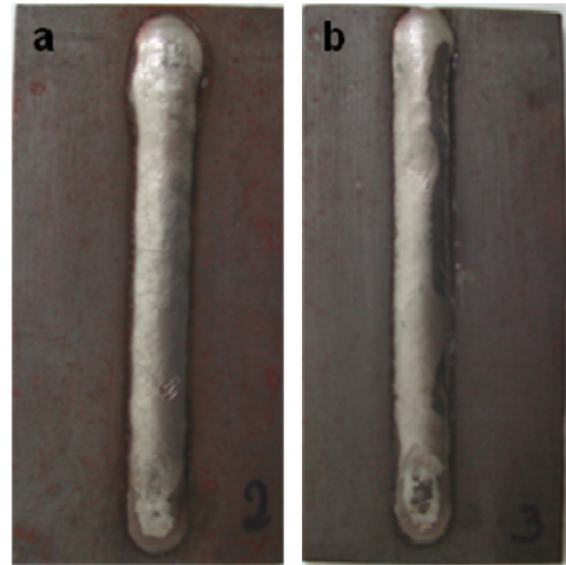


Figura 4.3 – Avaliação do aspecto superficial: (a) Nota 6; (b) Nota 10

4.2.4.2. Registro das respostas de produtividade

Para a medição das respostas de produtividade, as chapas de aço carbono foram pesadas antes e após a deposição dos cordões e o tempo de soldagem foi cronometrado. Com isso, a taxa de fusão, a taxa de deposição e o rendimento do processo foram calculados através das seguintes expressões:

$$TF = \frac{l_a \cdot d_a \cdot 3,6}{t_s} \quad (12)$$

onde: TF – Taxa de fusão [kg/h]

l_a – Comprimento do arame consumido, calculado por: $l_a = \frac{Va \cdot t_s}{60}$ [m] (13)

Va – Velocidade de alimentação do arame [m/min]

t_s – Tempo de soldagem [s]

d_a – Densidade linear do arame: 7,21 g/m

$$TD = \frac{(m_f - m_i) \cdot 3,6}{t_s} \quad (14)$$

onde: TD – Taxa de deposição [kg/h]

m_i – Massa da chapa antes da soldagem [g]

m_f – Massa da chapa depois da soldagem [g]

t_s – Tempo de soldagem [s]

$$\eta = \frac{TD}{TF} \cdot 100 \quad (15)$$

onde: η – Rendimento do processo [%]

TD – Taxa de deposição [kg/h]

TF – Taxa de fusão [kg/h]

4.2.4.3. Registro da geometria do cordão

A **Figura 4.4** descreve o procedimento utilizado para a medição da geometria do cordão de revestimento. Observa-se pela figura que as medições foram realizadas em quatro pontos distintos dos cordões, desprezando o início e o fim do processo, com a finalidade de obter a média das respostas. Os corpos de prova foram cortados e suas seções transversais foram devidamente preparadas, atacadas com nital 4% e fotografadas. Com a ajuda do software analisador de imagens *Analysis Doc*®, as dimensões do cordão foram mensuradas, obtendo-se a largura, penetração, reforço, área de penetração e área total da solda. O percentual de diluição foi então calculado dividindo-se a área de penetração pela área total.

A título de ilustração, a **Figura 4.5** apresenta dois perfis geométricos observados após os procedimentos de corte, preparação e ataque das seções transversais dos corpos de prova.

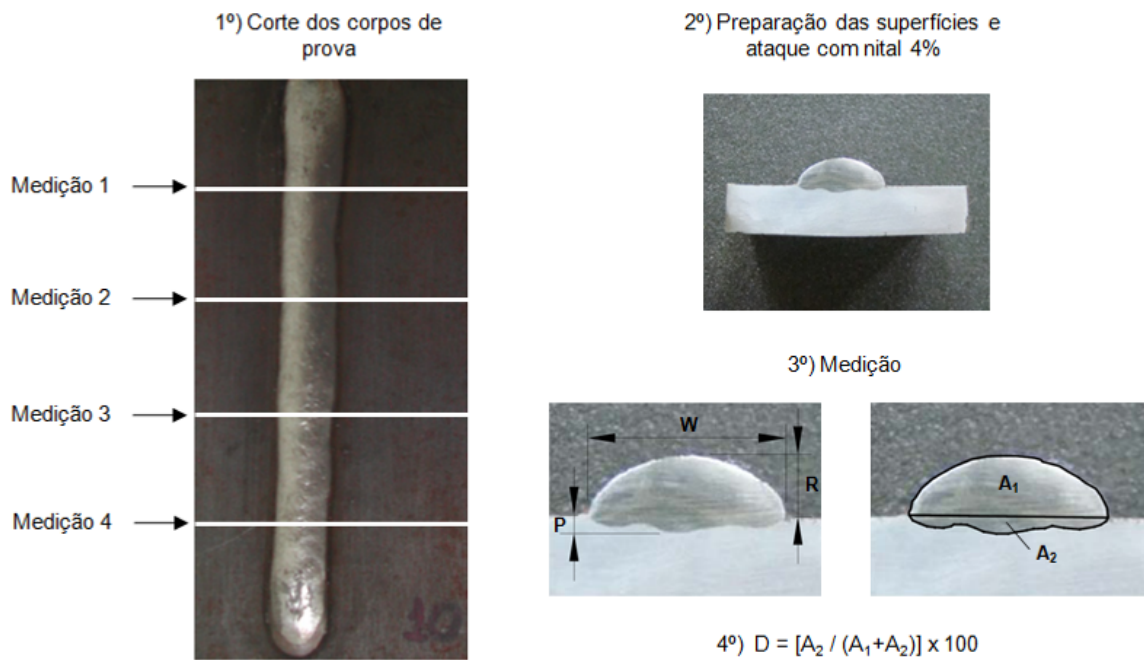


Figura 4.4 – Procedimento para medição da geometria do cordão

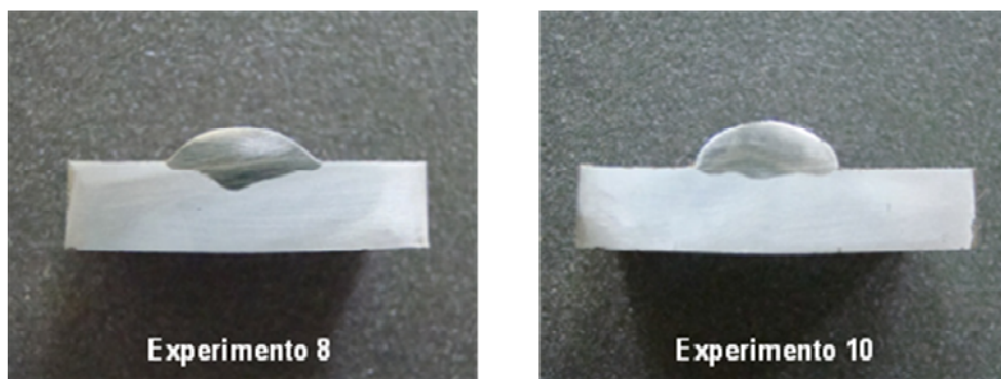


Figura 4.5 – Geometrias dos cordões após a preparação dos corpos de prova

Após a medição de todas as repostas de interesse, estas foram reunidas para compor a matriz experimental, apresentada pela **Tabela 4.4**. Nota-se que dois dados referentes ao reforço do cordão (testes 10 e 21) e outro referente ao aspecto superficial (teste 2) foram eliminados do estudo. Tais dados foram caracterizados como *outliers* e a presença dos mesmos poderia influenciar de maneira negativa a modelagem matemática das repostas.

Teste	Parâmetros				Geometria				Produtividade		Qualidade	
	Va	T	Vs	N	W	P	R	D	TD	η	E	S
1	-1	-1	-1	-1	11,19	1,37	2,63	26,44%	2,718	89,74%	3	7
2	1	-1	-1	-1	12,99	1,66	3,12	25,82%	3,881	89,71%	5	6
3	-1	1	-1	-1	12,70	1,69	2,50	31,49%	2,699	89,14%	3	10
4	1	1	-1	-1	15,05	1,98	2,78	31,25%	3,871	89,47%	3	*
5	-1	-1	1	-1	9,21	1,65	2,17	36,22%	2,773	91,58%	3	10
6	1	-1	1	-1	9,96	1,94	2,67	33,69%	3,924	90,70%	4	9
7	-1	1	1	-1	9,75	1,54	2,06	37,12%	2,647	87,43%	3	10
8	1	1	1	-1	11,51	2,18	2,42	41,08%	3,822	88,36%	3	8
9	-1	-1	-1	1	10,32	1,25	2,87	22,46%	2,740	90,49%	4	9
10	1	-1	-1	1	11,43	1,00	*	18,32%	3,870	89,47%	5	8
11	-1	1	-1	1	11,27	1,32	2,85	23,71%	2,743	90,60%	3	7
12	1	1	-1	1	13,34	1,10	3,18	21,96%	3,885	89,81%	4	4
13	-1	-1	1	1	7,99	1,11	2,55	24,96%	2,847	94,03%	3	9
14	1	-1	1	1	8,62	1,23	2,80	23,31%	3,901	90,17%	4	9
15	-1	1	1	1	8,48	1,37	2,36	28,77%	2,832	93,52%	3	10
16	1	1	1	1	10,84	1,64	2,60	30,19%	3,969	91,74%	3	7
17	-2	0	0	0	9,07	1,38	2,21	31,56%	2,204	92,62%	3	9
18	2	0	0	0	12,21	2,14	3,06	30,95%	4,454	89,52%	4	6
19	0	-2	0	0	9,42	1,20	3,03	22,84%	3,324	90,41%	4	9
20	0	2	0	0	11,69	1,86	2,46	35,58%	3,311	90,04%	3	8
21	0	0	-2	0	14,93	0,95	*	18,58%	3,319	90,27%	4	8
22	0	0	2	0	8,48	1,43	2,25	35,78%	3,423	93,08%	3	9
23	0	0	0	-2	11,73	2,18	2,61	40,44%	3,242	88,15%	3	8
24	0	0	0	2	9,22	1,28	2,89	24,16%	3,385	92,05%	3	8
25	0	0	0	0	10,82	1,71	2,60	31,05%	3,421	93,04%	3	8
26	0	0	0	0	10,93	1,72	2,59	31,67%	3,380	91,91%	3	8
27	0	0	0	0	10,74	1,62	2,65	30,88%	3,402	92,51%	3	7
28	0	0	0	0	10,61	1,80	2,50	32,83%	3,382	91,98%	3	8
29	0	0	0	0	10,64	1,49	2,62	29,99%	3,388	92,15%	3	7
30	0	0	0	0	10,59	1,49	2,61	31,09%	3,398	92,40%	3	7
31	0	0	0	0	10,57	1,50	2,56	31,02%	3,404	92,58%	3	8

Tabela 4.4 – Matriz experimental

4.2.5. Modelagem matemática das respostas

A partir dos dados experimentais apresentados pela **Tabela 4.4**, é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. Assim, a seção 2.7 apresentou a Eq. (2) como o modelo de superfície de resposta de segunda ordem utilizado para representar a relação aproximada entre uma dada resposta de interesse e as variáveis de entrada. Dessa forma, considerando o processo abordado pelo presente trabalho, em que são estudados os efeitos de quatro parâmetros, pode-se escrever a Eq. (2) conforme indica a Eq. (16) a seguir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 Va + \beta_2 T + \beta_3 Vs + \beta_4 N + \beta_{11} Va^2 + \beta_{22} T^2 + \beta_{33} Vs^2 + \beta_{44} N^2 + \\ + \beta_{12} VaT + \beta_{13} VaVs + \beta_{14} VaN + \beta_{23} TVs + \beta_{24} TN + \beta_{34} VsN \quad (16)$$

onde: y – Resposta de interesse

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4$ e $i < j$)

Va – Velocidade de alimentação do arame

T – Tensão

Vs – Velocidade de soldagem

N – Distância bico de contato peça

A estimação dos coeficientes foi feita através do software estatístico *MINITAB*®, que utiliza, para esta finalidade, o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). A **Tabela 4.5** apresenta os coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para as respostas consideradas neste trabalho.

Coeficiente	Respostas							
	W	P	R	D	TD	η	E	S
<i>Constante</i>	10,6996	1,6192	2,5898	0,3122	3,3964	0,9237	3,0000	7,5714
<i>Va</i>	0,7967	0,1221	0,1921	-0,0028	0,5676	-0,0055	0,3333	-0,8792
<i>T</i>	0,6555	0,1220	-0,1051	0,0249	-0,0088	-0,0027	-0,3333	-0,2958
<i>Vs</i>	-1,4507	0,0934	-0,2230	0,0368	0,0214	0,0061	-0,2500	0,7125
<i>N</i>	-0,6290	-0,2408	0,1155	-0,0425	0,0308	0,0090	0,0833	-0,1208
<i>Va²</i>	-0,0033	0,0266	0,0069	-0,0023	-0,0190	-0,0039	0,1458	-0,0293
<i>T²</i>	-0,0240	-0,0300	0,0346	-0,0074	-0,0218	-0,0060	0,1458	0,2207
<i>Vs²</i>	0,2637	-0,1161	0,0196	-0,0125	-0,0084	-0,0024	0,1458	0,2207
<i>N²</i>	-0,0440	0,0190	0,0368	0,0003	-0,0229	-0,0063	0,0208	0,0957
<i>VaT</i>	0,2663	0,0337	-0,0309	0,0077	0,0080	0,0028	-0,2500	-0,5688
<i>VaVs</i>	-0,1137	0,0757	-0,0146	0,0050	-0,0057	-0,0026	-0,1250	0,1938
<i>VaN</i>	-0,0308	-0,0998	-0,0219	-0,0042	-0,0124	-0,0049	0,0000	0,0687
<i>TVs</i>	-0,1023	0,0002	-0,0049	0,0023	-0,0103	-0,0032	0,1250	0,0687
<i>TN</i>	-0,0064	0,0048	0,0148	-0,0020	0,0204	0,0055	0,0000	-0,5563
<i>VsN</i>	0,0665	0,0045	-0,0144	-0,0077	0,0195	0,0057	-0,1250	-0,0688

Coeficientes em **negrito** indicam os termos significativos

Tabela 4.5 – Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos

4.2.6. Adequação e ajuste dos modelos

A adequação dos modelos foi verificada através da Análise de Variância (ANOVA), feita também pelo software *MINITAB*®. A **Tabela 4.6** apresenta os resultados desta análise e mostra que todos os modelos desenvolvidos são adequados, pois apresentam *P-values* inferiores a 5% de significância. Os resultados do ANOVA também indicam que, com exceção do aspecto superficial, todos os modelos desenvolvidos apresentaram bons ajustes, já que os valores de $R^2(adj.)$ foram superiores a 80%. Para o aspecto superficial, o ajuste obtido foi de 61,82%, considerado um ajuste não muito bom, porém aceitável. Além disso, a **Tabela 4.6** mostra que os modelos para a largura do cordão e a diluição apresentaram falta de ajuste ($Lack-of-fit < 0,05$). No entanto, estes dados puderam ser corrigidos através do procedimento de redução dos modelos. Para a formação de escória, a falta de ajuste não pôde ser calculada em função dos valores dos pontos centrais não apresentarem variabilidade.

Resposta	Graus de liberdade		Adj. SS		Adj. MS		F	P	Lack-of-fit	R ² (adj.) (%)
	Regressão	Residual	Regressão	Residual	Regressão	Residual				
W	14	16	89,355	0,975	6,383	0,061	104,73	0,000	0,035	97,98
P	14	16	3,054	0,300	0,218	0,019	11,64	0,000	0,428	83,24
R	14	14	2,067	0,088	0,148	0,006	23,58	0,000	0,076	91,86
D	14	16	0,099	0,004	0,007	0,000	31,49	0,000	0,047	93,43
TD	14	16	7,817	0,008	0,558	0,000	1131,65	0,000	0,085	99,81
η	14	16	0,008	0,001	0,001	0,000	12,92	0,000	0,057	84,77
E	14	16	10,263	0,833	0,733	0,052	14,08	0,000	-	85,92
S	14	15	42,507	10,460	3,036	0,697	4,35	0,004	0,075	61,82

Valores tabulados de F: $F_{95\%}(14, 16) = 2,37$; $F_{95\%}(14, 15) = 2,42$; $F_{95\%}(14, 14) = 2,48$

Tabela 4.6 – Análise de Variância

Após a verificação da adequação dos modelos, estes foram reduzidos através da remoção dos termos não significativos. O critério adotado para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do valor de $R^2(adj.)$ e a redução da variância S dos modelos. Assim, os modelos finais apresentaram os formatos descritos pelas Eqs. (17) – (24), sendo que a **Tabela 4.7** indica os novos ajustes obtidos.

$$W = 10,640 + 0,797Va + 0,656T - 1,451Vs - 0,629N + 0,270Vs^2 + 0,26VaT - 0,114VaVs - 0,102TVs + 0,067VsN \quad (17)$$

$$P = 1,639 + 0,122Va + 0,122T + 0,093Vs - 0,241N + 0,025Va^2 - 0,032T^2 - 0,118Vs^2 + 0,034VaT + 0,076VaVs - 0,100VaN \quad (18)$$

$$R = 2,597 + 0,191Va - 0,104T - 0,223Vs + 0,115N + 0,034T^2 + 0,019Vs^2 + 0,036N^2 - 0,030VaT - 0,023VaN \quad (19)$$

$$D = 0,310 - 0,003Va + 0,025T + 0,037Vs - 0,043N - 0,007T^2 - 0,012Vs^2 + 0,008VaT + 0,005VaVs - 0,004VaN - 0,008VsN \quad (20)$$

$$TD = 3,396 + 0,568Va - 0,009T + 0,021Vs + 0,031N - 0,019Va^2 - 0,022T^2 - 0,008Vs^2 - 0,023N^2 + 0,008VaT - 0,006VaVs - 0,012VaN - 0,010TVs + 0,020TN + 0,019VsN \quad (21)$$

$$\eta = 0,924 - 0,006Va - 0,003T + 0,006Vs + 0,009N - 0,004Va^2 - 0,006T^2 - 0,002Vs^2 - 0,006N^2 + 0,003VaT - 0,003VaVs - 0,005VaN - 0,003TVs + 0,006TN + 0,006VsN \quad (22)$$

$$E = 3,021 + 0,333Va - 0,333T - 0,250Vs + 0,083N + 0,144Va^2 + 0,144T^2 + 0,144Vs^2 - 0,250VaT - 0,125VaVs + 0,125TVs - 0,125VsN \quad (23)$$

$$S = 7,644 - 0,855Va - 0,272T + 0,689Vs - 0,145N + 0,219T^2 + 0,219Vs^2 - 0,533VaT - 0,592TN \quad (24)$$

Resposta	R ² (adj.) (%)		S	
	Modelo completo	Modelo reduzido	Modelo completo	Modelo reduzido
W	97,98	98,33	0,2469	0,2244
P	83,24	86,10	0,1369	0,1247
R	91,86	93,20	0,0791	0,0723
D	93,43	94,30	0,0150	0,0140
TD	99,81	99,81	0,0222	0,0222
η	84,77	84,77	0,0065	0,0065
E	85,92	87,97	0,2282	0,2110
S	61,82	70,34	0,8351	0,7361

Tabela 4.7 - Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos finais

Os resultados da **Tabela 4.7** indicam que os modelos finais desenvolvidos se caracterizam como expressões de grande confiabilidade, já que todos os modelos, com exceção do aspecto superficial, apresentaram ajustes superiores a 84%. No entanto, o procedimento de redução melhorou o ajuste do aspecto superficial de 61,82% para 70,34%, fazendo com que este modelo, com ajuste aceitável, passasse a apresentar um ajuste satisfatório.

