

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**Luciano Pinho Nilo Júnior**

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDA  
MIG/MAG PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA  
AUTOMOBILÍSTICA ATRAVÉS DA  
UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DO PROJETO E  
ANÁLISE DE EXPERIMENTOS**

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, Ph.D.

**Itajubá, Novembro de 2003**

NILO Jr., Luciano Pinho. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. Itajubá: UNIFEI, 2003. 111p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá).

Palavras-Chaves: Otimização - Experimentação - Solda MIG/MAG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**Luciano Pinho Nilo Júnior**

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDA  
MIG/MAG PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA  
AUTOMOBILÍSTICA ATRAVÉS DA  
UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DO PROJETO E  
ANÁLISE DE EXPERIMENTOS**

**Banca Examinadora:**

Prof. Messias Borges Silva, Dr.

Prof. Pedro Paulo Balestrassi, Dr.

Prof. Sebastião Carlos da Costa, PhD (Orientador)

**Itajubá, Novembro de 2003**

*À minha esposa Mônica, à minha filha  
Gabriela, aos meus pais, Luciano e  
Avany e aos meus avós, Rubens, Dilza,  
Álvaro e Eulália.*

## AGRADECIMENTOS

Manifesto meus mais sinceros agradecimentos:

- A Deus, por tudo obtido;
- À minha família, base de apoio para a minha formação pessoal e profissional;
- Ao professor Sebastião Carlos da Costa, pela valiosa orientação e pela ajuda sempre amiga nos momentos de dificuldades;
- Aos professores e funcionários do Departamento de Produção, em especial ao Professor Luiz Fernando Barca, pela ajuda e orientação em vários momentos;
- Ao Engenheiro José Roberto França Quintanilha, pelo inicial apoio para que a pesquisa pudesse ser realizada;
- Ao Engenheiro Alexandre Amaral de Almeida e Sebastião Ribeiro Filho, pela ajuda na elaboração inicial do trabalho;
- Ao colega Sinésio Rodrigues Pinto, pela soldagem dos corpos de prova;
- Aos colegas Joaquim Antônio da Silva Soares, José Camilo da Silva e o saudoso Luiz Antônio Rossetti, pela preparação e análise dos corpos de prova;
- A todos os colegas e funcionários da MAXION Componentes Estruturais que, direta ou indiretamente, ajudaram e apoiaram a realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

<b>Dedicatória</b>	iii
<b>Agradecimentos</b>	iv
<b>Sumário</b>	v
<b>Resumo</b>	vii
<i>Abstract</i>	viii
<b>Lista de Figuras</b>	ix
<b>Lista de Tabelas</b>	xii
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	xiv
<b>Lista de Símbolos</b>	xv
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1. Justificativa do Tema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Contribuição do Trabalho	2
1.4. Limitações	2
1.5. Estrutura do Trabalho	3
<b>2. O PROCESSO DE SOLDAGEM MIG / MAG</b>	4
2.1. Princípios e Fundamentos do Processo	4
2.2. Vantagens e Limitações	6
2.3. Variáveis do Processo de Soldagem MIG/MAG	7
2.4. Tipos de Transferências Metálicas	15
2.5. Trabalhos de Otimização nesta Área	18
<b>3. A TÉCNICA DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS</b>	20
3.1. Considerações Iniciais	20
3.2. Principais Passos na Experimentação	21
3.3. Técnicas do Projeto e Análise de Experimentos mais Utilizadas	23
3.4. A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR)	24
3.4.1. Central Composite Design (CCD)	26
3.4.2. Metodologia da Análise de Variância (ANOVA)	28

<b>4. EXPERIMENTAÇÃO–PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG EM RODAS DE AÇO</b>	<b>31</b>
4.1. Introdução	31
4.2. O Produto Roda	31
4.3. Características Fundamentais na Qualidade da Solda em Rodas sem Câmara	34
4.4. O Processo de Soldagem e os seus Parâmetros	36
4.5. Determinação dos Parâmetros do Experimento	38
4.6. Determinação dos Níveis dos Parâmetros e Escolha da Técnica de Experimentação	41
4.7. Procedimento Experimental	44
4.7.1. Execução das Corridas	46
4.7.2. Determinação das Respostas	50
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>51</b>
5.1. Resultados Obtidos	51
5.2. Efeitos dos Parâmetros de Entrada	59
5.2.1. Efeitos dos Parâmetros para Penetração no Aro ( $P_a$ )	59
5.2.2. Efeitos dos Parâmetros para Penetração no Disco ( $P_d$ )	63
5.2.3. Efeitos dos Parâmetros para o Índice de Convexidade (IC)	65
5.2.4. Efeitos dos Parâmetros para o Ângulo do Pé de Solda ( $A_{ps}$ )	68
5.2.5. Efeitos dos Parâmetros para a Área de Solda (AS)	71
5.3. Análise de Resíduos	74
5.4. Otimização Geral do Processo	77
5.5. Confirmação das Respostas e Testes de Durabilidade	79
5.6. Análise Comparativa e Econômica	83
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>86</b>
6.1. Conclusões Gerais	86
6.2. Recomendações para Trabalhos Futuros	87

## **ANEXOS**

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade a proposição de um modelo matemático de otimização de um processo de solda MIG/MAG em uma indústria fabricante de rodas pesadas em aço de baixa liga para caminhões e ônibus. A otimização do processo foi obtida através da utilização da técnica do Projeto e Análise de Experimentos, mais precisamente da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Foram realizadas 31 corridas de soldagem utilizando como corpos de provas rodas padrão para pneu sem câmara cujo formato atualmente é o mais utilizado no mercado interno e externo. Através da revisão bibliográfica e características e restrições pertinentes ao processo, bem como os objetivos finais de aumento da qualidade do cordão com diminuição do tempo de ciclo e quantidade gasta de arame de solda, foram determinados os parâmetros de entrada: voltagem, corrente, ângulo longitudinal e velocidade de soldagem. As respostas, baseando-se nas especificações internas do cordão de solda e também em aspectos econômicos, foram: penetração no aro, penetração no disco, índice de convexidade, ângulo do pé de solda e área de solda. Através do modelo obtido, observou-se que, de uma forma geral, todos os parâmetros de entrada apresentam, isoladamente ou interados, influência significativa nas respostas e foi possível determinar a otimização do processo como um todo, levando-se em consideração aspectos técnicos e econômicos.