4.2.7. Análise dos resíduos

A análise dos resíduos se caracteriza como um procedimento importante para garantir que os modelos matemáticos desenvolvidos representem bem as respostas de interesse. Dado que os resíduos são definidos como a diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental observado para uma certa condição, Montgomery (2005) afirma que eles devem ser normais, aleatórios e não correlacionados. Dessa forma, os resíduos relacionados aos modelos reduzidos foram analisados utilizando novamente o software *MINITAB*®. Os resultados desta análise são apresentados pela **Tabela 4.8**.

Análise dos resíduos		Geometria				Produtividade		Qualidade	
		W	P	R	D	TD	η	E	S
Teste de normalidade	AD	0,416	0,239	0,243	0,238	0,311	0,165	0,643	0,639
	<i>p-value</i>	0,313	0,761	0,744	0,762	0,534	0,934	0,085	0,087
Análise de correlação	Pearson	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	<i>p-value</i>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Análise de aleatoriedade	Causas especiais	*	4	*	4	*	*	*	*

Tabela 4.8 – Análise dos resíduos

A tabela anterior indica que os resíduos são normais para todas as respostas, já que apresentaram coeficientes de Anderson-Darling (AD) menores que um e *p-values* maiores que 5% de significância. A análise de correlação apresentou todos os coeficientes de *Pearson* iguais a zero e *p-values* de correlação iguais a um, indicando que os resíduos não são correlacionados. Finalmente, o teste de causas especiais, utilizado para analisar a aleatoriedade dos resíduos apresentou ausência de causas especiais para todas as respostas, com exceção da penetração e diluição. Para essas duas respostas foi acusada a causa especial 4, que diz respeito à existência de 14 pontos alternados em sequência. No entanto, como esta causa especial é pouco significativa quanto à previsibilidade dos modelos, pode-se dizer que os resíduos de todas as respostas são também aleatórios. Ao final dessa análise, verifica-se que os resíduos encontram-se adequados, já que foram caracterizados como normais, não correlacionados e aleatórios.

4.2.8. Obtenção das superfícies de resposta

O software *MINITAB*® foi empregado para a construção das superfícies de resposta relacionando os parâmetros estudados com as respostas da geometria, produtividade e qualidade dos revestimentos. Entretanto, tais superfícies serão discutidas em maiores detalhes posteriormente junto com a análise das interações entre os parâmetros.

4.2.9. Análise dos efeitos principais dos parâmetros

A partir do desenvolvimento dos modelos finais, torna-se possível analisar a maneira como as respostas do processo se comportam devido às alterações nos parâmetros de entrada. Através da variação dos parâmetros cujo efeito se deseja estudar, enquanto os demais são mantidos constantes, suas influências sobre as respostas de interesse passam a ser conhecidas. Isto contribui para que informações importantes sobre o processo em análise tornem-se claras.

Sendo assim, as influências dos parâmetros da soldagem com arame tubular sobre a geometria, a produtividade e a qualidade superficial dos revestimentos de aço inoxidável ABNT 316L sobre aço carbono ABNT 1020, obtidas através da análise dos modelos desenvolvidos, são discutidas nesta e na próxima seção.

4.2.9.1. Efeitos principais sobre a geometria do cordão de revestimento

As *Figuras 4.6 – 4.9* apresentam os efeitos principais sobre a geometria do cordão de revestimento, mostrando como a largura, penetração, reforço e diluição são influenciados pelos parâmetros da soldagem com arame tubular.

A *Figura 4.6* apresenta os resultados para a largura do cordão. Observa-se que o aumento da velocidade de alimentação e da tensão e a diminuição da velocidade de soldagem e da distância bico de contato peça implicam em maiores larguras do cordão. Isto ocorre porque o aumento da velocidade de alimentação faz com que a corrente de soldagem e a quantidade de material depositado aumentem, resultando em maiores dimensões para o cordão. Da mesma forma, o aumento da tensão está positivamente relacionado com o aumento da largura, ou seja, quanto maior a tensão maior a largura e vice-versa. Quanto à velocidade de soldagem, menores velocidades fazem com que maiores quantidades de material sejam depositados num dado comprimento a cada unidade de tempo, resultando em maiores dimensões. Para a distância bico de contato peça, o aumento da distância aumenta o comprimento e o efeito Joule do arco elétrico, gerando uma queda de calor na poça de fusão. Esta queda de calor faz diminuir as dimensões do cordão. Assim, menores distâncias produzem maiores larguras.

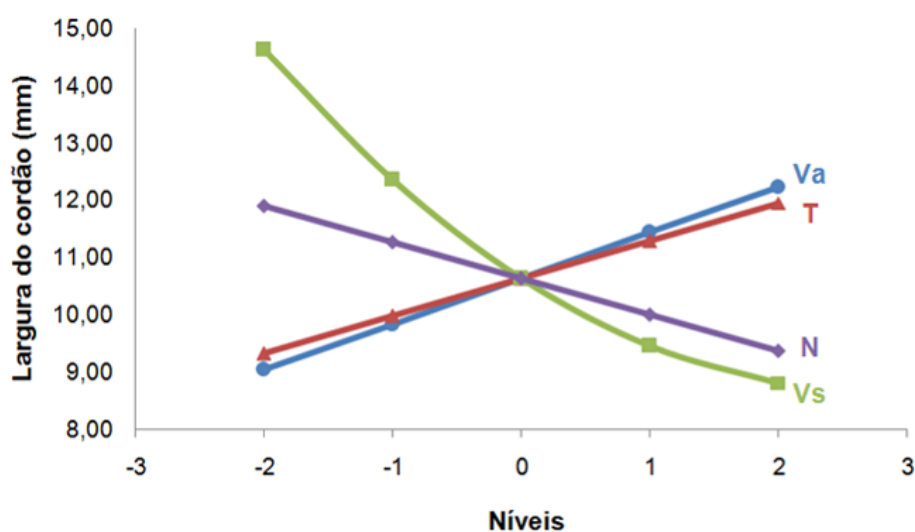


Figura 4.6 – Efeitos principais sobre a largura do cordão

Os resultados para a penetração (*Figura 4.7*) mostram que a diminuição da velocidade de alimentação e da tensão resulta em menores penetrações, devido à queda da corrente e da energia de soldagem provocados pela redução destes dois parâmetros. Para a distância bico de contato peça, maiores distâncias causam o aumento do efeito Joule no arco elétrico e a consequente queda da penetração. A velocidade de soldagem apresentou um ponto de curvatura para esta resposta, alcançando uma penetração máxima para uma velocidade próxima aos 44 cm/min. Menores valores de penetração foram observados nos níveis extremos de velocidade de soldagem.

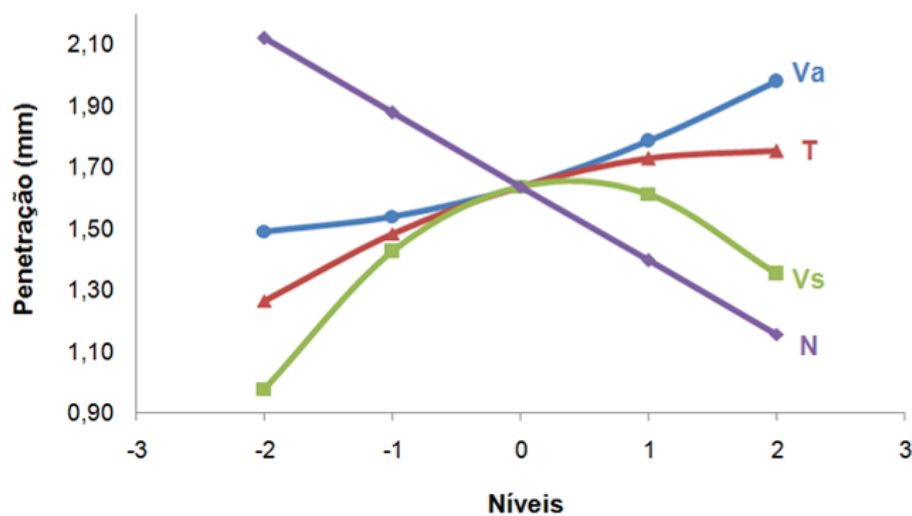


Figura 4.7 – Efeitos principais sobre a penetração

O aumento do reforço, conforme indica a *Figura 4.8* está relacionado a baixas tensões e velocidades de soldagem e a altas velocidades de alimentação e distância bico de contato peça. A relação entre reforço e tensão se caracteriza como uma relação inversa, ou seja, menores tensões resultam em reforços maiores e maiores tensões geram menores reforços. Para a velocidade de soldagem, menores velocidades causam maiores deposições de material por unidade de tempo, o que gera o aumento das dimensões do cordão. A obtenção de maiores reforços em maiores velocidades de alimentação também diz respeito ao aumento da corrente de soldagem e da quantidade de material depositado. Com relação à distância bico de contato peça, o aumento deste parâmetro gera uma queda de calor na poça de fusão, fazendo com que o metal fundido não tenha energia suficiente para penetrar no metal base. Consequentemente, o metal de adição, sem energia para penetrar na peça, acaba se acumulando sobre o metal base, aumentando o reforço.

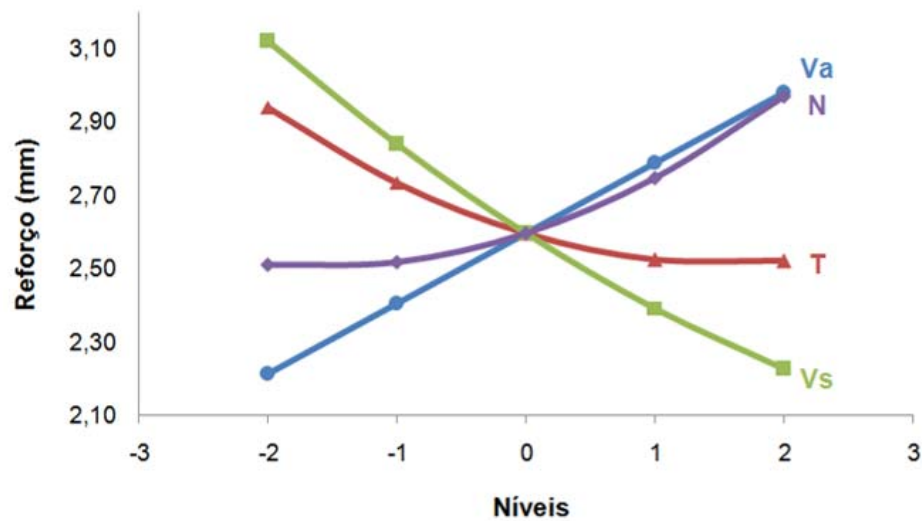


Figura 4.8 – Efeitos principais sobre o reforço

A **Figura 4.9** apresenta os efeitos dos parâmetros sobre a diluição. Menores níveis de diluição foram observados para baixas tensões, baixas velocidades de soldagem e altas distâncias bico de contato peça. A velocidade de alimentação se mostrou como um parâmetro pouco significativo para esta resposta. Observando as **Figuras 4.7 e 4.8**, nota-se que em condições de baixas tensões e baixas velocidades de soldagem, a penetração é baixa e o reforço é alto. Logo, a área de reforço aumenta e a área de penetração diminui, resultando em baixos percentuais de diluição. O mesmo raciocínio é válido para a distância bico de contato peça. Em condições de maiores distâncias, foram observadas baixas penetrações e altos reforços, levando à diminuição da diluição.

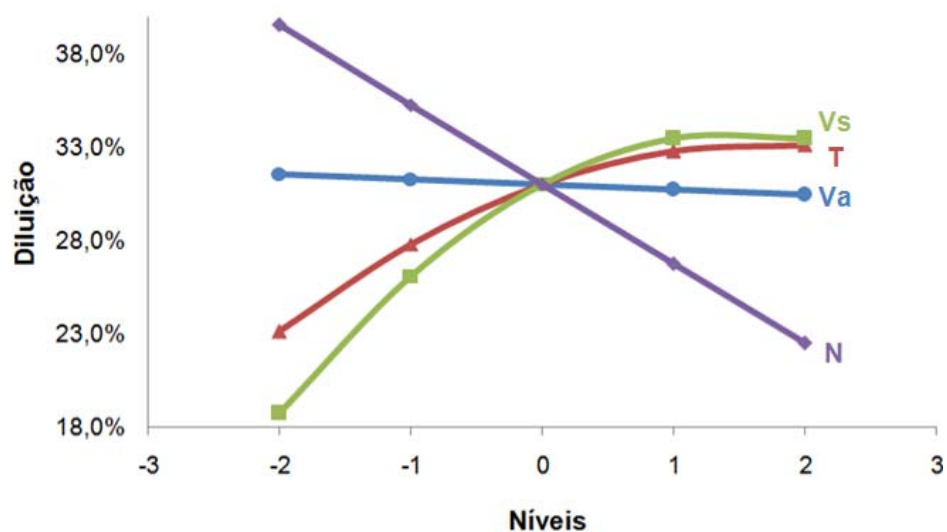


Figura 4.9 – Efeitos principais sobre a diluição

4.2.9.2. Efeitos principais sobre a produtividade

Os efeitos dos parâmetros sobre a taxa de deposição e o rendimento do processo são apresentados respectivamente pelas *Figuras 4.10 e 4.11*.

A *Figura 4.10* mostra que somente a velocidade de alimentação se caracterizou como um parâmetro significativo para a taxa de deposição. Maiores velocidades de alimentação depositam maior quantidade de material sobre o metal base, sendo esta informação suficiente para explicar o crescimento da taxa de deposição em maiores níveis de velocidade de alimentação.

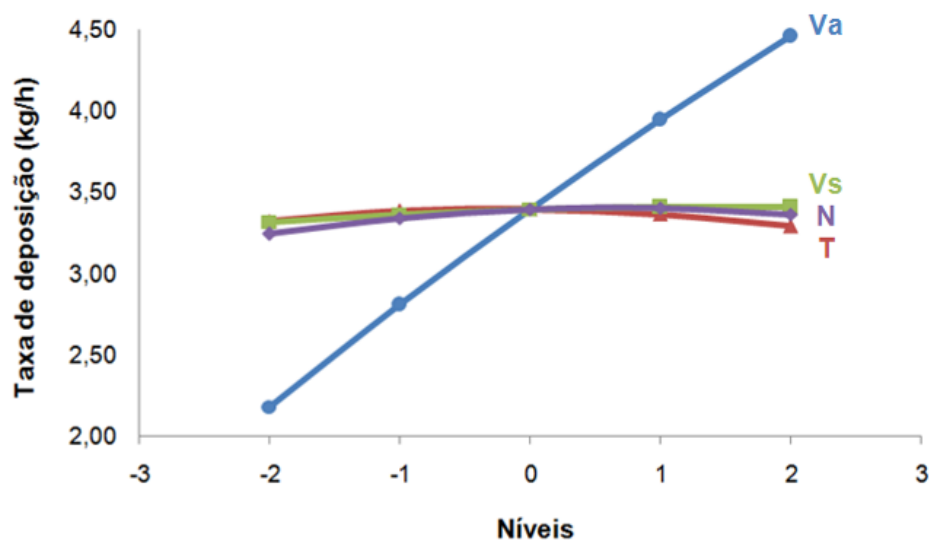


Figura 4.10 – Efeitos principais sobre a taxa de deposição

O efeito dos parâmetros sobre o rendimento do processo (*Figura 4.11*) mostrou que todas as curvas apresentaram ponto de curvatura, ou seja, para cada parâmetro foi verificado um rendimento máximo. O rendimento em um processo de soldagem está relacionado à perda de metal de adição devido à ocorrência de respingos. Portanto, a distância bico de contato peça se comportou como o parâmetro mais sensível a esta perda de material, seguida pela tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem. Além disso, a *Figura 4.11* sugere um rendimento global para o processo em torno de 92%, localizado próximo aos pontos centrais.