## ABSTRACT

This work was developed in order to propose a welding GMAW optimise mathematical model in a company who manufactures heavy truck and buses wheels in low carbon steel. This optimisation was achieved by Design of Experiments application, using the Response Surface Methodology technique. The experiment had 31 welding runs and it was used standard tubeless wheels, which is the most popular model in internal and export market. The input parameters (voltage, current, longitudinal angle and welding speed) were chosen by literature review and process characteristics and constraints, as well as the quality bead improvement added production cycle and wire rate decrease. The responses (rim and disc penetration, convexity index, base angle and welding area) were determined based on the weld bead internal specifications and economic aspects. The final mathematical models show, in a general way, that all input parameters (isolated or combined) have influence in the responses studied. Therefore it was possible to obtain the total process optimisation based on technical and economics approaches.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Equipamento para a soldagem MIG/MAG	4
Figura 2.2	Esquema do processo de soldagem MIG/MAG	5
Figura 2.3	Velocidades ótimas de soldagem para diferentes gases utilizados no processo MIG/MAG	9
Figura 2.4	Influência do “stick-out” na geometria do cordão de solda	10
Figura 2.5	Influência do diâmetro do eletrodo na penetração do cordão de solda	11
Figura 2.6	Influência dos parâmetros nas características geométricas do cordão: (a) diâmetro - d; (b) corrente - I; (c) voltagem - V; (d) velocidade de soldagem - $V_s$	11
Figura 2.7	Influência do posicionamento da tocha	14
Figura 2.8	Tipos de transferências entre o eletrodo e o metal de base e seus sinais de tensão e corrente característicos: (a) transferência por curto-circuito, (b) transferência globular e (c) transferência por “spray”	15
Figura 3.1	Correlação entre variáveis de entrada e saída de um processo	21
Figura 3.2	Exemplo de gráfico de superfície de resposta para $x_1$ , $x_2$	25
Figura 4.1	Roda para pneu com câmara – visão geral e corte do perfil	32
Figura 4.2	Roda para pneu sem câmara – visão geral e corte do perfil	32
Figura 4.3	Detalhes dos cordões de solda em corte para rodas sem e com câmara	33
Figura 4.4	Desenho esquemático das principais características do cordão de solda	35
Figura 4.5	Estação de solda MIG/MAG nº 01 com a roda no posicionamento inicial	36
Figura 4.6	Controlador HOBART	37
Figura 4.7	Diagrama 6M para identificação das principais causas para o cordão de Solda	37
Figura 4.8	Método de variação do ângulo longitudinal	42
Figura 4.9	Referências para os ângulos longitudinal e transversal	43
Figura 4.10	Controlador FOTON 5 – utilizado na variação da velocidade de solda	43
Figura 4.11	Esquema experimental com indicação da altura do disco (H)	46
Figura 4.12	Disposição dos corpos de prova na roda	48
Figura 4.13	Cordão de solda da corrida nº 19	48
Figura 4.14	Termômetro RAYTEK PM Plus e medição da junta antes da solda	49
Figura 4.15	Exemplo de análise macrográfica com o software IMAGE PRO PLUS	50

Figura 5.1	Efeito dos parâmetros na penetração do aro: (a) Tensão; (b) Corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal.	60
Figura 5.2	Efeito da interação $I \times V_s$ nos parâmetros para penetração do aro: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	61
Figura 5.3	Efeito da interação $V_s \times A_L$ nos parâmetros para penetração do aro: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	62
Figura 5.4	Efeito da interação $V \times A_L$ nos parâmetros para penetração do aro: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	62
Figura 5.5	Efeito da abrangência do cordão na penetração do disco	63
Figura 5.6	Efeito dos parâmetros na penetração no disco: (a) voltagem; (b) corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal	64
Figura 5.7	Efeito dos parâmetros no índice de convexidade: (a) voltagem; (b) corrente; (c) ângulo longitudinal	66
Figura 5.8	Efeito da interação $V \times A_L$ nos parâmetros para índice de convexidade IC: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	67
Figura 5.9	Efeito da interação $I \times V$ nos parâmetros para índice de convexidade IC: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	67
Figura 5.10	Efeito dos parâmetros no ângulo do pé de solda: (a) voltagem; (b) corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal	69
Figura 5.11	Efeito da interação $I \times V$ nos parâmetros para o ângulo do pé de solda Aps: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	70
Figura 5.12	Efeito da interação $I \times A_L$ nos parâmetros para o ângulo do pé de solda Aps: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	70
Figura 5.13	Efeito dos parâmetros na área de solda: (a) voltagem; (b) corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal	71
Figura 5.14	Efeito da interação $V \times A_L$ nos parâmetros para a área de solda AS: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	72
Figura 5.15	Efeito da interação $I \times V_s$ nos parâmetros para a área de solda AS: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	73
Figura 5.16	Efeito da interação $I \times A_L$ nos parâmetros para a área de solda AS: (a) gráfico; Superfície de resposta (b)	73
Figura 5.17	Análise de resíduos para a penetração no aro	74
Figura 5.18	Análise de resíduos para a penetração no disco	75
Figura 5.19	Análise de resíduos para o índice de convexidade	75

Figura 5.20	Análise de resíduos para o ângulo do pé de solda	76
Figura 5.21	Análise de resíduos para a área de solda	76
Figura 5.22	Otimização das respostas $P_a$ , $P_d$ e $A_{ps}$ para faixas preestabelecidas	78
Figura 5.23	Máquina de testes de fadiga do disco SCHENCK-PEGASUS	80
Figura 5.24	Máquina de testes de compressão MAXION	81
Figura 5.25	Macrografia da roda otimizada	83
Figura 5.26	Macrografia das soldas: otimizada, normal e norte-americana	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Corrente de transição globular / spray para arames de aço	13
Tabela 3.1	Passos para a condução de um experimento	22
Tabela 3.2	Principais técnicas de análise de experimentos e características Fundamentais	23
Tabela 3.3	Descrição das funções para modelos de primeira e segunda ordem	25
Tabela 3.4	Ilustração dos fatores, <i>star points</i> e <i>center points</i> em um CCD	26
Tabela 3.5	Descrição dos tipos de CCD	27
Tabela 3.6	Valores de alfa ( $\alpha$ ) para experimentos com alguns n° fatores	28
Tabela 3.7	Exemplo de ANOVA para um determinado modelo obtido através do MINITAB	29
Tabela 3.8	Seqüência da aplicação do método ANOVA em um experimento	30
Tabela 4.1	Principais características que afetam a qualidade do cordão de solda	34
Tabela 4.2	Hipóteses básicas para os parâmetros de estudo e respectivos efeitos	40
Tabela 4.3	Parâmetros mantidos constantes no experimento	41
Tabela 4.4	Limites de variação dos parâmetros escolhidos	42
Tabela 4.5	Composição química do aço dos componentes aro e disco da junta de solda	45
Tabela 4.6	Matriz experimental com a ordem utilizada nas corridas	47
Tabela 4.7	Testes para cada roda	49
Tabela 5.1	Resultados obtidos no experimento	52
Tabela 5.2	Coefficientes calculados através da análise de regressão	53
Tabela 5.3	Modelos matemáticos completos em suas formas finais	54
Tabela 5.4	Valores obtidos nos testes ANOVA de adequação dos modelos Matemáticos	54
Tabela 5.5	Valores de $R^2$ (ajustado) e erros padrão (E) para os modelos completos	55
Tabela 5.6	Significância (P) dos coeficientes dos modelos completos (obs.- valores em negrito foram aqueles considerados significativos na resposta em questão)	55
Tabela 5.7	Coefficientes calculados para o modelo matemático reduzido (Obs.: * <i>Coefficiente eliminado</i> )	56
Tabela 5.8	Modelos matemáticos reduzidos em suas formas finais	57