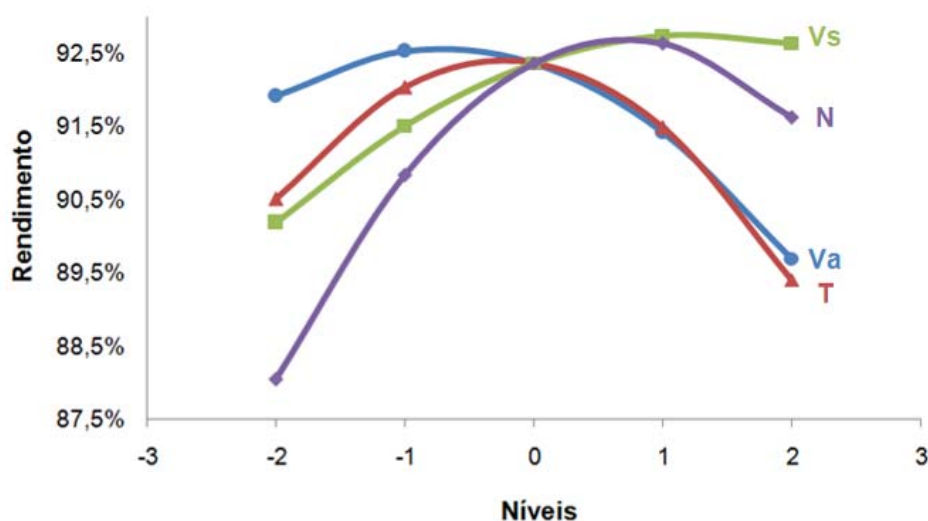


Figura 4.11 – Efeitos principais sobre o rendimento do processo

4.2.9.3. Efeitos principais sobre a qualidade

A análise dos efeitos dos parâmetros sobre a qualidade superficial dos revestimentos é relevante no que diz respeito ao monitoramento do processo em relação à má formação de escória, que causa o aparecimento de marcas laterais no cordão, e também quanto à ocorrência de defeitos superficiais.

Dentro deste contexto, a **Figura 4.12** mostra que melhores formações de escória podem ser conseguidas para baixos níveis de tensão e velocidade de soldagem e em altas velocidades de alimentação. A distância bico de contato peça se mostrou como um parâmetro pouco significativo. Maiores velocidades de alimentação fazem com que maiores quantidades de material sejam depositados. Assim, a quantidade de fluxo do arame tubular, material responsável pela formação de escória, também é maior, o que faz com que a escória seja formada com poucas falhas. Em condições de baixas velocidades de soldagem, o tempo da poça de fusão sobre um dado comprimento do metal base é maior. Portanto, o tempo para a escória se formar também é maior, contribuindo para que esta apresente um melhor recobrimento. Quanto à tensão, baixas tensões estão relacionadas à formação de um cordão com maior convexidade (pequenas larguras e maiores reforços), sendo esta característica geométrica favorável para um melhor recobrimento.

Considerando o aspecto superficial (**Figura 4.13**), observa-se que cordões isentos de defeitos são obtidos em baixas velocidades de alimentação, baixas tensões e altas velocidades de soldagem. A distância bico de contato peça também se comportou como um parâmetro pouco significativo para esta resposta. Altas velocidades de alimentação, altas tensões e

baixas velocidades de soldagem elevam a energia de soldagem e o calor imposto à peça, aumentando a taxa de resfriamento do material e fazendo com que este seja solidificado de forma descontrolada. Este descontrolo na estrutura de solidificação favorece o aparecimento de defeitos. Isto explica porque alguns defeitos superficiais, caracterizados principalmente por porosidades superficiais alongadas, foram observados em condições de baixas velocidades de soldagem e altas velocidades de alimentação. Apesar do aumento da tensão contribuir para o aumento do aporte térmico no material, o gráfico da **Figura 4.13** mostra que a variação deste parâmetro oscilou dentro de uma região em que não ocorreram defeitos (nota superior a 7,5). Portanto, pode-se afirmar que a variação da tensão não prejudicou o aspecto superficial dos cordões de revestimento.

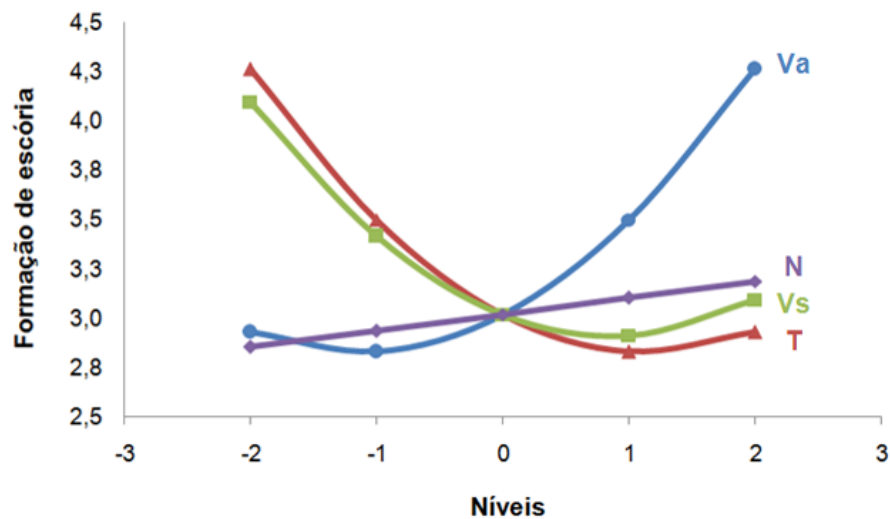


Figura 4.12 – Efeitos principais sobre a formação de escória

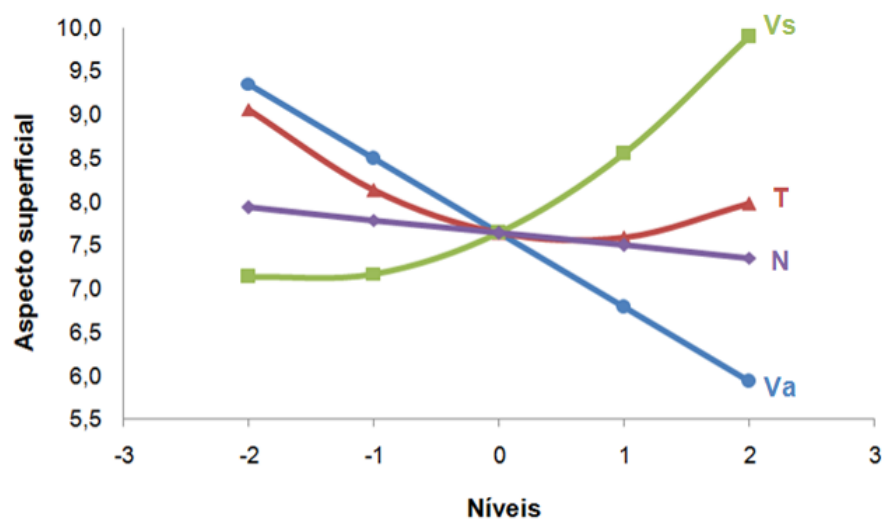


Figura 4.13 – Efeitos principais sobre o aspecto superficial

4.2.10. Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros

A *Tabela 4.5* revelou que diversas interações entre os parâmetros se comportaram como fatores significativos. Isto significa que o efeito conjunto desses parâmetros influencia de forma significativa os resultados do processo. Sendo assim, a análise sobre tais interações foi realizada através das superfícies de resposta desenvolvidas no item 4.2.8.

4.2.10.1. Efeitos das interações sobre a geometria do cordão de revestimento

A *Figura 4.14* apresenta o efeito conjunto da velocidade de alimentação e da tensão sobre a largura do cordão. Embora a *Figura 4.6* tenha mostrado que ambos os parâmetros são influentes sobre esta resposta, observa-se através da *Figura 4.14* que a interação entre eles também é significativa. Sendo assim, o aumento da velocidade de alimentação juntamente com o aumento da tensão faz com que a largura aumente consideravelmente. Análise semelhante pode ser atribuída à *Figura 4.15*, indicando que um aumento significativo da largura pode ser obtido quando se trabalha com altas velocidades de alimentação e baixas velocidades de soldagem.

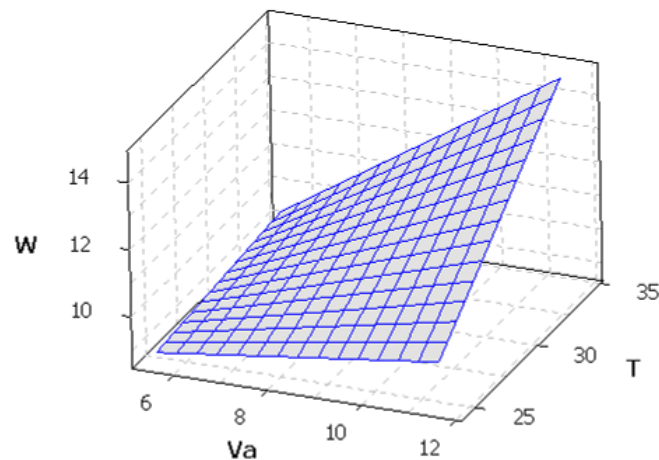


Figura 4.14 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e tensão sobre a largura do cordão ($V_s = 40$ cm/min; $N = 20$ mm)

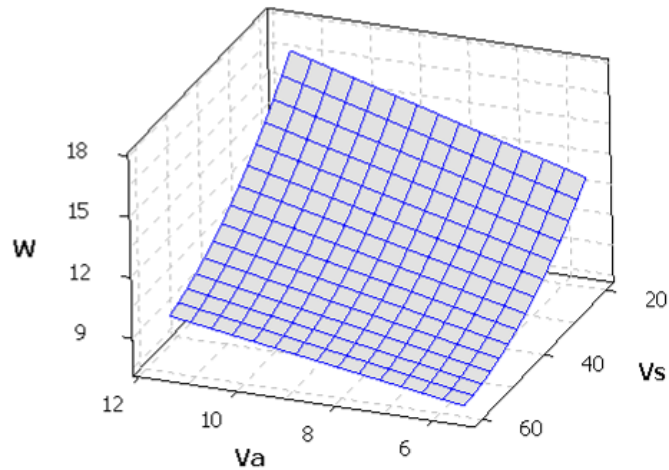


Figura 4.15 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem sobre a largura do cordão ($T = 29,5 \text{ V}$; $N = 20 \text{ mm}$)

Outras interações significativas sobre a geometria do cordão de revestimento estão representadas através das **Figuras 4.16 – 4.19**. As **Figuras 4.16 e 4.17** mostram os efeitos das interações entre os parâmetros sobre a penetração. Observa-se que menores penetrações são alcançadas empregando-se baixas velocidades de alimentação e altas velocidades de soldagem (**Figura 4.16**) ou também quando são utilizadas maiores velocidades de alimentação e maiores distâncias bico de contato peça (**Figura 4.17**). Quanto ao reforço, a **Figura 4.18** indica que esta resposta aumenta significativamente quando a velocidade de alimentação é aumentada conjuntamente com a diminuição da tensão. Para a diluição, baixos percentuais são obtidos quando se trabalha com altas velocidades de alimentação e baixas tensões (**Figura 4.19**).

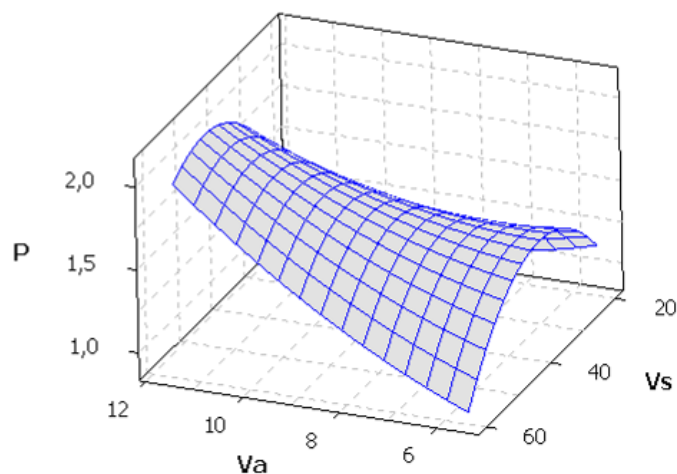


Figura 4.16 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem sobre a penetração ($T = 29,5 \text{ V}$; $N = 20 \text{ mm}$)

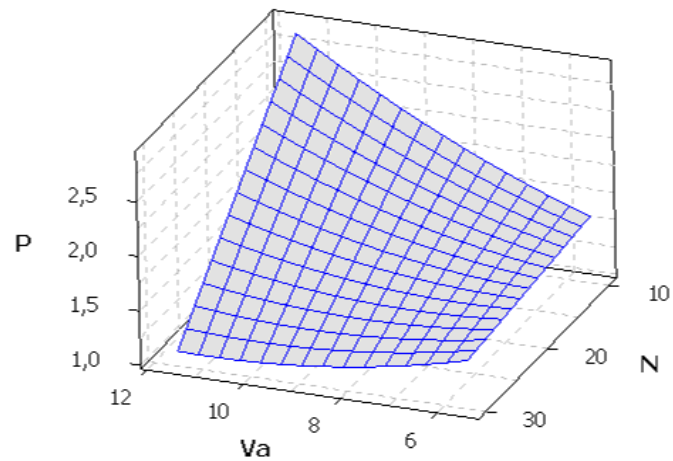


Figura 4.17 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e distância bico de contato peça sobre a penetração ($T = 29,5 \text{ V}$; $V_s = 40 \text{ cm/min}$)

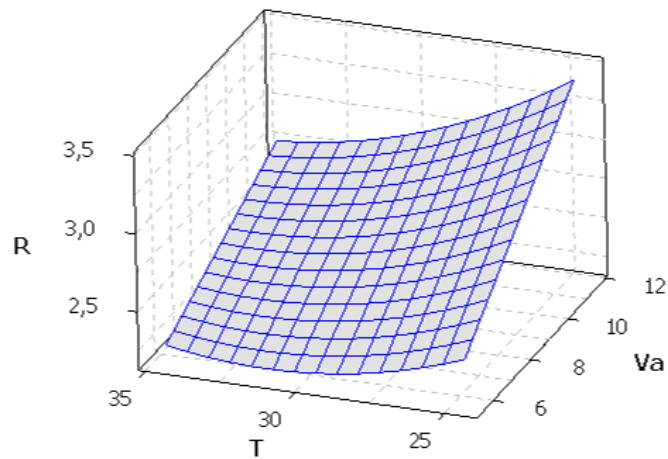


Figura 4.18 - Efeito da interação entre tensão e velocidade de alimentação sobre o reforço ($V_s = 40 \text{ cm/min}$; $N = 20 \text{ mm}$)

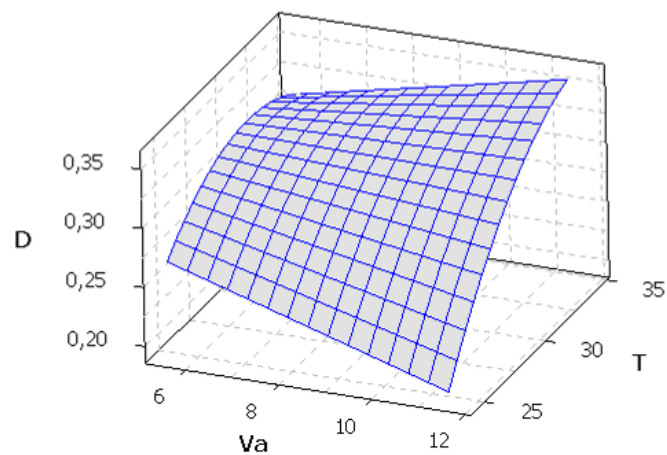


Figura 4.19 - Efeito da interação entre velocidade de alimentação e tensão sobre a diluição ($V_s = 40 \text{ cm/min}$; $N = 20 \text{ mm}$)

4.2.10.2. Efeitos das interações sobre a produtividade

As *Figuras 4.20 – 4.23* representam os efeitos de algumas interações relacionadas à produtividade do processo de revestimento. Considerando a taxa de deposição, verifica-se, através das *Figuras 4.20 e 4.21*, um dos aspectos mais importantes relacionados à análise das interações, que diz respeito ao fato de dois parâmetros não significativos gerarem em conjunto efeitos significativos sobre uma dada resposta. Conforme discutido anteriormente, a *Figura 4.10* identificou que tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça são parâmetros pouco influentes sobre a taxa de deposição. No entanto, a interação entre eles gerou efeitos significativos sobre esta mesma resposta. Sendo assim, um aumento da taxa de deposição pode ser obtido para tensões próximas a 32 V e distâncias bico de contato peça em torno de 25 mm (*Figura 4.20*) e para velocidades de soldagem próximas a 60 cm/min e distâncias bico de contato peça também em torno de 25 mm (*Figura 4.21*).

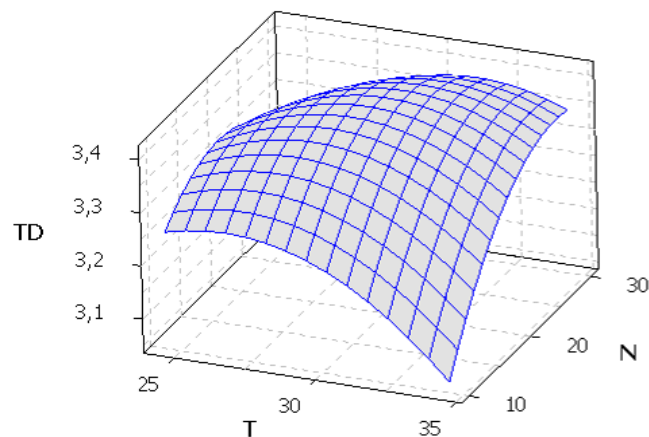


Figura 4.20 – Efeito da interação entre tensão e distância bico de contato peça sobre a taxa de deposição ($V_a = 8,5$ m/min; $V_s = 40$ cm/min)

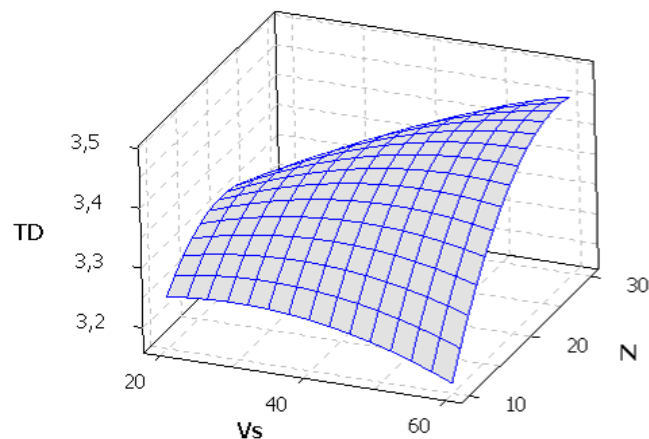


Figura 4.21 – Efeito da interação entre velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre a taxa de deposição ($V_a = 8,5$ m/min; $T = 29,5$ V)

As **Figuras 4.22 e 4.23** ilustram efeitos das interações sobre o rendimento. Pela **Figura 4.22** observa-se que um aumento do rendimento foi observado para velocidades de alimentação próximas a 7 m/min e tensões em torno de 30 V. A **Figura 4.23** indica que o rendimento também pode ser melhorado através da diminuição da velocidade de alimentação conjuntamente com o aumento da distância bico de contato peça.