Tabela 5.9	Valores de $R^2$ (ajustado), erros padrão e P para os modelos reduzidos	57
Tabela 5.10	Valores de $R^2$ (ajustado) e erros padrão para os modelos completo e reduzido	58
Tabela 5.11	Valores de $P_{value}$ para os tipos de regressão nos modelos reduzidos	58
Tabela 5.12	Tempos de ciclo para cada faixa de velocidade e circunferência do cordão	77
Tabela 5.13	Velocidade linear de soldagem (m / min) para as faixas de velocidade	77
Tabela 5.14	Faixas desejadas para as respostas do cordão de solda	78
Tabela 5.15	Faixas de trabalho para as respostas desejadas no cordão de solda	79
Tabela 5.16	Resultados obtidos na soldagem otimizada	79
Tabela 5.17	Parâmetros para o cálculo dos testes de fadiga e compressão	82
Tabela 5.18	Parâmetros dos testes de fadiga e compressão	82
Tabela 5.19	Resultados dos testes de fadiga e compressão	82
Tabela 5.20	Resultados das soldas: otimizada, normal, norte-americana	84
Tabela 5.21	Análise econômica para solda normal e solda média	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	-	American Iron and Steel Institute
ALAPA	-	Associação Latino Americana de Pneus e Aros
ANOVA	-	Análise de Variância
CCC	-	Central Composite Design - Circunscrito
CCD	-	Central Composite Design
CCF	-	Central Composite Design – Face Centrada
CCI	-	Central Composite Design - Inscrito
DOE	-	Design of Experiments
ETRTO	-	European Tyre and Rim Technical Organisation
EUWA	-	Association of European Wheel Manufacturers
FBTS	-	Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
GMAW	-	Gas Metal Arc Welding
ISO	-	International Standard Organization
JIS	-	Japanese Industrial Standard
MIG / MAG	-	Gas Metal Inert / Gas Metal Active
MSR	-	Metodologia da Superfície de Resposta
NBR	-	Norma Brasileira
SAE	-	Society of Automotive Engineers
TIG	-	Tungsten Inert Gas
TRA	-	Tire and Rim Association
TS	-	Technical Specification
UNIFEI	-	Universidade Federal de Itajubá

# LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
°	graus
A	ampère
A <sub>L</sub>	ângulo longitudinal
A <sub>ps</sub>	ângulo do pé de solda
Ar	argônio
AS	área da solda
C	carbono
cm	centímetro
CO <sub>2</sub>	gás carbônico
d	off-set
E	erro padrão
F	teste de significância
f	frequência
g	grama
Hz	Hertz
I	corrente de soldagem
I <sub>c</sub>	índice de convexidade
kgf	quilograma força
kN.m	momento de carga
L	carga
l/min	vazão
m	metro
M	momento de teste
m/min	velocidade
min	minuto
mm	milímetro
Mn	manganês
O <sub>2</sub>	gás oxigênio
°C	graus celsius
P	fósforo
P <sub>a</sub>	penetração no aro

$P_d$	penetração no disco
ppm	parte por milhão
$P_{value}$	probabilidade
$r$	distância ao topo
$R$	raio
$R^2$	coeficiente de determinação
$S$	fator de aceleração
$S$	segundo
$Si$	silício
$slr$	raio estático de carga
$u$	coeficiente de atrito
$V$	volt
$V$	voltagem
$V_s$	velocidade de soldagem
$w$	largura do cordão
$\omega$	velocidade angular

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. JUSTIFICATIVA DO TEMA

Atualmente, as empresas vêm buscando continuamente a melhoria de processos, no que diz respeito tanto à capacitação quanto aos aspectos econômicos (produtividade). Com isso, há a necessidade de um total conhecimento destes processos, a fim de se poder tomar decisões que viabilizem tais objetivos.

A falta de planejamento muitas vezes é a causa do insucesso de uma investigação, e no entanto raros são os pesquisadores que pensam em estatística antes de realizar seus experimentos. Em geral eles costumam achar que a análise dos seus dados, não importa como tenham sido obtidos, eventualmente levará sua pesquisa a um bom termo. Havendo dificuldades, pensam eles, basta recorrer a um entendido nessas coisas que o problema estará resolvido (Neto, Scarminio e Bruns, 1995).

Sendo assim, através da utilização da técnica do Projeto e Análise de Experimentos, há a aplicação de um método de pesquisa que permite a utilização de ferramentas estatísticas, o que fará com que o processo seja melhor entendido e as melhorias desejadas sejam viabilizadas.

De posse de todos estes fatos, o presente trabalho vem propor uma melhoria de um processo de soldagem MIG/MAG em uma indústria através da aplicação da técnica do Projeto e Análise de Experimentos, baseando-se na técnica de Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Montgomery (1991) afirma que esta metodologia é bastante utilizada na otimização de respostas afetadas por diversas variáveis. Além de melhorias no processo, o trabalho busca ainda aumentar o conhecimento do mesmo, melhorias da qualidade da solda no que diz respeito aos aspectos técnicos, viabilizar o aumento da produtividade do processo, utilizando-se das relações obtidas através das análises e também a disseminação da técnica do Projeto e Análise de Experimentos na indústria em questão.

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho apresenta como objetivo principal a proposição de um método de otimizar um processo de solda automático MIG/MAG, através da verificação da influência dos fatores tensão, intensidade de corrente, ângulo longitudinal da tocha e velocidade de soldagem, utilizando-se da experimentação.

Como objetivos específicos, este trabalho pretende:

- Aumentar o conhecimento do processo;
- Melhorar a qualidade da solda, no que diz respeito a aspectos técnicos (penetração / resistência);
- Viabilizar o aumento da produtividade do processo, utilizando-se das relações obtidas através das análises;
- Disseminação da técnica do Projeto e Análise de Experimentos na indústria onde será proposta a otimização do processo.