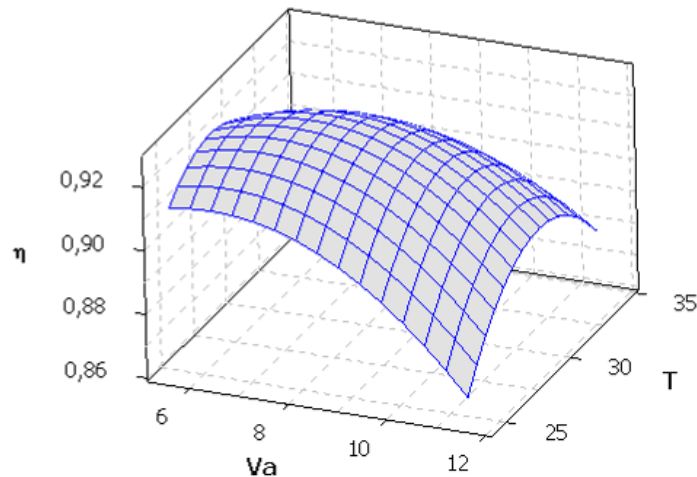


Figura 4.22 – Efeito da interação entre velocidade de alimentação e tensão sobre o rendimento ($V_s = 40$ cm/min; $N = 20$ mm)

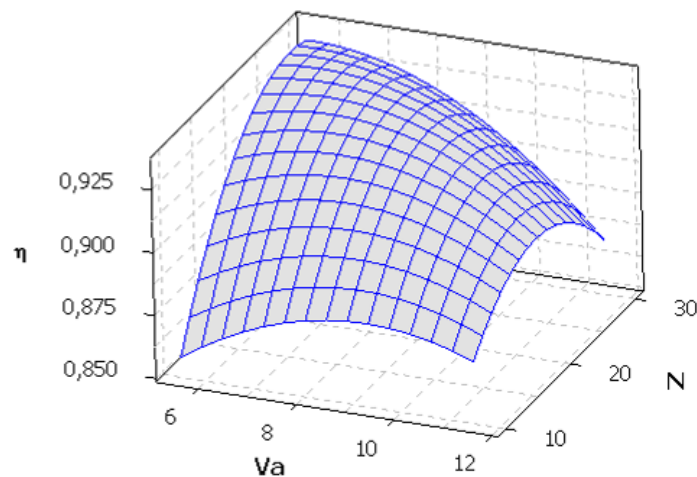


Figura 4.23 – Efeito da interação entre velocidade de alimentação e distância bico de contato peça sobre o rendimento ($T = 29,5$ V; $V_s = 40$ cm/min)

4.2.10.3. Efeitos das interações sobre a qualidade

As **Figuras 4.24 e 4.25** apresentam respectivamente os efeitos das interações sobre a formação de escória e o aspecto superficial. Vale destacar que a distância bico de contato peça foi identificada anteriormente como um parâmetro pouco influente sobre estas respostas.

Entretanto, a interação deste parâmetro com outras variáveis conduziu a aumentos significativos para a qualidade dos revestimentos. O aumento da distância juntamente com menores velocidades de soldagem e menores tensões favorece a deposição de cordões com melhores formações de escória e livres da ocorrência de defeitos.

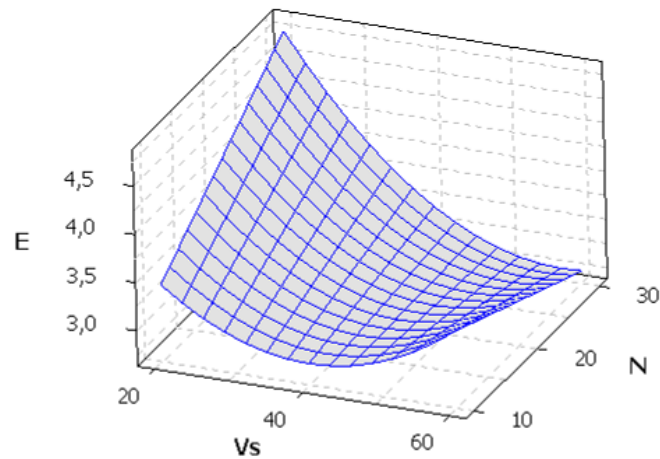


Figura 4.24 – Efeito da interação entre velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre a formação de escória ($V_a = 8,5$ m/min; $T = 29,5$ V)

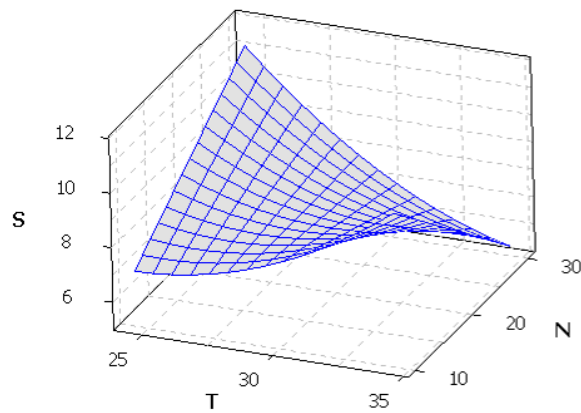


Figura 4.25 – Efeito da interação entre tensão e distância bico de contato peça sobre o aspecto superficial ($V_a = 8,5$ m/min; $V_s = 40$ cm/min)

4.3. Otimização EQMM

A análise desenvolvida até o presente momento já apresenta grande relevância para o processo analisado, já que a partir da modelagem matemática realizada na fase anterior, muitas informações importantes passam a ser conhecidas. Entre essas informações, o conhecimento da influência dos parâmetros sobre as respostas e a identificação das variáveis significativas são fatores decisivos para um controle adequado e uma gestão eficiente do

processo. Além disso, tendo-se em mãos modelos confiáveis, é possível fazer com que os resultados sejam otimizados. Nesse contexto, desenvolve-se nesta fase a otimização do processo de soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L empregando o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM).

De acordo com os objetivos propostos, busca-se a otimização das características geométricas do cordão de revestimento e da produtividade do processo, garantindo níveis mínimos de qualidade. Portanto, o EQMM é aplicado sobre a largura do cordão, penetração, reforço, diluição, taxa de deposição e rendimento do processo. Quanto à formação de escória e aspecto superficial, tais respostas foram tratadas como restrições. Sendo assim, as seções seguintes desenvolvem as etapas consideradas pela segunda fase do método experimental.

4.3.1. Análise da correlação entre as respostas

Considerando que o EQMM se destaca em relação aos métodos tradicionais de otimização por considerar a estrutura de correlação entre as respostas, o primeiro passo desta fase consiste em verificar se as respostas a serem otimizadas são correlacionadas. Assim, a **Figura 4.26** apresenta as correlações entre as respostas, obtidas pelo *MINITAB*®.

Correlations: W; P; R; D; TD; η

	W	P	R	D	TD
P	0,220 0,234				
R	0,445 0,016	-0,143 0,461			
D	-0,127 0,496	0,818 0,000	-0,679 0,000		
TD	0,361 0,046	0,302 0,099	0,545 0,002	-0,056 0,766	
η	-0,533 0,002	-0,290 0,114	-0,185 0,338	-0,107 0,565	-0,191 0,305

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Figura 4.26 – Estrutura de correlação entre as respostas
(Correlação significativa: $p\text{-value} < 0,05$)

A figura anterior mostra uma estrutura mediana de correlação, já que as respostas não se encontram fortemente correlacionadas. No entanto, aproximadamente metade das correlações

é significativa. Portanto, a existência de uma estrutura de correlação não muito forte, porém significativa, faz do EQMM um método adequado para a otimização deste problema.

4.3.2. Análise de Componentes Principais

O passo seguinte consiste em realizar a Análise de Componentes Principais sobre as respostas de interesse. A **Figura 4.27** apresenta os resultados dessa análise obtida através do MINITAB® e indica que três componentes principais (PC1, PC2 e PC3) representam em conjunto 90,5% da variabilidade das respostas. Portanto, tais componentes serão utilizados para a representação dos dados.

Principal Component Analysis: W; P; R; D; TD; η

Eigenanalysis of the Correlation Matrix
29 cases used, 2 cases contain missing values

Eigenvalue	2,4925	2,0813	0,8565	0,3878	0,1442	0,0377
Proportion	0,415	0,347	0,143	0,065	0,024	0,006
Cumulative	0,415	0,762	0,905	0,970	0,994	1,000

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
W	0,506	-0,208	-0,267	0,705	0,365	-0,010
P	0,530	0,302	0,222	0,123	-0,625	0,417
R	0,167	-0,650	0,049	-0,034	-0,516	-0,530
D	0,290	0,601	0,139	-0,037	0,095	-0,724
TD	0,394	-0,285	0,657	-0,346	0,444	0,124
η	-0,444	0,019	0,653	0,605	-0,068	-0,076

Figura 4.27 – Análise de Componentes Principais

4.3.3. Modelos matemáticos para os componentes principais

Após a identificação dos componentes, procede-se com o desenvolvimento dos modelos de superfície de resposta para os mesmos. Para isso, deve-se utilizar os *escores* dos componentes principais, obtidos após a realização da ACP. O processo para obtenção dos modelos quadráticos é idêntico ao apresentado nas seções 4.2.5 e 4.2.6. Sendo assim, as Eqs. (25) – (27) descrevem os modelos finais desenvolvidos para PC1, PC2 e PC3, os quais apresentaram, respectivamente, $R^2(adj.)$ de 96,34%, 93,64% e 88,48%.

$$\begin{aligned}
 PC_1 = & -0,201 + 1,164Va + 0,525T - 0,413Vs - 0,957N + 0,127Va^2 + 0,064T^2 - 0,092Vs^2 \\
 & + 0,194N^2 + 0,131VaVs + 0,096TVs - 0,168TN - 0,200VsN
 \end{aligned} \quad (25)$$

$$PC_2 = 0,139 - 0,801Va + 0,586T + 1,237Vs - 0,938N - 0,185T^2 - 0,333Vs^2 + 0,184VaT + 0,206VaVs - 0,115VaN \quad (26)$$

$$PC_3 = 0,661 + 0,447Va - 0,047T + 0,687Vs + 0,178N - 0,165Va^2 - 0,295T^2 - 0,291Vs^2 - 0,249N^2 + 0,176VaT - 0,346VaN - 0,174TVs + 0,302TN + 0,274VsN \quad (27)$$

4.3.4. Alvos em termos dos componentes principais

O cálculo dos alvos em termos dos componentes principais foi efetuado através das Eqs. (5) e (6), discutidas na seção 2.8. Para isso, são utilizados os coeficientes dos autovetores dos componentes principais e os valores padronizados das respostas em relação aos alvos (*scores*), estes últimos calculados a partir dos alvos definidos para cada resposta e da média e desvio-padrão experimentais. Os alvos para as respostas foram fixados através da minimização/maximização individual de cada uma delas, utilizando para isso os modelos matemáticos desenvolvidos. A **Tabela 4.9** apresenta os dados utilizados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais, os quais resultaram em **-0,291**, **-4,370** e **1,560** para PC1, PC2 e PC3, respectivamente.

	W	P	R	D	TD	η
Média	10,849	1,541	2,685	29,52%	3,341	90,92%
Desvio-padrão	1,735	0,334	0,350	5,86%	0,511	1,67%
Alvo	15,574	0,827	3,341	16,27%	4,456	94,90%
Objetivo	Max	Min	Max	Min	Max	Max
Escore	2,724	-2,137	1,878	-2,261	2,184	2,372
Autovetor PC1	0,506	0,530	0,167	0,290	0,394	-0,444
Autovetor PC2	-0,280	0,302	-0,650	0,601	-0,285	0,019
Autovetor PC3	-0,267	0,222	0,049	0,139	0,657	0,653

Tabela 4.9 – Dados utilizados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais

4.3.5. Formulação EQMM

Finalmente, após o desenvolvimento das etapas anteriores, chega-se à formulação matemática para a otimização através do EQMM, representada através das Eqs. (3) e (4), conforme visto na seção 2.8. Dessa forma, escrevendo as Eqs. (3) e (4) para o problema considerado neste trabalho, tem-se que a combinação ótima dos parâmetros é obtida a partir da seguinte formulação matemática:

$$\text{Minimizar EQMM} = \left\{ \left[(PC_1 + 0,291)^2 + 2,493 \right] \cdot \left[(PC_2 + 4,370)^2 + 2,081 \right] \cdot \left[(PC_3 - 1,560)^2 + 0,857 \right] \right\}^{1/3} \quad (28)$$

$$\text{sujeito a: } x^T x \leq 4,0 \quad (29)$$

$$E \geq 4 \quad (30)$$

$$S \geq 8 \quad (31)$$

A modelagem acima foi resolvida através de uma planilha construída no *Microsoft Excel*®, a qual apresentou o seguinte formato descrito pela **Figura 4.28**.

Modelos reduzidos

	W	P	R	D	TD	η	E	S
Constante	10,6395	1,6387	2,5965	0,3103	3,3964	0,9237	3,0213	7,6436
Va	0,7967	0,1221	0,1914	-0,0028	0,5676	-0,0055	0,3333	-0,8555
T	0,6555	0,1220	-0,1044	0,0249	-0,0089	-0,0027	-0,3333	-0,2721
Vs	-1,4507	0,0934	-0,2227	0,0368	0,0215	0,0061	-0,2500	0,6888
N	-0,6290	-0,2408	0,1149	-0,0425	0,0308	0,0090	0,0833	-0,1445
Va*Va	0,0000	0,0246	0,0000	0,0000	-0,0190	-0,0039	0,1436	0,0000
T*T	0,0000	-0,0320	0,0336	-0,0072	-0,0218	-0,0060	0,1436	0,2191
Vs*Vs	0,2700	-0,1181	0,0192	-0,0123	-0,0084	-0,0024	0,1436	0,2191
N*N	0,0000	0,0000	0,0358	0,0000	-0,0229	-0,0063	0,0000	0,0000
Va*T	0,2663	0,0337	-0,0299	0,0077	0,0080	0,0028	-0,2500	-0,5332
Va*Vs	-0,1137	0,0757	0,0000	0,0050	-0,0057	-0,0026	-0,1250	0,0000
Va*N	0,0000	-0,0998	-0,0229	-0,0042	-0,0124	-0,0049	0,0000	0,0000
T*Vs	-0,1023	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0103	-0,0032	0,1250	0,0000
T*N	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0204	0,0055	0,0000	-0,5918
Vs*N	0,0665	0,0000	0,0000	-0,0077	0,0195	0,0057	-0,1250	0,0000

PC1	PC2	PC3
-0,2014	0,1392	0,6611
1,1640	-0,8009	0,4472
0,5254	0,5863	-0,0472
-0,4132	1,2371	0,6874
-0,9573	-0,9376	0,1782
0,1267	0,0000	-0,1645
0,0644	-0,1847	-0,2952
-0,0923	-0,3332	-0,2914
0,1936	0,0000	-0,2488
0,0000	0,1839	0,1756
0,1313	0,2063	0,0000
0,0000	-0,1150	-0,3463
0,0960	0,0000	-0,1739
-0,1683	0,0000	0,3016
-0,1999	0,0000	0,2738

Resultados

	W	P	R	D	TD	η	E	S
Modelo	8,992	1,447	2,869	25,88%	4,048	90,78%	4,000	9,010
Alvo	15,574	0,827	3,341	16,27%	4,456	94,90%	5,000	10,000
R ² (adj)	98,33%	86,10%	93,20%	94,30%	99,81%	84,77%	87,97%	70,34%

PC1	PC2	PC3
-0,117	-1,377	0,786
-0,291	-4,370	1,560
96,34%	93,64%	88,48%

Variáveis

	Va	T	Vs	N
Coded	1,208	-1,011	1,033	0,671
Uncoded	10,31	26,97	50,33	23,36

Autovalores e explicação

PC1	PC2	PC3
2,492	2,081	0,857
41,5%	34,7%	14,3%
41,5%	76,2%	90,5%

Restrições

X'X:	3,999	<=	4,000
Limites:	-2,000	<=>	2,000
Escória:	4,000	>=	4,000
Superfície:	9,010	>=	8,000

Função objetivo

EQMM_o: 3,436

Figura 4.28 – Planilha desenvolvida para a otimização da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L

Como algoritmo de otimização, foi utilizado o Algoritmo Genético, disponível no recurso *Solver Evolutionary* do *Microsoft Excel*®. Com isso, foram executadas cinco iterações considerando pontos iniciais aleatórios e a solução ótima para o processo de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L foi calculada. A **Tabela 4.10** apresenta os resultados otimizados.

Parâmetros				Geometria				Produtividade		Qualidade	
Va	T	Vs	N	W	P	R	D	TD	η	E	S
10,3	27,0	50,3	23,4	8,99	1,45	2,87	25,88%	4,05	90,78%	4	9
m/min	V	cm/min	mm	mm	mm	mm	-	kg/h	-	nota	nota

Tabela 4.10 – Parâmetros ótimos da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L

Baseando-se nos resultados anteriores, a **Figura 4.29** descreve a geometria aproximada do cordão de revestimento na condição otimizada do processo.