## 1.3. CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho pretende contribuir no campo da indústria, no que diz respeito à utilização de técnicas estruturadas e científicas na resolução de problemas e otimização de processos, em contraposição ao empirismo. Pretende-se mostrar que a resolução de problemas de forma estruturada pode perfeitamente suprir às necessidades da indústria, de maneira eficiente e eficaz, alcançando resultados de uma forma relativamente rápida e bastante satisfatória.

## 1.4. LIMITAÇÕES

Aplicação da técnica do Projeto e Análise de Experimentos em um processo automático de solda MIG/MAG em aços de baixa liga em uma indústria do setor de auto-peças (fabricante de rodas de aço), variando-se os seguintes parâmetros de entrada: voltagem, amperagem, velocidade de soldagem e ângulo longitudinal da tocha. Como respostas, o foco foi direcionado às especificações relacionadas à resistência do cordão de solda, que tem relação direta à segurança do produto e à produtividade do processo. São elas: Penetração no aro e no disco, Índice de Convexidade, Ângulo do Pé de Solda e Área de Solda.

## 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

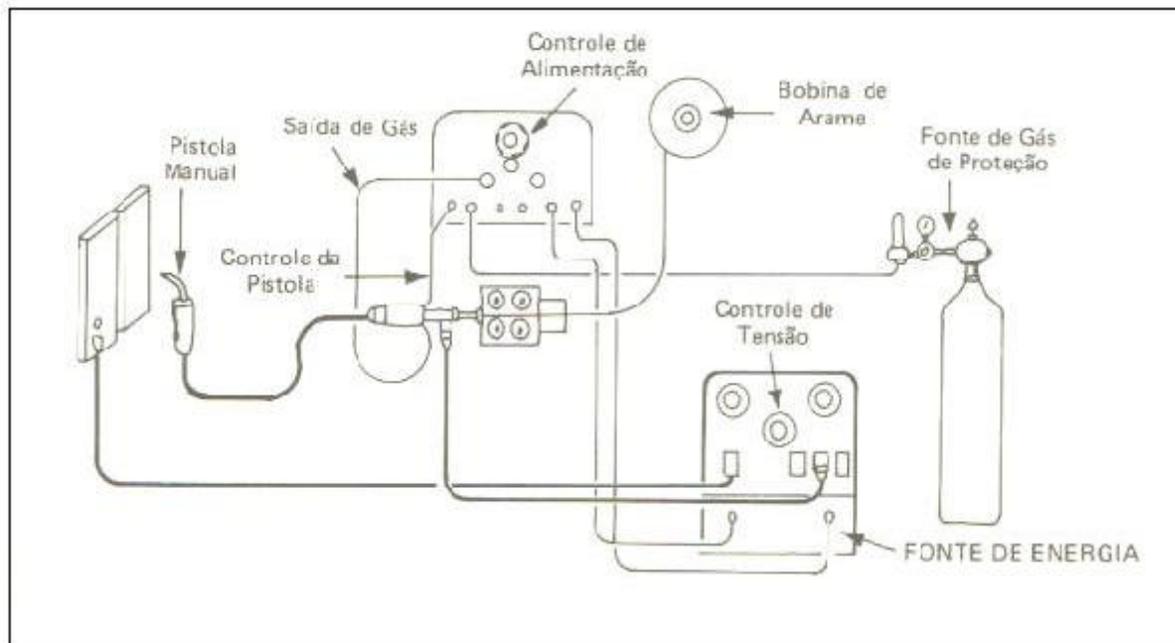
- No **primeiro capítulo**, apresentou-se a introdução do trabalho, bem como os objetivos principais e específicos. Além disso, foram abordadas a contribuição e limitações do trabalho, além da organização do texto.
- O **segundo capítulo** procurou apresentar de forma simplificada o processo de soldagem MIG / MAG, buscando definir o processo em si, aplicações e as variáveis principais e secundárias que influenciam o processo.
- No **terceiro capítulo**, pretendeu-se abordar as principais técnicas do projeto e análise de experimentos, no que diz respeito às principais aplicações, limitações, vantagens e desvantagens. Devido a um grande número de trabalhos já publicados, onde há uma explicação matemática mais profunda da técnica, não foi dada ênfase na dedução de fórmulas e teorias, mas sim na aplicação propriamente dita da técnica, objetivando uma maior contribuição científica.
- O **quarto capítulo** descreveu a experimentação, mostrando o processo e as variáveis a serem verificadas, além de definir a técnica do Projeto e Análise de Experimento utilizada, justificando o porquê desta utilização dentre as diversas técnicas existentes.
- O **quinto capítulo** apresentou os resultados obtidos e toda a análise sobre os mesmos.
- As conclusões finais e recomendações foram apresentados no **sexto capítulo**.

## CAPÍTULO 2

### O PROCESSO DE SOLDAGEM MIG / MAG

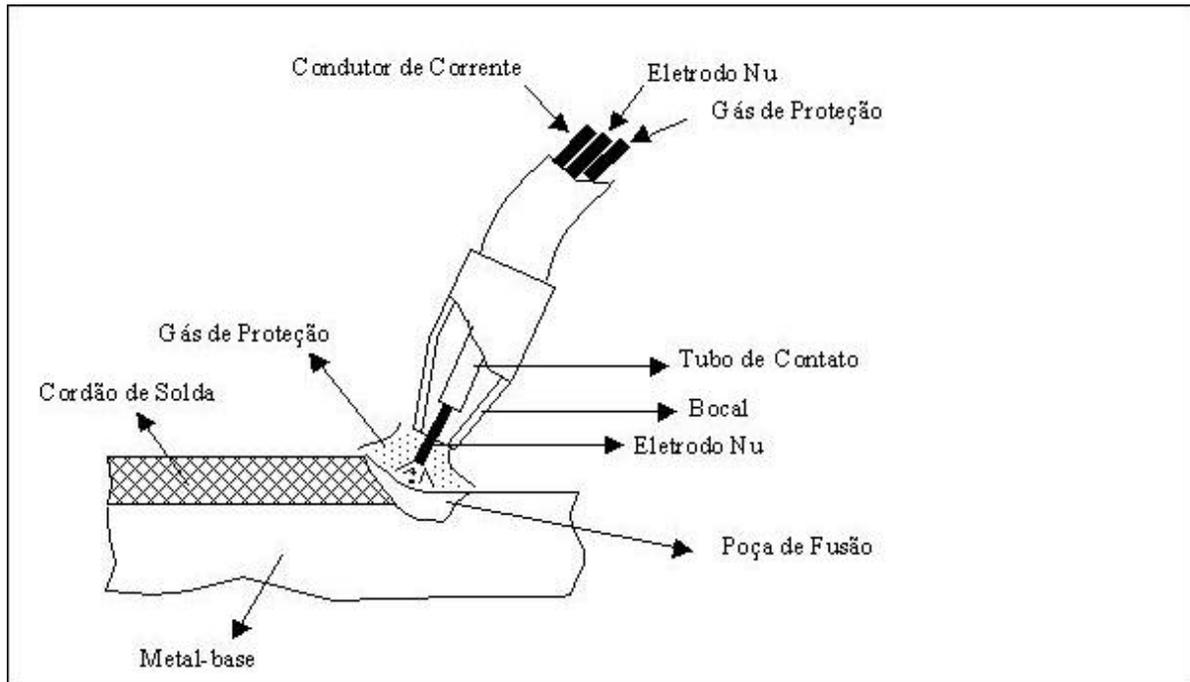
#### 2.1. PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS DO PROCESSO