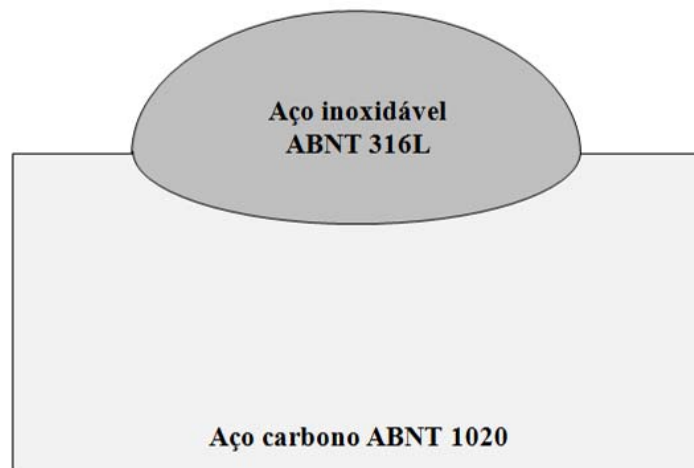


Figura 4.29 – Geometria otimizada para o cordão de revestimento

Comparando os resultados otimizados com valores obtidos experimentalmente (matriz experimental), considerou-se a geometria otimizada como não satisfatória, já que foi verificado pelos dados experimentais que maiores larguras, maiores reforços e menores penetrações poderiam ser obtidas. Além disso, comparando os resultados da **Tabela 4.10** com os alvos definidos na **Tabela 4.9**, observa-se que as respostas ótimas ficaram relativamente distantes em relação aos alvos definidos. Em função dessas considerações, decidiu-se atribuir pesos diferentes para a otimização das respostas com o objetivo de melhorar os resultados, principalmente em relação à geometria do cordão de revestimento. Para tanto, foi empregada a estratégia de ponderação proposta para o EQMM, apresentada na seção 2.9.

4.4. EQMM Ponderado

O fato da geometria otimizada não ser julgada satisfatória ocorreu em função de o EQMM tratar da otimização da geometria do cordão e da produtividade do processo considerando o mesmo nível de importância entre elas. Dessa forma, a otimização da geometria foi desfavorecida em função da otimização da produtividade. Assim, visando obter melhores resultados, empregou-se o EQMM Ponderado para uma nova otimização, considerando, agora, pesos diferentes entre as respostas. As etapas para o desenvolvimento da estratégia de ponderação proposta para o EQMM são descritas a seguir.

4.4.1. Padronização das respostas

De acordo com o que foi discutido na seção 2.9, a ponderação das respostas no EQMM deve ser feita antes da execução da Análise de Componentes Principais, dado que os pesos não podem ser atribuídos diretamente na função objetivo por causa desta ser escrita em função dos componentes principais. Além disso, antes que os pesos sejam atribuídos, é necessário que as respostas sejam padronizadas com o objetivo de unificar os dados. Este procedimento foi então realizado utilizando a Eq. (7). A **Tabela 4.11** apresenta as respostas padronizadas.

4.4.2. Ponderação das respostas

Após a padronização das respostas, multiplicam-se estes dados pelos pesos convenientes. As respostas referentes à geometria do cordão foram então julgadas como sendo duas vezes mais importantes que as respostas de produtividade. Como forma de ponderação, foi considerada a estratégia proposta por Ch'ng *et al.* (2005), que sugerem que os pesos sejam distribuídos entre as respostas de forma que o somatório entre eles seja igual a um, como mostra a Eq. (8). Portanto, para a largura do cordão, penetração, reforço e diluição, foram atribuídos o peso de 0,2 e para a taxa de deposição e rendimento atribuiu-se o peso de 0,1. A multiplicação das respectivas ponderações pelas respostas de interesse é apresentada pela **Tabela 4.12**.

Teste	Parâmetros				Geometria				Produtividade	
	Va	T	Vs	N	Ws	Ps	Rs	Ds	TDs	ηs
1	-1	-1	-1	-1	0,195	-0,498	0,004	-0,527	-1,220	-0,705
2	1	-1	-1	-1	1,235	0,357	1,763	-0,631	1,058	-0,726
3	-1	1	-1	-1	1,066	0,441	-0,470	0,337	-1,256	-1,067
4	1	1	-1	-1	2,420	1,302	0,546	0,294	1,038	-0,866
5	-1	-1	1	-1	-0,942	0,315	-1,664	1,144	-1,111	0,394
6	1	-1	1	-1	-0,512	1,180	0,144	0,712	1,141	-0,136
7	-1	1	1	-1	-0,634	-0,011	-2,026	1,297	-1,357	-2,089
8	1	1	1	-1	0,382	1,912	-0,728	1,972	0,943	-1,533
9	-1	-1	-1	1	-0,302	-0,870	0,877	-1,206	-1,175	-0,257
10	1	-1	-1	1	0,334	-1,621	*	-1,912	1,037	-0,871
11	-1	1	-1	1	0,241	-0,658	0,797	-0,992	-1,169	-0,196
12	1	1	-1	1	1,434	-1,319	1,992	-1,292	1,066	-0,665
13	-1	-1	1	1	-1,646	-1,286	-0,261	-0,779	-0,966	1,855
14	1	-1	1	1	-1,282	-0,945	0,613	-1,061	1,097	-0,449
15	-1	1	1	1	-1,368	-0,514	-0,951	-0,128	-0,996	1,551
16	1	1	1	1	-0,005	0,286	-0,103	0,114	1,230	0,487
17	-2	0	0	0	-1,026	-0,476	-1,514	0,348	-2,226	1,012
18	2	0	0	0	0,786	1,788	1,546	0,244	2,179	-0,838
19	0	-2	0	0	-0,821	-1,008	1,440	-1,141	-0,032	-0,310
20	0	2	0	0	0,485	0,966	-0,609	1,033	-0,058	-0,529
21	0	0	-2	0	2,354	-1,776	*	-1,868	-0,042	-0,390
22	0	0	2	0	-1,364	-0,325	-1,359	1,068	0,161	1,287
23	0	0	0	-2	0,510	1,905	-0,059	1,864	-0,194	-1,654
24	0	0	0	2	-0,938	-0,775	0,954	-0,916	0,086	0,669
25	0	0	0	0	-0,015	0,499	-0,111	0,261	0,158	1,265
26	0	0	0	0	0,044	0,543	-0,124	0,367	0,076	0,588
27	0	0	0	0	-0,061	0,244	0,102	0,231	0,119	0,945
28	0	0	0	0	-0,136	0,778	-0,475	0,565	0,082	0,631
29	0	0	0	0	-0,123	-0,168	-0,021	0,080	0,094	0,732
30	0	0	0	0	-0,151	-0,155	-0,054	0,267	0,111	0,879
31	0	0	0	0	-0,160	-0,112	-0,250	0,255	0,124	0,986

Tabela 4.11 – Respostas Padronizadas

Teste	Parâmetros				Geometria				Produtividade	
	Va	T	Vs	N	Ws*0,2	Ps*0,2	Rs*0,2	D*0,2	TDs*0,1	ηs*0,1
1	-1	-1	-1	-1	0,039	-0,100	0,001	-0,105	-0,122	-0,071
2	1	-1	-1	-1	0,247	0,071	0,353	-0,126	0,106	-0,073
3	-1	1	-1	-1	0,213	0,088	-0,094	0,067	-0,126	-0,107
4	1	1	-1	-1	0,484	0,260	0,109	0,059	0,104	-0,087
5	-1	-1	1	-1	-0,188	0,063	-0,333	0,229	-0,111	0,039
6	1	-1	1	-1	-0,102	0,236	0,029	0,142	0,114	-0,014
7	-1	1	1	-1	-0,127	-0,002	-0,405	0,259	-0,136	-0,209
8	1	1	1	-1	0,076	0,382	-0,146	0,394	0,094	-0,153
9	-1	-1	-1	1	-0,060	-0,174	0,175	-0,241	-0,118	-0,026
10	1	-1	-1	1	0,067	-0,324	*	-0,382	0,104	-0,087
11	-1	1	-1	1	0,048	-0,132	0,159	-0,198	-0,117	-0,020
12	1	1	-1	1	0,287	-0,264	0,398	-0,258	0,107	-0,066
13	-1	-1	1	1	-0,329	-0,257	-0,052	-0,156	-0,097	0,185
14	1	-1	1	1	-0,256	-0,189	0,123	-0,212	0,110	-0,045
15	-1	1	1	1	-0,274	-0,103	-0,190	-0,026	-0,100	0,155
16	1	1	1	1	-0,001	0,057	-0,021	0,023	0,123	0,049
17	-2	0	0	0	-0,205	-0,095	-0,303	0,070	-0,223	0,101
18	2	0	0	0	0,157	0,358	0,309	0,049	0,218	-0,084
19	0	-2	0	0	-0,164	-0,202	0,288	-0,228	-0,003	-0,031
20	0	2	0	0	0,097	0,193	-0,122	0,207	-0,006	-0,053
21	0	0	-2	0	0,471	-0,355	*	-0,374	-0,004	-0,039
22	0	0	2	0	-0,273	-0,065	-0,272	0,214	0,016	0,129
23	0	0	0	-2	0,102	0,381	-0,012	0,373	-0,019	-0,165
24	0	0	0	2	-0,188	-0,155	0,191	-0,183	0,009	0,067
25	0	0	0	0	-0,003	0,100	-0,022	0,052	0,016	0,127
26	0	0	0	0	0,009	0,109	-0,025	0,073	0,008	0,059
27	0	0	0	0	-0,012	0,049	0,020	0,046	0,012	0,094
28	0	0	0	0	-0,027	0,156	-0,095	0,113	0,008	0,063
29	0	0	0	0	-0,025	-0,034	-0,004	0,016	0,009	0,073
30	0	0	0	0	-0,030	-0,031	-0,011	0,053	0,011	0,088
31	0	0	0	0	-0,032	-0,022	-0,050	0,051	0,012	0,099

Tabela 4.12 – Ponderação das respostas

4.4.3. Análise de Componentes Principais

Nesta etapa, executa-se a Análise de Componentes Principais sobre as repostas ponderadas. É importante destacar que este procedimento deve ser realizado considerando a matriz de variância-covariância entre as respostas. A *Figura 4.30* apresenta os resultados para esta ACP. Novamente, serão utilizados três componentes principais, já que eles representam 93,4% da variabilidade das respostas.

Principal Component Analysis: Ws*0,2; Ps*0,2; Rs*0,2; Ds*0,2; TDs*0,1; ηs*0,1

Eigenanalysis of the Covariance Matrix

29 cases used, 2 cases contain missing values

Eigenvalue	0,073046	0,064195	0,013160	0,006307	0,003159	0,001219
Proportion	0,453	0,399	0,082	0,039	0,020	0,008
Cumulative	0,453	0,852	0,934	0,973	0,992	1,000

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Ws*0,2	0,065	0,664	0,596	-0,415	0,167	0,011
Ps*0,2	0,535	0,403	-0,353	-0,004	-0,534	-0,376
Rs*0,2	-0,526	0,523	-0,343	0,173	-0,252	0,489
Ds*0,2	0,652	-0,000	-0,100	0,062	0,212	0,719
TDs*0,1	-0,014	0,265	-0,547	-0,075	0,741	-0,275
ηs*0,1	-0,089	-0,233	-0,305	-0,888	-0,172	0,165

Figura 4.30 – Análise de Componentes Principais para as repostas ponderadas

4.4.4. Modelos matemáticos para os componentes principais

Para o desenvolvimento dos modelos matemáticos, utiliza-se o mesmo procedimento desenvolvido para o item 4.3.3. Assim, as Eqs. (32) – (34) apresentam os modelos finais desenvolvidos para PC1, PC2 e PC3, com ajustes respectivos de 91,37%, 97,62% e 89,86%.

$$\begin{aligned}
 PC_1 = & 0,0651 - 0,0361Va + 0,1440T + 0,1855Vs - 0,2282N - 0,0367T^2 - 0,0696Vs^2 \\
 & + 0,0450VaT + 0,0462VaVs - 0,0354VaN
 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned}
 PC_2 = & -0,0240 + 0,2007Va + 0,0425T - 0,1783Vs - 0,0726N + 0,0140Va^2 + 0,0120T^2 \\
 & + 0,0235N^2 + 0,0121VaT - 0,0273VaN
 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
 PC_3 = & -0,0530 - 0,0658Va + 0,0402T - 0,0899Vs - 0,0235N + 0,0130T^2 + 0,0442Vs^2 \\
 & - 0,0204VaVs + 0,0397VaN - 0,0204TN
 \end{aligned} \quad (34)$$

4.4.5. Alvos em termos dos componentes principais

A determinação dos alvos em termos dos componentes principais também é idêntica ao procedimento desenvolvido no item 4.3.4. Assim, os alvos obtidos foram **-3,671**, **1,954** e **0,043** para PC1, PC2 e PC3, respectivamente. A **Tabela 4.13** mostra os dados necessários para a efetivação dos cálculos.

	W	P	R	D	TD	η
Média	10,849	1,541	2,685	29,52%	3,341	90,92%
Desvio-padrão	1,735	0,334	0,350	5,86%	0,511	1,67%
Alvo	15,574	0,827	3,341	16,27%	4,456	94,90%
Objetivo	Max	Min	Max	Min	Max	Max
Escore	2,724	-2,137	1,878	-2,261	2,184	2,372
Autovetor PC1	0,065	0,535	-0,526	0,652	-0,014	-0,089
Autovetor PC2	0,664	0,403	0,523	0,000	0,265	-0,233
Autovetor PC3	0,596	-0,353	-0,343	-0,100	-0,547	-0,305

Tabela 4.13 – Dados utilizados para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais para as respostas ponderadas

4.4.6. Formulação EQMM Ponderado

De acordo com o que foi apresentado pelas Eqs. (9) e (10), na seção 2.9, a formulação matemática para o EQMM Ponderado é ligeiramente diferente em relação ao EQMM original, já que foi proposto, para este índice, um somatório dos EQMMs, sendo estes ponderados pelos graus de explicação de cada componente. Assim, escrevendo as Eqs. (9) e (10) para o problema de otimização deste trabalho, chega-se à seguinte formulação:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } EQMM = & \frac{0,453}{0,934} \cdot \left[(PC_1^* + 3,671)^2 + 0,073 \right] + \frac{0,399}{0,934} \cdot \left[(PC_2^* - 1,954)^2 + 0,064 \right] \\ & + \frac{0,082}{0,934} \cdot \left[(PC_3^* - 0,043)^2 + 0,013 \right] \end{aligned} \quad (35)$$

$$\text{sujeito a: } x^T x \leq 4,0 \quad (36)$$

$$E \geq 4 \quad (37)$$

$$S \geq 8 \quad (38)$$

A planilha construída no *Microsoft Excel*® (**Figura 4.31**) foi utilizada para resolver a formulação acima. Novamente se empregou o Algoritmo Genético na busca pelo ponto de ótimo. Assim, após cinco iterações, partindo de pontos iniciais aleatórios, obteve-se a nova condição otimizada para a soldagem com arame tubular para o revestimento de aço carbono com aços inoxidáveis. A **Tabela 4.14** apresenta os resultados.

Modelos reduzidos

	W	P	R	D	TD	η	E	S
Constante	10,6395	1,6387	2,5965	0,3103	3,3964	0,9237	3,0213	7,6436
Va	0,7967	0,1221	0,1914	-0,0028	0,5676	-0,0055	0,3333	-0,8555
T	0,6555	0,1220	-0,1044	0,0249	-0,0089	-0,0027	-0,3333	-0,2721
Vs	-1,4507	0,0934	-0,2227	0,0368	0,0215	0,0061	-0,2500	0,6888
N	-0,6290	-0,2408	0,1149	-0,0425	0,0308	0,0090	0,0833	-0,1445
Va*Va	0,0000	0,0246	0,0000	0,0000	-0,0190	-0,0039	0,1436	0,0000
T*T	0,0000	-0,0320	0,0336	-0,0072	-0,0218	-0,0060	0,1436	0,2191
Vs*Vs	0,2700	-0,1181	0,0192	-0,0123	-0,0084	-0,0024	0,1436	0,2191
N*N	0,0000	0,0000	0,0358	0,0000	-0,0229	-0,0063	0,0000	0,0000
Va*T	0,2663	0,0337	-0,0299	0,0077	0,0080	0,0028	-0,2500	-0,5332
Va*Vs	-0,1137	0,0757	0,0000	0,0050	-0,0057	-0,0026	-0,1250	0,0000
Va*N	0,0000	-0,0998	-0,0229	-0,0042	-0,0124	-0,0049	0,0000	0,0000
T*Vs	-0,1023	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0103	-0,0032	0,1250	0,0000
T*N	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0204	0,0055	0,0000	-0,5918
Vs*N	0,0665	0,0000	0,0000	-0,0077	0,0195	0,0057	-0,1250	0,0000

PC1	PC2	PC3
0,0651	-0,0240	-0,0530
-0,0361	0,2007	-0,0658
0,1440	0,0425	0,0402
0,1855	-0,1783	-0,0899
-0,2282	-0,0726	-0,0235
0,0000	0,0140	0,0000
-0,0367	0,0120	0,0130
-0,0696	0,0000	0,0442
0,0000	0,0235	0,0000
0,0450	0,0121	0,0000
0,0462	0,0000	-0,0204
-0,0354	-0,0273	0,0397
0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	-0,0204
0,0000	0,0000	0,0000

Resultados

	W	P	R	D	TD	η	E	S
Modelo	11,873	0,909	3,325	16,56%	3,652	88,71%	5,104	7,999
Alvo	15,574	0,827	3,341	16,27%	4,456	94,90%	5,000	10,000
R ² (adj)	98,33%	86,10%	93,20%	94,30%	99,81%	84,77%	87,97%	70,34%

PC1	PC2	PC3
-0,792	0,243	0,098
-3,671	1,954	0,043
91,37%	97,62%	89,86%

Variáveis

	Va	T	Vs	N
Coded	0,659	-1,163	-1,272	0,772
Uncoded	9,49	26,59	27,28	23,86

Autovalores e explicação

PC1	PC2	PC3
0,073	0,064	0,013
45,3%	39,9%	8,2%
45,3%	85,2%	93,4%

Restrições

X*X:	4,001	<=	4,000
Limites:	-2,000	<=>	2,000
Escória:	5,104	>=	4,000
Superfície:	7,999	>=	8,000

Função objetivo

EQMM_s: 5,335

Figura 4.31 – Planilha desenvolvida para a otimização ponderada da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L

Parâmetros				Geometria				Produtividade		Qualidade	
Va	T	Vs	N	W	P	R	D	TD	η	E	S
9,5	26,5	27,3	23,6	11,90	0,92	3,33	16,61%	3,66	88,73%	5	8
m/min	V	cm/min	mm	mm	mm	mm	-	kg/h	-	nota	nota

Tabela 4.14 – Parâmetros ótimos da soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L considerando pesos diferentes entre as respostas

A Figura 4.32 apresenta a geometria do cordão aproximada para esta nova condição otimizada.