O processo de soldagem **GMAW** - Gas Metal Arc Welding ou **MIG/MAG**, como também é conhecido, tem como princípio de funcionamento a utilização de um arco elétrico para aquecer a superfície a ser soldada e um eletrodo metálico alimentado continuamente. O calor gerado pelo arco funde a ponta do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a poça de fusão, a qual é protegida dos efeitos nocivos do ar atmosférico, por intermédio de um gás de proteção, proveniente de uma fonte externa. O equipamento básico para utilização do processo MIG/MAG pode ser verificado na **Figura 2.1**.



**Figura 2.1** – Equipamento para a soldagem MIG/MAG. Fonte: FBTS (1984).

A principal característica dos processos MIG/MAG é a proteção gasosa que envolve a atmosfera adjacente à poça de fusão, e que é proporcionada por gases inertes ou mistura de gases ativos e inertes, no caso do processo MAG. Estes processos são utilizados para unir peças metálicas pelo aquecimento e pela fusão delas a partir de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu e a poça de fusão, como ilustra a **Figura 2.2**.



**Figura 2.2** – Esquema do processo de soldagem MIG / MAG. Fonte: Wainer (1992).

Os processos de soldagem MIG/MAG prestam-se bem à soldagem de materiais com várias espessuras, sendo indicados na fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas, na recuperação de peças desgastadas e no recobrimento de superfícies, além de possibilidades de utilização em todas as posições de soldagem. A soldagem MIG / MAG tem sido muito utilizada na indústria ferroviária, na fabricação de pontes rolantes, vigas, escavadeiras, tratores entre outras.

A soldagem pelo processo MIG / MAG vem apresentando um grande crescimento em termos de utilização nos últimos anos, com escala mundial. Isto se deve principalmente à tendência de substituição, sempre que possível, da soldagem manual por processos semi-automáticos, mecanizados e automáticos, para a obtenção de maior produtividade.

## 2.2. VANTAGENS E LIMITAÇÕES

O processo de soldagem MIG/MAG é bastante versátil em termos de ligas soldáveis e espessuras de material, podendo ser usado em todas as posições. A soldagem MIG encontra uma gama de aplicações na soldagem de não ferrosos e aços inoxidáveis e a soldagem MAG é extensivamente usada para diversos tipos de aço. Graig (1987) complementa, dizendo que materiais de alta liga e materiais sensíveis ao calor, os quais eram considerados difíceis ou até mesmo impossíveis de serem soldados, têm sido unidos com êxito, ao se utilizar este processo, apesar de sua maior complexidade.

Normalmente sendo o processo semi-automático, observa-se que sua produtividade é bastante elevada, sendo quase sempre uma alternativa viável à soldagem com outros processos. O processo pode ainda ser mecanizado, com o uso de dispositivos de posicionamento e deslocamento da tocha de soldagem.

Em resumo, as principais vantagens do processo MIG / MAG são:

- Processo semi-automático bastante versátil, podendo ser adaptado facilmente para a soldagem automática;
- O eletrodo nu é alimentado continuamente;
- A soldagem pode ser executada em todas as posições;
- A velocidade de soldagem é elevada;
- A taxa de deposição é elevada, devido à densidade de corrente alta na ponta do arame;
- Não há formação escória e, conseqüentemente, não se perde tempo na sua remoção, nem se corre o risco de inclusão de escória na soldagem em vários passes;
- Penetração da raiz mais uniforme que no processo com eletrodo revestido;
- Processo com baixo teor de hidrogênio que, no caso de eletrodos nus, fica ao redor de 5ppm / 100g de metal;
- Problemas de distorção e tensões residuais diminuídos;
- Soldagem com visibilidade total da poça de fusão;
- Possibilidade de controlar a penetração e a diluição durante a soldagem;
- Facilidade de execução da soldagem;
- O soldador pode ser facilmente treinado para soldar em todas as posições.

Como principais limitações do processo pode-se citar:

- Maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente no caso de aços temperáveis;

- A soldagem deve ser protegida da corrente de ar;
- Como o bocal da pistola precisa ficar próximo do metal- base a ser soldado, a operação não é fácil em locais de difícil acesso;
- Projeções de gotas de metal líquido durante a soldagem;
- Grande emissão de raios ultravioleta;
- Equipamento de soldagem mais caro e complexo que o do processo com eletrodo revestido;
- Equipamento menos portátil que o do processo eletrodo revestido.

### **2.3. VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG**

As variáveis do processo determinam as características finais do cordão de solda, como dimensões, acabamento e propriedades mecânicas. Definem também a maior ou menor probabilidade de ocorrência de alguns tipos de defeitos, como trincas, poros, mordeduras e outros. Cada uma dessas variáveis pode ser controlada separadamente, porém todas estão interligadas e são independentes, visto que o efeito de uma está diretamente relacionado com a atuação da outra.

Diversas variáveis influenciam nas características do cordão de solda, dentre elas destacam-se a corrente de soldagem (ou amperagem) , a tensão (ou voltagem), a velocidade de soldagem, o comprimento e diâmetro do eletrodo, a inclinação da tocha de soldagem, a proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame.

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

Mantendo-se constantes as variáveis do processo e aumentando-se o valor da corrente, percebe-se a ocorrência de aumento na penetração e na profundidade da solda, na taxa de deposição do metal de adição e no diâmetro da gota de solda até o ponto de transição. Phillips (1968) relata que a penetração é influenciada pelas transferências, sendo particularmente pequena com uma corrente situada abaixo do nível de transição entre as transferências globular/*spray*. À medida que a corrente aumenta, o volume da gota também aumenta, caracterizando a transferência globular, até o instante em que a corrente atinge o nível de transição globular/*spray*. Nesse instante, pequenas gotículas passam a ser projetadas para a

poça de fusão sob a forma de névoa ou pulverização, caracterizando assim a transferência por *spray*.

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

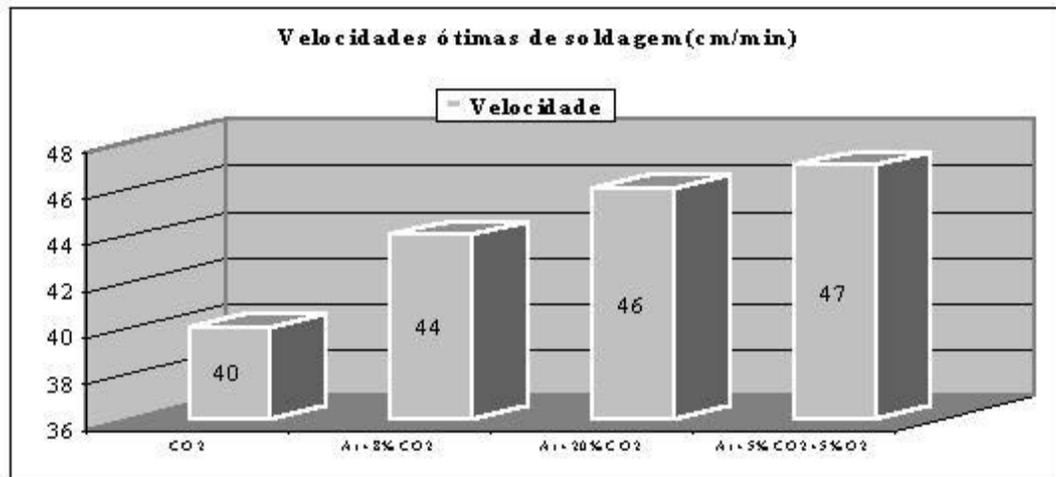
Wainer et all (1992) sustentam que a potência do arco, dada pelo produto entre sua tensão e corrente, é responsável pela largura do cordão de solda. Assim, para uma corrente constante, o aumento da tensão do arco provoca maior largura e menor altura do cordão, melhor molhagem, ou distribuição do metal depositado, e redução da penetração. Um arco com comprimento muito pequeno pode causar curtos-circuitos acidentais quando a transferência é globular ou *spray*, resultando em instabilidade do arco e conseqüente porosidade no cordão, além de cordões muito convexos. Já o comprimento muito grande tende a oscilar e a causar um cordão de penetração e largura irregulares.

Ainda, conforme o valor da tensão utilizada, determinados tipos de defeitos poderão ser introduzidos. Desta forma, valores elevados poderão gerar porosidades, excesso de respingos e mordedura. Valores baixos favorecem o aparecimento de sobreposições e instabilidades no arco.

A velocidade de soldagem, definida como a taxa de deslocamento do arco ao longo da junta, influencia a energia de soldagem, ou seja, a quantidade de calor cedida à peça; quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor cedida por unidade de área.

Com o controle da velocidade de soldagem, pode-se controlar a penetração e o tamanho do cordão, mas é uma variável independente da corrente de soldagem. A velocidade de soldagem deve ser selecionada em conjunto com a corrente para proporcionar a penetração desejada. Uma velocidade de soldagem muito alta diminui a ação de molhamento ou caldeamento, aumentando a tendência a mordeduras, ao apagamento do arco, porosidades e trincas. Por outro lado, velocidades muito baixas, além de elevarem o custo da operação, podem causar alterações metalúrgicas na estrutura do material devido à concentração térmica. Por outro lado, velocidades excessivas provocam menor penetração e menor largura do cordão, possíveis mordeduras e falta de fusão.

Um fator importante na determinação da velocidade de soldagem ideal refere-se aos gases de proteção. Para ilustrar tal influência, a **Figura 2.3** mostra velocidades ótimas para alguns gases utilizados no processo de acordo com experimentos realizados por Stenbacka (1989), em testes realizados com chapas de aço temperado de 6 mm de espessura com arames de 1mm de diâmetro e velocidade de alimentação de 12 m/min; soldagem de filete na posição horizontal com *stick-out* de 17 mm.



**Figura 2.3.** Velocidades ótimas de soldagem para diferentes gases utilizados no processo MIG/MAG. Fonte: Stenbacka (1989).

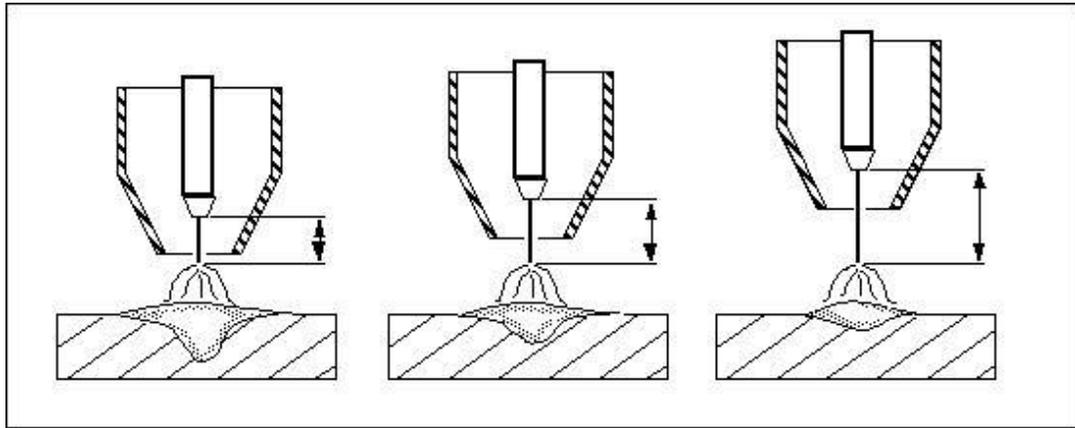
Outra variável importante do processo MIG/MAG refere-se ao “*stick-out*” (distância existente entre o início da parte externa do eletrodo ou fim do bico de contato e o final do eletrodo); é pois o comprimento livre do eletrodo. A distância entre a ponta do eletrodo e a peça é o comprimento do arco.

O “*stick-out*” está relacionado com a velocidade de fusão do eletrodo. Se o “*stick-out*” for aumentado, o calor é aumentado por efeito Joule, e a velocidade de fusão do eletrodo também se torna maior. Se o “*stick-out*” for muito pequeno, o calor gerado não será suficiente para fundir o eletrodo adequadamente; por outro lado, se for muito elevado, o arco tornar-se-á instável, a proteção gasosa deixará de existir e a consequência será o aparecimento de porosidades. Portanto, é preciso controlar rigorosamente o “*stick-out*”.

Ao se aumentar o “*stick-out*” e a distância da peça ao bico de contato, sem alteração dos demais parâmetros, haverá um aumento da queda de tensão; a corrente de solda, assim como a potência do arco, reduzem-se. Quanto maior for o comprimento livre do arame, maior será a resistência ao aquecimento. Desse modo, o arame pode vir a ser fundido por um arco de potência insuficiente. Nessas condições, a zona de solda recebe pouco calor, podendo vir a

ocorrer pontos frios na soldagem; em geral, longos arames livres reduzem a frequência das gotas e aumentam a perda de deposição por ocorrência de respingos.