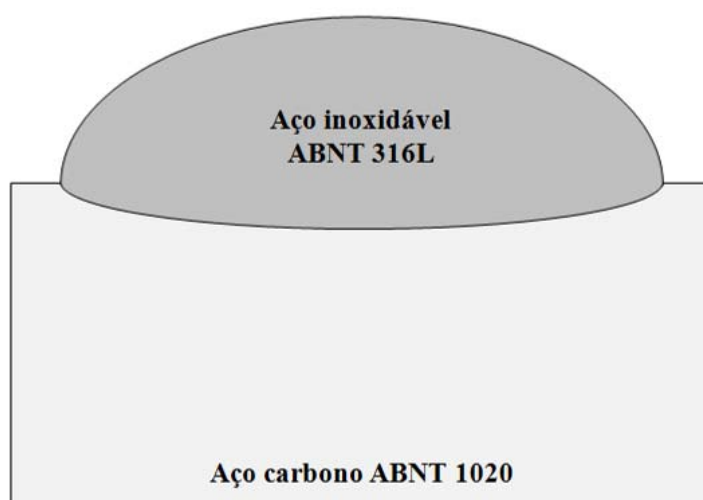


Figura 4.32 – Nova geometria otimizada

Os resultados anteriores apresentam uma melhoria quanto ao perfil geométrico do cordão de revestimento, já este apresentou maior largura, maior reforço e menor penetração. Quanto aos alvos das respostas, observa-se que os resultados ótimos para penetração, reforço e diluição ficaram próximos aos valores alvos. No entanto, as respostas de produtividade se distanciaram em relação dos alvos, fruto do menor peso que lhes foram atribuídos. Considerando que o perfil geométrico do cordão melhorou significativamente em relação aos valores da primeira otimização, esta nova condição de ótimo foi considerada satisfatória. Portanto, observa-se que a estratégia de ponderação proposta para o EQMM foi empregada com êxito, o que caracteriza o EQMM Ponderado como uma ferramenta eficiente para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes.

4.5. Validação dos resultados

Experimentos de confirmação foram realizados com o objetivo de comparar os resultados reais com os resultados calculados para a condição otimizada. Dessa forma, quatro cordões de revestimento foram depositados empregando a combinação ótima dos parâmetros determinada através do EQMM Ponderado ($Va = 9,5$ m/min; $T = 26,5$ V; $Vs = 27,3$ cm/min; $N = 23,6$ mm). Para as demais variáveis do processo, mantiveram-se os parâmetros fixos definidos pela **Tabela 4.2**. Após a execução dos testes e registros das respostas, foram obtidos os seguintes resultados apresentados pela **Tabela 4.15**.

Experimento	Geometria				Produtividade		Qualidade	
	W	P	R	D	TD	η	E	S
1	11,07	1,04	3,47	19,8%	3,57	87,0%	5	8
2	11,39	0,88	3,31	19,1%	3,61	87,8%	5	8
3	11,19	0,92	3,39	18,4%	3,57	86,9%	5	8
4	11,35	1,02	3,42	19,5%	3,60	87,7%	5	8
Média	11,25	0,96	3,40	19,2%	3,59	87,3%	5,0	8,0
Valor previsto	11,90	0,92	3,33	16,6%	3,66	88,7%	5,0	8,0
Erro	-5,48%	4,88%	2,20%	2,60%	-2,04%	-1,39%	0,00%	0,00%

Tabela 4.15 – Resultados dos experimentos de confirmação

Os resultados dos experimentos de confirmação mostram que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados teóricos, já que a maior diferença entre eles foi de 5,48%, observada para a largura do cordão. Portanto, na medida em que os valores reais se mostraram condizentes com os valores calculados, ficam validados os resultados obtidos para a otimização do processo de soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L. Estende-se essa validação para os modelos matemáticos desenvolvidos nas seções 4.2.5 e 4.2.6, considerando que os mesmos apresentam baixos erros quanto à previsão da geometria, da produtividade e da qualidade superficial dos revestimentos.

As **Figuras 4.33 – 4.35** mostram a formação de escória, o aspecto superficial e a geometria do cordão obtidos na condição otimizada do processo.



Figura 4.33 – Formação de escória ótima



Figura 4.34 – Aspecto superficial ótimo

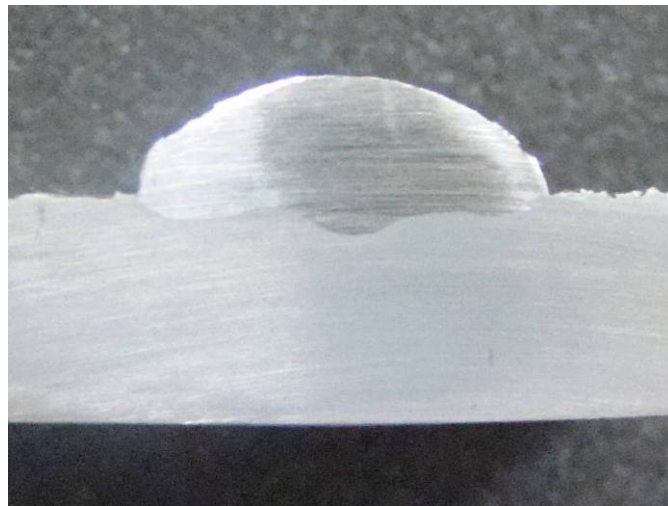


Figura 4.35 – Geometria ótima

A **Figura 4.36** apresenta a comparação entre a geometria ótima teórica, estabelecida pela **Figura 4.32**, e a geometria ótima real, obtida através dos experimentos de confirmação (**Figura 4.35**). Verifica-se que a geometria ótima real encontra-se próxima aos limites definidos pelo formato teórico, o que ressalta novamente a capacidade dos modelos matemáticos desenvolvidos com relação aos baixos erros na previsão dos resultados.

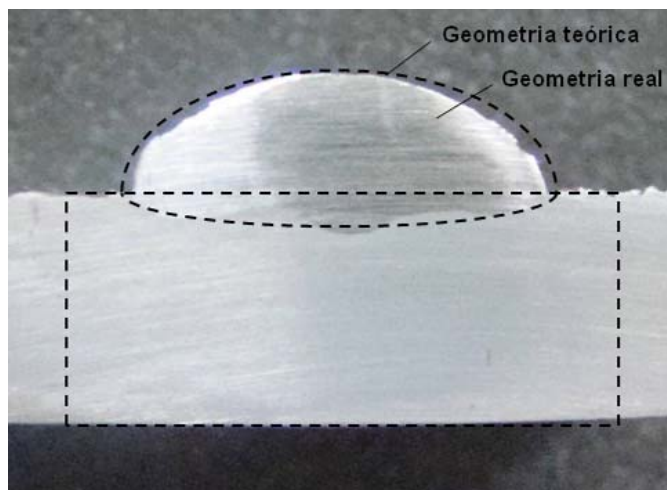


Figura 4.36 – Comparação entre a geometria ótima teórica e a geometria ótima real obtida para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L

4.6. Considerações finais

Este capítulo teve o objetivo de descrever a aplicação do método experimental definido no Capítulo 3 para se obter a condição otimizada do processo de soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. Dessa forma, as etapas necessárias para o desenvolvimento da Metodologia de Superfície de Resposta e da Otimização EQMM foram aplicadas de forma sistemática, o que contribuiu para que resultados importantes fossem obtidos. Por fim, vale também destacar que a estratégia de ponderação das respostas proposta para o EQMM foi verificada neste capítulo, sendo empregada com sucesso para a otimização do processo estudado.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões gerais

A partir dos resultados apresentados e discutidos ao longo do capítulo anterior, estabelecem-se, para o presente trabalho, as seguintes conclusões:

1. Os modelos matemáticos desenvolvidos para as respostas de interesse se caracterizaram como expressões de grande confiabilidade, já que apresentaram altos ajustes. Com exceção do aspecto superficial, todos os modelos apresentaram ajustes superiores a 84%. Para o aspecto superficial, o ajuste obtido foi de 70,34%, considerado satisfatório.
2. Todos os parâmetros analisados apresentaram influência significativa sobre os resultados do processo de soldagem com arame tubular para o revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L. No entanto, o grau de importância entre eles varia de acordo com a resposta de interesse.
3. Considerando os efeitos dos parâmetros para a obtenção dos resultados desejados, foi verificado que:
 - Maiores larguras podem ser obtidas empregando-se altas velocidades de alimentação, altas tensões, baixas velocidades de soldagem e baixas distâncias bico de contato peça;
 - Menores penetrações são alcançadas diminuindo a velocidade de alimentação, a tensão e a velocidade de soldagem e aumentando a distância bico de contato peça. Obteve-se uma penetração máxima para uma velocidade de soldagem de aproximadamente 44 cm/min;
 - O aumento do reforço é obtido através do aumento da velocidade de alimentação e da distância bico de contato peça e da diminuição da tensão e velocidade de soldagem;
 - Para a diluição, menores percentuais são alcançados em baixas tensão e velocidade de soldagem e altas distâncias bico de contato peça. A velocidade de alimentação exerceu pouca influência sobre a diluição;
 - O aumento da taxa de deposição só depende do aumento da velocidade de alimentação. Tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça não têm influência significativa sobre esta resposta;

- As curvas do rendimento identificaram um ponto de curvatura para cada parâmetro, sugerindo um rendimento global máximo para o processo em torno de 92%;
 - A distância bico de contato peça exerceu pouca influência sobre a qualidade superficial. Cordões livres de defeitos são produzidos a partir do aumento da velocidade de soldagem e diminuição da velocidade de alimentação e da tensão;
 - Melhores formações de escória são produzidas com altas velocidades de alimentação, baixas tensões e baixas velocidades de soldagem.
4. A análise das interações entre os parâmetros se mostrou como um elemento importante para o controle do processo, evidenciando que a ação conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma dada resposta pode conduzir a efeitos significativos. Portanto, esta análise não pode ser negligenciada.
5. A estratégia de ponderação das respostas proposta para o EQMM foi empregada com sucesso, obtendo-se melhores resultados otimizados em comparação ao obtido com o método proposto por Paiva (2008). Portanto, o EQMM Ponderado se caracteriza como uma ferramenta eficiente para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas apresentando diferentes níveis de importância.
6. Após a aplicação do EQMM Ponderado, verificou-se que a otimização do processo de soldagem com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis é alcançada com o emprego da seguinte combinação dos parâmetros: $V_a = 9,5$ m/min; $T = 26,5$ V; $V_s = 27,3$ cm/min; $N = 23,6$ mm. Nesta condição, são obtidas as seguintes respostas:
- Largura do cordão máxima: 11,90 mm;
 - Reforço máximo: 3,33 mm;
 - Penetração mínima: 0,92 mm;
 - Diluição mínima: 16,6%;
 - Taxa de deposição máxima: 3,66 kg/h;
 - Rendimento máximo: 88,7%;
 - Formação de escória: nota 5;
 - Aspecto superficial: nota 8.

7. Os experimentos de confirmação mostraram que a maior diferença entre as respostas reais e as respostas teóricas resultou em 5,48%, observado para a largura do cordão. Com isso, obteve-se a validação dos resultados ótimos e também dos modelos desenvolvidos para as respostas. Portanto, tais resultados fazem destes modelos expressões úteis para um adequado controle do processo, na medida em que apresentam baixos erros quanto à previsão das respostas.

5.2. Contribuições do trabalho

O desenvolvimento deste estudo permite atribuir para o presente trabalho as seguintes contribuições:

- Obtenção de um procedimento otimizado para a soldagem com arame tubular que permite a criação de superfícies com propriedades anti-corrosivas a partir de materiais de baixo custo;
- Incorporação de respostas relacionadas à qualidade e produtividade ao estudo da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis;
- Obtenção de modelos matemáticos confiáveis que permitem controlar as respostas do processo em função dos parâmetros de soldagem;
- Aprimoramento do EQMM como método de otimização, atribuindo ao mesmo procedimentos adequados para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com níveis de importância diferentes.

5.3. Sugestões para estudos futuros

Como sugestões para estudos futuros, ficam as seguintes considerações:

- Avaliação das propriedades finais dos revestimentos depositados na condição otimizada, com o objetivo de verificar se a composição química, a dureza, a microestrutura e a resistência à corrosão encontram-se dentro das especificações necessárias para suportar ambientes de alto desgaste por corrosão;
- Análise, para o processo otimizado, do custo de produção dos revestimentos anti-corrosivos, visando compará-los com os preços dos componentes de aços inoxidáveis;
- Emprego do EQMM Ponderado em outros problemas de otimização, visando testar a aplicabilidade do método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, G. e GHAZANFAR, U. Two-body abrasive wear studies of laser produced stainless steel and stainless steel + SiC composite clads. *Wear*, v. 258, n. 1-4, p. 258-264, 2005.
- ANJOS, M. A.; VILAR, R. e QIU, Y. Y. Laser cladding of ASTM S31254 stainless steel on a plain carbon steel substrate. *Surface & Coatings Technology*, v. 92, n. 1-2, p. 142-149, 1997.
- BALASUBRAMANIAN, V.; LAKSHMINARAYANAN, A. K.; VARAHAMOORTHY, R. e BABU, S. Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel. *International Journal of Iron and Steel Research*, v. 16, n. 1, p. 44-53, 2009a.
- BALASUBRAMANIAN, V.; VARAHAMOORTHY, R.; RAMACHANDRAN, C. S. e MURALIDHARAN, C. Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 40, n. 9-10, p. 887-897, 2009b.
- BAUTISTA, C.S.; RODRÍGUEZ, G. P. e FERRIERE, A. Numerical modelling of the solar cladding process. *Surface & Coatings Technology*, v. 202, n. 9, p. 1594-1605, 2008.
- BOX, G. E. P. e DRAPER, N. R. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. John Wiley & Sons, 1987. 650p.
- BRATCHELL, N. Multivariate Response Surface Modelling by Principal Components Analysis. *Journal of Chemometrics*, v. 3, p. 579-588, 1989.
- BUSACCA, G. P., MARSEGUERRA, M. e ZIO, E. Multi-objective optimization by genetic algorithms: application to safety systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 72, p. 59-74, 2001.
- CH'NG, C. K.; QUAH, S. H. e LOW, H. C. Index Cpm in multiple response optimization. *Quality Engineering*, v. 17, p. 165-171, 2005.
- CORRÊA, C. A.; BRAGA, E. M. e TREVISAN, R. E. Influência dos parâmetros da soldagem MIG pulsado e convencional nas características econômicas de revestimento. *Soldagem & Inspeção*, Suplemento Técnico, ano 6, n. 4, p. 1-9, 2000.
- CORREIA, D. S.; GONÇALVES, C. V.; CUNHA JUNIOR, S. S. e FERRARESI, V. A. Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 160, n. 1, p. 70-76, 2005.
- ESAB. *Arames tubulares OK*. Catálogo, 2008. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/tubulares/upload/1900280rev17_CatalogoArameTubular_pt.pdf. Acesso em: 08/03/2010.
- FERRIERE, A.; BAUTISTA, C. S.; RODRIGUEZ, G. P. e VAZQUEZ, A. J. Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by solar cladding process. *Solar Energy*, v. 80, n. 10, p. 1338-1343, 2006.

FORTES, C. *Arames Tubulares OK*. Apostila ESAB, 2004. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901098rev0_ApostilaAramesTubulares.pdf. Acesso em: 08/03/2010.

FORTES, C. *Soldagem MIG/MAG*. Apostila ESAB, 2005. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf. Acesso em: 08/03/2010.

GHOSH, P. K.; GUPTA, P. C. e GOYAL, V. K. Stainless steel cladding of structural steel plate using the pulsed current GMAW process. *Welding Journal*, v. 77, n. 7, p. 307-314, 1998.

ISHIDA, T. Formation of stainless steel layer on mild steel by welding arc cladding. *Journal of Materials Science*, v. 26, n. 23, p. 6431-6435, 1991.

JEFFUS, L. *Welding: principles and applications*. 5 ed. Australia: Delmar Learning, 2004. 904 p.

KACAR, R. e ACARER, M. An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH-steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 152, n. 1, p. 91-96, 2004.

KANNAN, T. e MURUGAN, N. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 176, n. 1-3, p. 230-239, 2006a.

KANNAN, T. e MURUGAN, N. Prediction of ferrite number of duplex stainless steel clad metals using RSM. *Welding Journal*, v. 85, n. 5, p. 91s-100s, May 2006b.

KHURI, A. I. e CONLON, M. Simultaneous optimization of multiple responses represented by polynomial regression functions. *Technometrics*, v. 23, n. 4, p. 363-375, 1981.

KIM, I. S.; LEE, J. S. e KIMURA, A. Embrittlement of ER309L stainless steel clad by s-phase and neutron irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, v. 329-333, n. 1, p. 607-611, 2004.

KUO, I. C.; CHOU, C. P.; TSENG, C. F. e LEE, I. K. Submerged arc stainless steel strip cladding - effect of post-weld heat treatment on thermal fatigue resistance. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 18, n. 2, p. 154-161, 2009.

LAKSHMINARAYANAN, A. K. e BALASUBRAMANIAN, V. Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 19, n. 1, p. 9-18, 2009.