A **Figura 2.4** mostra a influência no cordão de solda com a variação do “*stick-out*”, em três diferentes situações nas posições 1 ( $x$ ), 2 ( $x + \Delta x$ ) e 3 ( $x + \Delta y$ ).



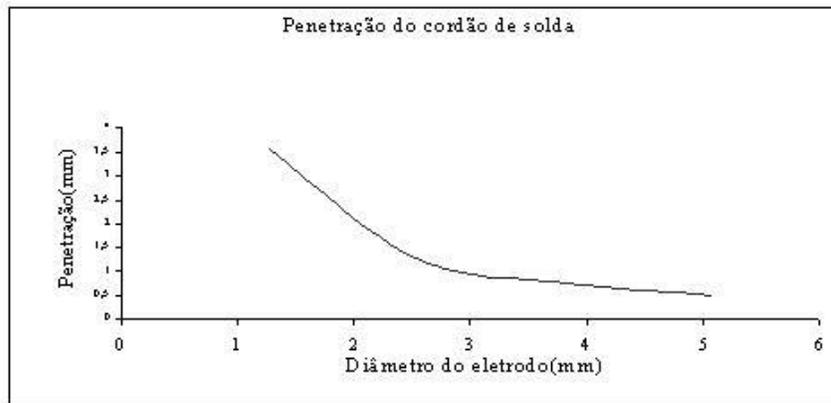
**Figura 2.4:** Influência do “*stick-out*” na geometria do cordão de solda. Fonte: Wainer (1992).

A influência do diâmetro do eletrodo tem relação direta com a configuração do cordão de solda. Aumentando-se o diâmetro do arame, maior será a corrente necessária para sua fusão. Contudo, cordões mais largos e profundos serão produzidos nesta situação, com maior quantidade de metal de adição sendo depositada. Existe, também, influência do diâmetro na penetração do cordão de solda. Como mostra a **Figura 2.5**, para as condições de corrente=300(A), tensão de soldagem=25(V), velocidade de soldagem=38 (cm/min) e espessura do metal de base=8 (mm), a penetração reduz significativamente com o diâmetro do eletrodo (Phillips,1968). Ainda, para um mesmo nível de corrente, o arco torna-se mais penetrante à medida que o diâmetro do eletrodo decresce. Com a utilização das posições vertical e sobre-cabeça, menores diâmetros de arame, inferiores a 1,2 mm, são utilizados com baixas correntes de soldagem.

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

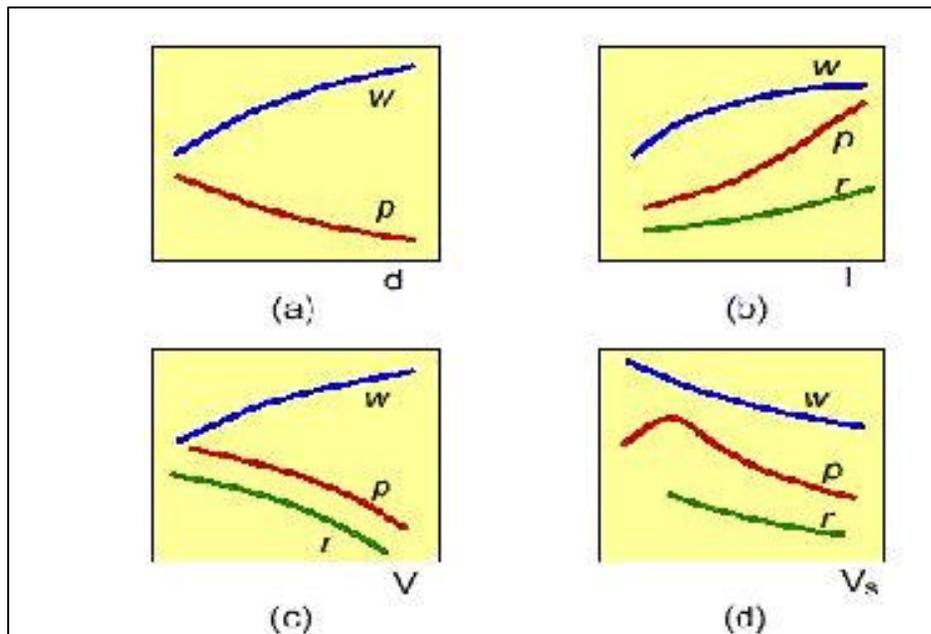
Wainer et all (1992) relatam que, na utilização de dois eletrodos de diâmetros diferentes, submetidos às mesmas condições de soldagem, o de maior diâmetro dará maior taxa de deposição e penetração. Eletrodos de grandes diâmetros originam cordões mais longos

quando comparados com os de menor diâmetro. A espessura do metal de base também influencia na escolha do diâmetro do eletrodo. Dessa forma, quanto mais espesso for o material de base, maior deverá ser o diâmetro do eletrodo.



**Figura 2.5:** Influência do diâmetro do eletrodo na penetração do cordão de solda. Fonte: Phillips (1968).

A **Figura 2.6** mostra um quadro esquemático com a influência dos parâmetros diâmetro do eletrodo ( $d$ ), corrente de soldagem ( $I$ ), voltagem ( $V$ ) e velocidade de soldagem ( $v_s$ ) sobre as largura ( $w$ ), penetração ( $p$ ) e reforço ( $r$ ) do cordão de solda.



**Figura 2.6:** Influência dos parâmetros nas características geométricas do cordão: (a) diâmetro- $d$ ; (b) corrente -  $I$ ; (c) voltagem-  $V$ ; (d) velocidade de soldagem -  $V_s$ .

O tipo de gás protetor, bem como sua vazão, são responsáveis diretos por vários fenômenos observados nos cordões de solda. A primeira finalidade dos gases é proteger a região soldada dos efeitos dos gases atmosféricos, os quais são compostos principalmente por oxigênio, nitrogênio e hidrogênio. Estes componentes podem acarretar a formação de óxidos e, em menores proporções, nitretos. As conseqüências desse fato podem ser expressas por soldas deficientes com retenção de escória, porosidades e fragilizações do cordão. Portanto, precauções devem ser tomadas com o intuito de excluir esses gases nocivos das proximidades da poça de fusão, fato esse realizado através dos gases de proteção.