LEE, J. S.; KIM, I. S.; KASADA, R. e KIMURA, A. Microstructural characteristics and embrittlement phenomena in neutron irradiated 309L stainless steel RPV clad. *Journal of Nuclear Materials*, v. 326, n. 1, p. 38-46, 2004.

LI, R.; FERREIRA, M. G. S.; ANJOS, M. A. e VILAR, R. Localized corrosion of laser surface clad UNS S31254 superaustenitic stainless steel on mild steel. *Surface & Coatings Technology*, v. 88, n. 1-3, p. 90-95, 1996a.

LI, R.; FERREIRA, M. G. S.; ANJOS, M. A. e VILAR, R. Localized corrosion performance of laser surface clad UNS S44700 superferritic stainless steel on mild steel. *Surface & Coatings Technology*, v. 88, n. 1-3, p. 96-102, 1996b.

MAJUMDAR, J. D.; PINKERTON, A.; LIU, Z.; MANNA, I. e LI, L. Mechanical and electrochemical properties of multiple-layer diode laser cladding of 316L stainless steel. *Applied Surface Science*, v. 247, n. 1-4, p. 373-377, 2005.

MALLYA, U. D. e SRINIVAS, H. S. Effect of magnetic steering of the arc on clad quality in submerged arc strip cladding. *Welding Journal*, v. 72, p. 289s-293s, 1993.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 6 ed. New York: John Wiley, 2005. 643 p.

MURUGAN, N e PARMAR, R. S. Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 41, n. 4, p. 381-398, 1994.

MURUGAN, N. e PARMAR, R. S. Effect of welding conditions on microstructure and properties of type 316L stainless steel submerged arc cladding. *Welding Journal*, v. 76, p. 210-220, 1997a.

MURUGAN, N. e PARMAR, R. S. Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding. *Welding Journal*, v. 76, p. 391s-403s, 1997b.

MURUGAN, N; PARMAR, R. S. e SUD, S. K. Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 37, p. 767-780, 1993.

NILO JÚNIOR, L. P. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2003.

OZEL, T., KARPAT, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 4-5, p. 467-479, 2005.

PAIVA, A. P. *Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processo de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas*. 2006. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2006.

PAIVA, E. J. *Otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas baseada em índices de capacidade*. 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2008.

- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 30, n. 7-8, p. 669-676, 2006a.
- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.
- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. Sensitivity analysis for process parameters in cladding of stainless steel by flux cored arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 8, n. 2, p. 90-100, 2006b.
- PALANI, P. K.; MURUGAN, N. e KARTHIKEYAN, B. Process parameter selection for optimising weld bead geometry in stainless steel cladding using Taguchi's approach. *Materials Science and Technology*, v. 22, n. 10, p. 1193-1200, 2006.
- PHILLIPS, A. L. *Welding Handbook: Fundamentals of Welding*. London: American Welding Society, 1965a. 4. Vol. 1.
- PHILLIPS, A. L. *Welding Handbook: Special Welding Processes and Cutting*. London: American Welding Society, 1965b. 4. Vol. 3.
- PINKERTON, A. J. e LI, L. An investigation of the effect of pulse frequency in laser multiple-layer cladding of stainless steel. *Applied Surface Science*, v. 208-209, p. 405-410, 2003.
- PINKERTON, A. J. e LI, L. Multiple-layer cladding of stainless steel using a high-powered diode laser: an experimental investigation of the process characteristics and material properties. *Thin Solid Films*, v. 453-454, p. 471-476, 2004.
- RAJEEV, R.; SAMAJDAR, I.; RAMAN, R.; HARENDRANATH, C. S. e KALE, G. B. Origin of hard and soft zone formation during cladding of austenitic/duplex stainless steel on plain carbon steel. *Materials Science and Technology*, v. 17, n. 8, p. 1005-1011, 2001.
- RODRIGUES, L. O. *Análise e otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular*. 2005. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2005.
- RODRIGUES, L. O., PAIVA, A. P. e COSTA, S. C. Otimização do processo de soldagem com eletrodo tubular através da análise da geometria do cordão de solda. *Soldagem & Inspeção*, v. 13, n. 2, p. 118-127, 2008.
- SHA, C. K. e TSAI, H. L. Hardfacing characteristics of S42000 stainless steel by using CO2 laser. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 10, n. 1, p. 37-41, 2001.
- SHA, C. K. e TSAI, H. L. Hardfacing characteristics of S42000 stainless steel powder with added silicon nitride using a CO2 laser. *Materials Characterization*, v. 52, n. 4-5, p. 341-348, 2004.
- SHAHI, A. S. e PANDEY, S. Effect of auxiliary preheating of the filler wire on quality of gas metal arc stainless steel claddings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 17, n. 1, p. 30-36, 2008a.

SHAHI, A. S. e PANDEY, S. Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 196, n. 1-3, p. 339-344, 2008b.

SHAHI, A. S. e PANDEY, S. Prediction of dilution in GMA and UGMA stainless steel single layer cladding using response surface methodology. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11, n. 6, p. 634-640, 2006.

SONG, J.; DENG, Q.; CHEN, C.; HU, D. e LI, Y. Rebuilding of metal components with laser cladding forming. *Applied Surface Science*, v. 252, n. 22, p. 7934-7940, 2006.

TARNG, Y. S.; JUANG, S. C. e CHANG, C. H. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 128, n. 1-3, p. 1-6, 2002.

TOSTO, S.; NENCI, F. e JIANDONG, H. Microstructure and tensile properties of AISI 316 stainless steel electron-beam cladded on C40 mild steel. *Journal of Materials Science*, v. 29, n. 22, p. 5852-5858, 1994.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem: processos e metalurgia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1992, 494 p.

ANEXOS

ANEXO A – Formações de escória observadas nos experimentos



Experimento 1



Experimento 2



Experimento 3



Experimento 4



Experimento 5



Experimento 6



Experimento 7



Experimento 8



Experimento 9

ANEXO A – Formações de escória observadas nos experimentos (continuação)



Experimento 10



Experimento 11



Experimento 12



Experimento 13



Experimento 14



Experimento 15



Experimento 16



Experimento 17



Experimento 18

ANEXO A – Formações de escória observadas nos experimentos (continuação)



Experimento 19



Experimento 20



Experimento 21



Experimento 22



Experimento 23



Experimento 24



Experimento 25



Experimento 26



Experimento 27

ANEXO A – Formações de escória observadas nos experimentos (continuação)



Experimento 28



Experimento 29



Experimento 30



Experimento 31

ANEXO B – Aspectos superficiais observados nos experimentos



Experimento 1



Experimento 2



Experimento 3



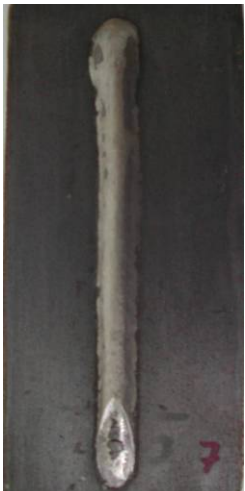
Experimento 4



Experimento 5



Experimento 6



Experimento 7



Experimento 8



Experimento 9

ANEXO B – Aspectos superficiais observados nos experimentos (continuação)



Experimento 10



Experimento 11



Experimento 12



Experimento 13



Experimento 14



Experimento 15



Experimento 16



Experimento 17



Experimento 18

ANEXO B – Aspectos superficiais observados nos experimentos (continuação)



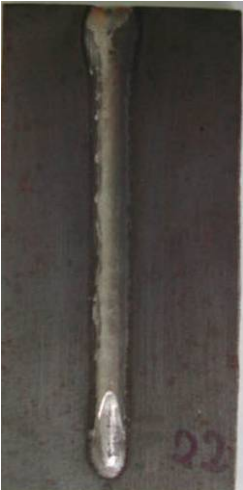
Experimento 19



Experimento 20



Experimento 21



Experimento 22



Experimento 23



Experimento 24



Experimento 25



Experimento 26



Experimento 27

ANEXO B – Aspectos superficiais observados nos experimentos (continuação)



Experimento 28



Experimento 29



Experimento 30



Experimento 31

ANEXO C – Geometrias dos cordões observadas nos experimentos (Medição 2)



Experimento 1



Experimento 2



Experimento 3



Experimento 4



Experimento 5



Experimento 6



Experimento 7



Experimento 8



Experimento 9



Experimento 10



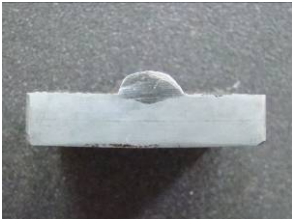
Experimento 11



Experimento 12



Experimento 13



Experimento 14



Experimento 15



Experimento 16



Experimento 17



Experimento 18

ANEXO C – Geometrias dos cordões observadas nos experimentos (Medição 2) (continuação)



Experimento 19



Experimento 20



Experimento 21



Experimento 22



Experimento 23



Experimento 24



Experimento 25



Experimento 26



Experimento 27



Experimento 28



Experimento 29



Experimento 30



Experimento 31

ANEXO D – Dados coletados durante a realização dos experimentos

Experimento	Parâmetros				Dados experimentais				
	Va	T	Vs	N	L _{ar} (m)	m _i (g)	m _f (g)	t (s)	I (A)
1	7,0	27,0	30,0	15,0	2,57	346,6	363,2	21,99	172
2	10,0	27,0	30,0	15,0	3,80	377,7	402,3	22,82	214
3	7,0	32,0	30,0	15,0	2,77	379,6	397,4	23,74	181
4	10,0	32,0	30,0	15,0	3,81	353,8	378,4	22,88	233
5	7,0	27,0	50,0	15,0	1,56	351,2	361,5	13,37	173
6	10,0	27,0	50,0	15,0	2,36	366,8	382,2	14,13	205
7	7,0	32,0	50,0	15,0	1,62	360,7	370,9	13,87	176
8	10,0	32,0	50,0	15,0	2,40	343,3	358,6	14,41	218
9	7,0	27,0	30,0	25,0	2,68	358,7	376,2	22,99	143
10	10,0	27,0	30,0	25,0	3,91	342,7	367,9	23,44	179
11	7,0	32,0	30,0	25,0	2,76	341,2	359,2	23,62	152
12	10,0	32,0	30,0	25,0	3,89	369,8	395,0	23,35	179
13	7,0	27,0	50,0	25,0	1,65	346,1	357,3	14,16	143
14	10,0	27,0	50,0	25,0	2,35	366,9	382,2	14,12	177
15	7,0	32,0	50,0	25,0	1,65	335,8	346,9	14,11	151
16	10,0	32,0	50,0	25,0	2,56	375,5	392,4	15,33	183
17	5,5	29,5	40,0	20,0	1,69	384,0	395,3	18,46	141
18	11,5	29,5	40,0	20,0	3,35	361,1	382,7	17,46	213
19	8,5	24,5	40,0	20,0	2,52	354,3	370,7	17,76	175
20	8,5	34,5	40,0	20,0	2,56	375,5	392,1	18,05	188
21	8,5	29,5	20,0	20,0	4,67	359,6	390,0	32,97	187
22	8,5	29,5	60,0	20,0	1,64	347,3	358,3	11,57	172
23	8,5	29,5	40,0	10,0	2,38	342,9	358,0	16,77	223
24	8,5	29,5	40,0	30,0	2,32	337,0	352,4	16,38	152
25	8,5	29,5	40,0	20,0	2,34	352,4	368,1	16,52	180
26	8,5	29,5	40,0	20,0	2,43	364,4	380,5	17,15	181
27	8,5	29,5	40,0	20,0	2,52	357,8	374,6	17,78	179
28	8,5	29,5	40,0	20,0	2,20	363,0	377,6	15,54	176
29	8,5	29,5	40,0	20,0	2,36	352,1	367,8	16,68	175
30	8,5	29,5	40,0	20,0	2,19	333,2	347,8	15,47	172
31	8,5	29,5	40,0	20,0	2,19	354,5	369,1	15,44	174

ANEXO E – Avaliação da qualidade superficial

Experimento	Parâmetros				Qualidade superficial (nota)	
	Va	T	Vs	N	Formação de escória	Aspecto superficial
1	7,0	27,0	30,0	15,0	3	7
2	10,0	27,0	30,0	15,0	5	6
3	7,0	32,0	30,0	15,0	3	10
4	10,0	32,0	30,0	15,0	3	2
5	7,0	27,0	50,0	15,0	3	10
6	10,0	27,0	50,0	15,0	4	9
7	7,0	32,0	50,0	15,0	3	10
8	10,0	32,0	50,0	15,0	3	8
9	7,0	27,0	30,0	25,0	4	9
10	10,0	27,0	30,0	25,0	5	8
11	7,0	32,0	30,0	25,0	3	7
12	10,0	32,0	30,0	25,0	4	4
13	7,0	27,0	50,0	25,0	3	9
14	10,0	27,0	50,0	25,0	4	9
15	7,0	32,0	50,0	25,0	3	10
16	10,0	32,0	50,0	25,0	3	7
17	5,5	29,5	40,0	20,0	3	9
18	11,5	29,5	40,0	20,0	4	6
19	8,5	24,5	40,0	20,0	4	9
20	8,5	34,5	40,0	20,0	3	8
21	8,5	29,5	20,0	20,0	4	8
22	8,5	29,5	60,0	20,0	3	9
23	8,5	29,5	40,0	10,0	3	8
24	8,5	29,5	40,0	30,0	3	8
25	8,5	29,5	40,0	20,0	3	8
26	8,5	29,5	40,0	20,0	3	8
27	8,5	29,5	40,0	20,0	3	7
28	8,5	29,5	40,0	20,0	3	8
29	8,5	29,5	40,0	20,0	3	7
30	8,5	29,5	40,0	20,0	3	7
31	8,5	29,5	40,0	20,0	3	8

ANEXO F – Cálculo das respostas de produtividade

Experimento	Parâmetros				Taxa de fusão (kg/h)	Taxa de deposição (kg/h)	Rendimento (%)
	Va	T	Vs	N			
1	7,0	27,0	30,0	15,0	3,028	2,718	89,7%
2	10,0	27,0	30,0	15,0	4,326	3,881	89,7%
3	7,0	32,0	30,0	15,0	3,028	2,699	89,1%
4	10,0	32,0	30,0	15,0	4,326	3,871	89,5%
5	7,0	27,0	50,0	15,0	3,028	2,773	91,6%
6	10,0	27,0	50,0	15,0	4,326	3,924	90,7%
7	7,0	32,0	50,0	15,0	3,028	2,647	87,4%
8	10,0	32,0	50,0	15,0	4,326	3,822	88,4%
9	7,0	27,0	30,0	25,0	3,028	2,740	90,5%
10	10,0	27,0	30,0	25,0	4,326	3,870	89,5%
11	7,0	32,0	30,0	25,0	3,028	2,743	90,6%
12	10,0	32,0	30,0	25,0	4,326	3,885	89,8%
13	7,0	27,0	50,0	25,0	3,028	2,847	94,0%
14	10,0	27,0	50,0	25,0	4,326	3,901	90,2%
15	7,0	32,0	50,0	25,0	3,028	2,832	93,5%
16	10,0	32,0	50,0	25,0	4,326	3,969	91,7%
17	5,5	29,5	40,0	20,0	2,379	2,204	92,6%
18	11,5	29,5	40,0	20,0	4,975	4,454	89,5%
19	8,5	24,5	40,0	20,0	3,677	3,324	90,4%
20	8,5	34,5	40,0	20,0	3,677	3,311	90,0%
21	8,5	29,5	20,0	20,0	3,677	3,319	90,3%
22	8,5	29,5	60,0	20,0	3,677	3,423	93,1%
23	8,5	29,5	40,0	10,0	3,677	3,242	88,2%
24	8,5	29,5	40,0	30,0	3,677	3,385	92,0%
25	8,5	29,5	40,0	20,0	3,677	3,421	93,0%
26	8,5	29,5	40,0	20,0	3,677	3,380	91,9%
27	8,5	29,5	40,0	20,0	3,677	3,402	92,5%
28	8,5	29,5	40,0	20,0	3,677	3,382	92,0%
29	8,5	29,5	40,0	20,0	3,677	3,388	92,2%
30	8,5	29,5	40,0	20,0	3,677	3,398	92,4%
31	8,5	29,5	40,0	20,0	3,677	3,404	92,6%

ANEXO G – Medição da largura do cordão

Exper.	Parâmetros				Largura do cordão (mm)				Média	Desvio-padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	11,63	11,28	10,99	10,85	11,19	0,345
2	10,0	27,0	30,0	15,0	13,13	12,89	12,81	13,13	12,99	0,164
3	7,0	32,0	30,0	15,0	13,17	12,51	12,57	12,54	12,70	0,317
4	10,0	32,0	30,0	15,0	14,99	15,00	14,67	15,52	15,05	0,352
5	7,0	27,0	50,0	15,0	9,92	9,04	8,96	8,94	9,21	0,473
6	10,0	27,0	50,0	15,0	10,16	10,16	9,63	9,90	9,96	0,254
7	7,0	32,0	50,0	15,0	10,48	9,53	9,44	9,53	9,75	0,491
8	10,0	32,0	50,0	15,0	11,63	11,50	11,71	11,21	11,51	0,219
9	7,0	27,0	30,0	25,0	10,38	10,63	10,16	10,13	10,32	0,235
10	10,0	27,0	30,0	25,0	12,17	11,22	11,65	10,66	11,43	0,639
11	7,0	32,0	30,0	25,0	11,38	11,60	11,13	10,96	11,27	0,282
12	10,0	32,0	30,0	25,0	13,86	13,17	13,10	13,22	13,34	0,354
13	7,0	27,0	50,0	25,0	8,23	7,62	8,19	7,93	7,99	0,281
14	10,0	27,0	50,0	25,0	9,68	8,08	8,56	8,17	8,62	0,732
15	7,0	32,0	50,0	25,0	8,85	8,20	8,37	8,48	8,48	0,277
16	10,0	32,0	50,0	25,0	11,17	10,85	11,20	10,13	10,84	0,499
17	5,5	29,5	40,0	20,0	9,27	9,17	8,74	9,09	9,07	0,231
18	11,5	29,5	40,0	20,0	13,12	11,97	11,96	11,80	12,21	0,612
19	8,5	24,5	40,0	20,0	9,89	9,14	9,73	8,94	9,42	0,459
20	8,5	34,5	40,0	20,0	11,79	12,04	11,78	11,15	11,69	0,377
21	8,5	29,5	20,0	20,0	15,26	15,18	14,64	14,66	14,93	0,332
22	8,5	29,5	60,0	20,0	8,84	8,51	8,22	8,35	8,48	0,268
23	8,5	29,5	40,0	10,0	11,88	11,58	11,74	11,73	11,73	0,122
24	8,5	29,5	40,0	30,0	9,69	9,11	8,48	9,60	9,22	0,558
25	8,5	29,5	40,0	20,0	11,11	10,75	10,68	10,74	10,82	0,196
26	8,5	29,5	40,0	20,0	11,55	10,88	10,25	11,02	10,93	0,537
27	8,5	29,5	40,0	20,0	11,04	10,79	10,68	10,46	10,74	0,241
28	8,5	29,5	40,0	20,0	11,16	10,39	10,50	10,40	10,61	0,367
29	8,5	29,5	40,0	20,0	11,17	10,33	10,63	10,41	10,64	0,376
30	8,5	29,5	40,0	20,0	11,15	10,52	10,28	10,39	10,59	0,386
31	8,5	29,5	40,0	20,0	11,04	10,37	10,21	10,66	10,57	0,364

ANEXO H – Medição da penetração

Exper.	Parâmetros				Penetração (mm)				Média	Desvio-padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	0,98	1,50	1,51	1,51	1,37	0,263
2	10,0	27,0	30,0	15,0	1,27	1,90	1,70	1,77	1,66	0,273
3	7,0	32,0	30,0	15,0	1,35	1,58	1,87	1,96	1,69	0,279
4	10,0	32,0	30,0	15,0	2,02	2,21	2,32	1,36	1,98	0,432
5	7,0	27,0	50,0	15,0	1,76	1,64	1,61	1,58	1,65	0,082
6	10,0	27,0	50,0	15,0	1,70	1,79	1,93	2,33	1,94	0,278
7	7,0	32,0	50,0	15,0	1,35	1,58	1,42	1,80	1,54	0,199
8	10,0	32,0	50,0	15,0	2,09	2,02	2,14	2,46	2,18	0,194
9	7,0	27,0	30,0	25,0	0,97	1,38	1,52	1,14	1,25	0,245
10	10,0	27,0	30,0	25,0	1,20	0,91	0,85	1,04	1,00	0,157
11	7,0	32,0	30,0	25,0	1,00	1,32	1,56	1,41	1,32	0,236
12	10,0	32,0	30,0	25,0	0,86	1,06	1,19	1,29	1,10	0,185
13	7,0	27,0	50,0	25,0	1,19	1,16	1,09	1,01	1,11	0,078
14	10,0	27,0	50,0	25,0	1,54	1,13	1,21	1,02	1,23	0,222
15	7,0	32,0	50,0	25,0	1,54	1,33	1,42	1,19	1,37	0,148
16	10,0	32,0	50,0	25,0	1,78	1,80	1,36	1,60	1,64	0,204
17	5,5	29,5	40,0	20,0	1,63	1,41	1,30	1,18	1,38	0,190
18	11,5	29,5	40,0	20,0	2,04	2,15	2,27	2,11	2,14	0,096
19	8,5	24,5	40,0	20,0	0,89	1,36	1,37	1,19	1,20	0,226
20	8,5	34,5	40,0	20,0	2,15	1,71	1,77	1,83	1,86	0,197
21	8,5	29,5	20,0	20,0	0,84	0,90	1,06	0,99	0,95	0,095
22	8,5	29,5	60,0	20,0	1,48	1,31	1,42	1,53	1,43	0,094
23	8,5	29,5	40,0	10,0	2,02	1,96	2,44	2,30	2,18	0,227
24	8,5	29,5	40,0	30,0	1,35	1,54	0,97	1,28	1,28	0,237
25	8,5	29,5	40,0	20,0	1,87	1,73	1,60	1,64	1,71	0,121
26	8,5	29,5	40,0	20,0	1,62	1,78	1,75	1,74	1,72	0,074
27	8,5	29,5	40,0	20,0	1,46	1,81	1,62	1,60	1,62	0,145
28	8,5	29,5	40,0	20,0	1,82	1,74	1,87	1,77	1,80	0,059
29	8,5	29,5	40,0	20,0	1,36	1,67	1,47	1,44	1,49	0,132
30	8,5	29,5	40,0	20,0	1,32	1,53	1,57	1,54	1,49	0,114
31	8,5	29,5	40,0	20,0	1,34	1,53	1,66	1,49	1,50	0,132

ANEXO I – Medição do reforço

Exper.	Parâmetros				Reforço (mm)				Média	Desvio-padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	2,67	2,63	2,63	2,58	2,63	0,037
2	10,0	27,0	30,0	15,0	3,08	3,12	2,98	3,28	3,12	0,124
3	7,0	32,0	30,0	15,0	2,75	2,52	2,38	2,34	2,50	0,184
4	10,0	32,0	30,0	15,0	2,61	2,83	2,69	2,98	2,78	0,163
5	7,0	27,0	50,0	15,0	2,16	2,02	2,17	2,31	2,17	0,121
6	10,0	27,0	50,0	15,0	2,63	2,84	2,63	2,57	2,67	0,117
7	7,0	32,0	50,0	15,0	2,09	1,97	2,18	2,02	2,06	0,090
8	10,0	32,0	50,0	15,0	2,16	2,44	2,52	2,58	2,42	0,185
9	7,0	27,0	30,0	25,0	3,34	2,79	2,80	2,56	2,87	0,330
10	10,0	27,0	30,0	25,0	3,63	3,59	3,79	3,36	3,59	0,179
11	7,0	32,0	30,0	25,0	2,83	2,80	2,83	2,94	2,85	0,063
12	10,0	32,0	30,0	25,0	3,34	3,21	3,24	2,92	3,18	0,181
13	7,0	27,0	50,0	25,0	2,59	2,48	2,56	2,59	2,55	0,053
14	10,0	27,0	50,0	25,0	2,74	2,88	2,77	2,79	2,80	0,062
15	7,0	32,0	50,0	25,0	2,46	2,40	2,28	2,31	2,36	0,083
16	10,0	32,0	50,0	25,0	2,45	2,60	2,48	2,86	2,60	0,186
17	5,5	29,5	40,0	20,0	1,91	2,35	2,25	2,32	2,21	0,205
18	11,5	29,5	40,0	20,0	3,24	3,23	2,93	2,82	3,06	0,212
19	8,5	24,5	40,0	20,0	3,25	2,83	2,76	3,26	3,03	0,264
20	8,5	34,5	40,0	20,0	2,51	2,46	2,46	2,41	2,46	0,041
21	8,5	29,5	20,0	20,0	3,59	3,53	3,30	3,40	3,45	0,130
22	8,5	29,5	60,0	20,0	2,29	2,23	2,26	2,22	2,25	0,036
23	8,5	29,5	40,0	10,0	2,59	2,67	2,57	2,60	2,61	0,042
24	8,5	29,5	40,0	30,0	2,87	2,95	2,82	2,92	2,89	0,061
25	8,5	29,5	40,0	20,0	2,33	2,56	2,72	2,77	2,60	0,197
26	8,5	29,5	40,0	20,0	2,72	2,36	2,66	2,64	2,59	0,162
27	8,5	29,5	40,0	20,0	2,66	2,60	2,65	2,71	2,65	0,043
28	8,5	29,5	40,0	20,0	2,58	2,61	2,43	2,37	2,50	0,115
29	8,5	29,5	40,0	20,0	2,89	2,56	2,18	2,84	2,62	0,327
30	8,5	29,5	40,0	20,0	2,62	2,77	2,66	2,40	2,61	0,158
31	8,5	29,5	40,0	20,0	2,47	2,69	2,42	2,64	2,56	0,131

ANEXO J – Medição da área de penetração

Exper.	Parâmetros				Área de penetração (mm ²)				Média	Desvio-padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	6,34	8,23	8,58	7,31	7,62	1,006
2	10,0	27,0	30,0	15,0	8,39	10,71	9,99	10,68	9,94	1,089
3	7,0	32,0	30,0	15,0	9,86	9,39	10,59	9,91	9,94	0,493
4	10,0	32,0	30,0	15,0	15,21	15,43	15,52	11,49	14,41	1,952
5	7,0	27,0	50,0	15,0	8,48	7,29	6,81	7,13	7,43	0,728
6	10,0	27,0	50,0	15,0	9,71	9,06	9,24	9,67	9,42	0,320
7	7,0	32,0	50,0	15,0	7,07	8,06	7,58	8,65	7,84	0,672
8	10,0	32,0	50,0	15,0	12,24	11,90	12,95	14,90	13,00	1,339
9	7,0	27,0	30,0	25,0	4,13	7,50	7,36	5,63	6,15	1,593
10	10,0	27,0	30,0	25,0	8,75	5,64	6,49	6,24	6,78	1,360
11	7,0	32,0	30,0	25,0	6,49	7,44	7,36	6,51	6,95	0,519
12	10,0	32,0	30,0	25,0	8,59	9,32	7,97	8,98	8,72	0,577
13	7,0	27,0	50,0	25,0	4,88	4,27	5,32	3,93	4,60	0,620
14	10,0	27,0	50,0	25,0	6,40	5,16	5,77	4,16	5,37	0,952
15	7,0	32,0	50,0	25,0	5,78	4,71	5,43	5,39	5,33	0,447
16	10,0	32,0	50,0	25,0	7,35	8,34	7,97	8,47	8,03	0,501
17	5,5	29,5	40,0	20,0	6,97	5,49	5,51	5,52	5,87	0,733
18	11,5	29,5	40,0	20,0	10,80	12,02	11,55	11,63	11,50	0,510
19	8,5	24,5	40,0	20,0	4,73	6,89	7,20	5,40	6,05	1,183
20	8,5	34,5	40,0	20,0	11,12	11,02	9,40	9,54	10,27	0,926
21	8,5	29,5	20,0	20,0	8,49	8,25	9,65	7,84	8,56	0,777
22	8,5	29,5	60,0	20,0	6,76	6,37	5,86	7,70	6,67	0,777
23	8,5	29,5	40,0	10,0	11,86	12,31	14,88	14,15	13,30	1,446
24	8,5	29,5	40,0	30,0	5,76	6,94	4,90	5,68	5,82	0,840
25	8,5	29,5	40,0	20,0	8,31	9,38	7,72	8,19	8,40	0,700
26	8,5	29,5	40,0	20,0	7,99	9,23	8,31	9,41	8,74	0,695
27	8,5	29,5	40,0	20,0	7,84	9,81	8,15	8,13	8,48	0,898
28	8,5	29,5	40,0	20,0	9,41	8,70	8,78	8,21	8,77	0,494
29	8,5	29,5	40,0	20,0	8,22	8,51	7,37	7,40	7,88	0,579
30	8,5	29,5	40,0	20,0	8,12	8,63	7,99	8,08	8,20	0,290
31	8,5	29,5	40,0	20,0	7,51	8,17	8,99	7,38	8,01	0,737

ANEXO K – Medição da área total

Exper.	Parâmetros				Área total (mm ²)				Média	Desvio-padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	28,99	29,47	29,27	27,46	28,79	0,914
2	10,0	27,0	30,0	15,0	36,87	38,69	37,33	40,90	38,45	1,806
3	7,0	32,0	30,0	15,0	34,46	30,87	31,04	30,20	31,64	1,911
4	10,0	32,0	30,0	15,0	45,19	47,76	45,63	45,94	46,13	1,132
5	7,0	27,0	50,0	15,0	22,14	19,39	19,83	20,59	20,49	1,210
6	10,0	27,0	50,0	15,0	27,84	29,24	27,28	27,58	27,99	0,870
7	7,0	32,0	50,0	15,0	21,76	20,90	20,73	21,16	21,13	0,450
8	10,0	32,0	50,0	15,0	29,96	30,61	32,36	33,43	31,59	1,593
9	7,0	27,0	30,0	25,0	29,14	28,28	27,72	24,93	27,52	1,820
10	10,0	27,0	30,0	25,0	40,28	35,69	39,29	32,49	36,93	3,562
11	7,0	32,0	30,0	25,0	30,59	30,31	28,53	27,91	29,34	1,318
12	10,0	32,0	30,0	25,0	44,59	39,91	38,66	36,51	39,92	3,418
13	7,0	27,0	50,0	25,0	19,07	17,09	18,82	18,65	18,41	0,894
14	10,0	27,0	50,0	25,0	25,17	22,39	23,15	20,94	22,91	1,764
15	7,0	32,0	50,0	25,0	20,44	18,21	18,02	17,54	18,55	1,292
16	10,0	32,0	50,0	25,0	26,85	26,56	25,88	27,15	26,61	0,542
17	5,5	29,5	40,0	20,0	18,07	19,30	18,57	18,70	18,66	0,502
18	11,5	29,5	40,0	20,0	40,61	38,66	35,92	34,25	37,36	2,826
19	8,5	24,5	40,0	20,0	27,87	25,93	25,94	26,95	26,67	0,930
20	8,5	34,5	40,0	20,0	30,56	29,05	28,57	27,21	28,85	1,381
21	8,5	29,5	20,0	20,0	48,03	47,85	43,91	45,00	46,20	2,060
22	8,5	29,5	60,0	20,0	19,48	18,22	18,00	18,81	18,62	0,664
23	8,5	29,5	40,0	10,0	31,40	33,23	33,52	33,23	32,85	0,973
24	8,5	29,5	40,0	30,0	24,94	24,75	21,95	24,50	24,03	1,404
25	8,5	29,5	40,0	20,0	26,50	26,82	26,81	28,15	27,07	0,736
26	8,5	29,5	40,0	20,0	29,21	26,43	26,49	28,50	27,66	1,413
27	8,5	29,5	40,0	20,0	27,98	28,38	26,49	26,96	27,45	0,878
28	8,5	29,5	40,0	20,0	28,74	26,66	26,41	25,08	26,72	1,513
29	8,5	29,5	40,0	20,0	29,03	25,52	24,05	26,77	26,34	2,108
30	8,5	29,5	40,0	20,0	27,15	27,19	26,41	24,89	26,41	1,074
31	8,5	29,5	40,0	20,0	26,52	26,05	25,16	25,78	25,88	0,564

ANEXO L – Cálculo da diluição

Exper.	Parâmetros				Diluição				Média	Desvio-padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	21,87%	27,92%	29,33%	26,63%	26,44%	0,032
2	10,0	27,0	30,0	15,0	22,74%	27,68%	26,75%	26,12%	25,82%	0,022
3	7,0	32,0	30,0	15,0	28,61%	30,43%	34,11%	32,82%	31,49%	0,025
4	10,0	32,0	30,0	15,0	33,66%	32,30%	34,01%	25,01%	31,25%	0,042
5	7,0	27,0	50,0	15,0	38,29%	37,63%	34,35%	34,62%	36,22%	0,020
6	10,0	27,0	50,0	15,0	34,86%	30,97%	33,88%	35,06%	33,69%	0,019
7	7,0	32,0	50,0	15,0	32,51%	38,56%	36,55%	40,86%	37,12%	0,035
8	10,0	32,0	50,0	15,0	40,85%	38,89%	40,02%	44,55%	41,08%	0,025
9	7,0	27,0	30,0	25,0	14,19%	26,51%	26,55%	22,57%	22,46%	0,058
10	10,0	27,0	30,0	25,0	21,73%	15,81%	16,52%	19,22%	18,32%	0,027
11	7,0	32,0	30,0	25,0	21,20%	24,53%	25,79%	23,33%	23,71%	0,020
12	10,0	32,0	30,0	25,0	19,26%	23,35%	20,63%	24,58%	21,96%	0,024
13	7,0	27,0	50,0	25,0	25,57%	24,98%	28,24%	21,04%	24,96%	0,030
14	10,0	27,0	50,0	25,0	25,41%	23,03%	24,91%	19,87%	23,31%	0,025
15	7,0	32,0	50,0	25,0	28,29%	25,88%	30,16%	30,76%	28,77%	0,022
16	10,0	32,0	50,0	25,0	27,37%	31,38%	30,80%	31,21%	30,19%	0,019
17	5,5	29,5	40,0	20,0	38,58%	28,46%	29,66%	29,53%	31,56%	0,047
18	11,5	29,5	40,0	20,0	26,59%	31,09%	32,16%	33,96%	30,95%	0,031
19	8,5	24,5	40,0	20,0	16,97%	26,56%	27,77%	20,04%	22,84%	0,052
20	8,5	34,5	40,0	20,0	36,39%	37,94%	32,91%	35,07%	35,58%	0,021
21	8,5	29,5	20,0	20,0	17,68%	17,25%	21,98%	17,42%	18,58%	0,023
22	8,5	29,5	60,0	20,0	34,70%	34,96%	32,55%	40,92%	35,78%	0,036
23	8,5	29,5	40,0	10,0	37,76%	37,04%	44,39%	42,58%	40,44%	0,036
24	8,5	29,5	40,0	30,0	23,10%	28,03%	22,33%	23,17%	24,16%	0,026
25	8,5	29,5	40,0	20,0	31,35%	34,96%	28,78%	29,11%	31,05%	0,028
26	8,5	29,5	40,0	20,0	27,34%	34,93%	31,37%	33,03%	31,67%	0,032
27	8,5	29,5	40,0	20,0	28,02%	34,58%	30,76%	30,15%	30,88%	0,027
28	8,5	29,5	40,0	20,0	32,74%	32,63%	33,23%	32,72%	32,83%	0,003
29	8,5	29,5	40,0	20,0	28,33%	33,35%	30,65%	27,63%	29,99%	0,026
30	8,5	29,5	40,0	20,0	29,89%	31,74%	30,23%	32,48%	31,09%	0,012
31	8,5	29,5	40,0	20,0	28,32%	31,36%	35,73%	28,65%	31,02%	0,034