O tipo de gás influencia nas características do arco, na transferência do metal, na penetração, largura, formato e propriedades mecânicas do cordão, na velocidade máxima de soldagem, na ação de limpeza ou desoxidação da poça de soldagem, nas tendências ao aparecimento de mordeduras e no custo da soldagem. Os gases utilizados no processo MIG/MAG podem ser inertes, ativos ou misturas destes gases, podendo conter pequenas quantidades de oxigênio ou CO<sub>2</sub>, os quais permitem aumentar, paulatinamente, a penetração nas adjacências.

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

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

Para aços carbono e de baixa liga, o custo da soldagem pode ser reduzido com o uso do CO<sub>2</sub>, o qual permite ainda a utilização de altas velocidades de soldagem e boa penetração da solda. Pode-se fazer uso tanto da transferência por curto-circuito quanto da globular, a qual gerará grandes quantidades de respingos. Contudo, suas propriedades mecânicas são afetadas devido à natureza oxidante do arco.

Na soldagem de ferrosos, a adição de pequenas quantidades de gases ativos, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> ao argônio melhora sensivelmente a estabilidade do arco e a transferência metálica. Phillips (1968) mostra que a quantidade adicionada de O<sub>2</sub> deverá situar-se na faixa entre 1-5% e a de CO<sub>2</sub> entre 3-25%, sendo estas porcentagens dependentes da junta soldada, da composição do metal base e da técnica de soldagem. Adições de CO<sub>2</sub> ao argônio normalmente não devem exceder 20%, quando se deseja realizar a transferência no modo *spray*. Estas misturas permitem a soldagem com melhor estabilidade de arco e isenção de mordeduras no cordão.

Nixon e Norrish (1992) mostram que, quanto maior a adição de CO<sub>2</sub> ao argônio, maior será a corrente de transição globular/*spray*, como mostra a **Tabela 2.1**. Para adições de CO<sub>2</sub> superiores a 25%, observa-se aumento das perdas por respingos, da profundidade da penetração e diminuição da estabilidade do arco. De acordo com Davies (1996), a adição de CO<sub>2</sub> ao argônio, para a soldagem de aços, melhora a ação de umedecimento, reduz a tensão superficial e faz com que a poça torne-se mais fluídica. As misturas Ar+5% CO<sub>2</sub> e Ar+20% CO<sub>2</sub> resultam em excelentes resultados com as transferências globular e *spray*. Lowery(1977) informa que, para aços não ligados e de baixa liga, a mistura Ar+20% CO<sub>2</sub> é empregada, devido à sua baixa condutibilidade térmica, pequena taxa de ionização, baixa queda de tensão, fácil ignição e boa estabilidade, assim como fácil transferência de material, sem perdas por respingos. O aspecto do cordão fica melhor do que com o argônio puro, devido à maior penetração, não necessitando com isso de acabamento. Pode-se empregar altas velocidades em espessuras de até 10 mm, assim como utilizar as transferências por *spray* e curto-circuito

O gás ativo, geralmente utilizado neste processo é o CO<sub>2</sub>, o qual pode ser utilizado para a soldagem de aços carbono e de baixa liga.

φ ARAME	GÁS DE PROTEÇÃO		
	Ar+5%CO2	Ar+15%CO2	Ar+20%CO2
(mm)	Amps	Amps	Amps
0,8	140	155	160
1,0	180	200	200
1,2	240	260	275
1,6	280	280	280

**Tabela 2.1** Corrente de transição globular/*spray* para arames de aço. Fonte: Nixon (1992).

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

A inclinação da tocha é um outro parâmetro que influencia na geometria do cordão de solda, principalmente na diz respeito à largura, à altura e penetração do cordão. Considerando que a direção de soldagem seja da esquerda para a direita, observa-se que a tocha inclinada para a esquerda produz pequena penetração e cordão largo; se, por outro lado, a inclinação da tocha for para a direita, o cordão produzido é estreito e a penetração é grande.

Mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, a orientação da tocha durante a soldagem afeta a penetração, quantidade de respingos, estabilidade do arco, o formato e a largura do cordão. A **Figura 2.7** ilustra os efeitos a serem obtidos em cada caso.

Ângulo	Características	Soldagem
Ângulo Negativo - Arco Frio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor penetração</li> <li>• Mais respingos</li> <li>• Cordão de solda mais plano</li> <li>• Cordão de solda mais largo</li> <li>• Melhor visibilidade para o soldador</li> </ul>	
Ângulo Positivo - Arco Quente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior penetração</li> <li>• Menos respingos</li> <li>• Cordão de solda mais estreito</li> <li>• Cordão de solda mais convexo</li> <li>• Arco mais estável</li> </ul>	
Ângulo Neutro	Neste caso, as características de soldagem e do cordão de solda são intermediárias aos dois casos anteriores.	

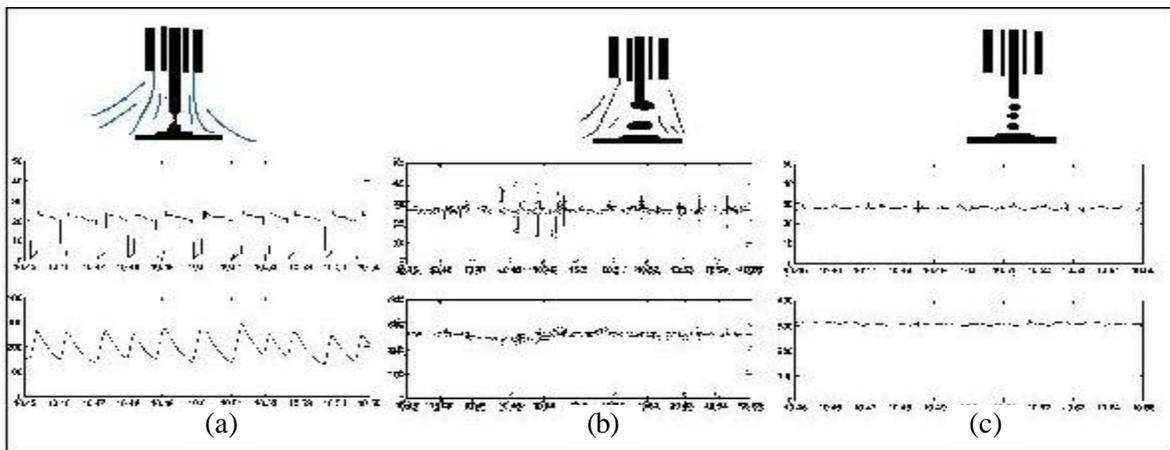
**Figura 2.7:** Influência do posicionamento da tocha. Fonte: Belgo Mineira (1996)

## 2.4 TIPOS DE TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS

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

- Transferência por curto-circuito: quando uma certa quantidade do eletrodo acumula-se em sua extremidade, na forma de uma grande gota, a qual é transferida no momento do toque no metal-base (**Figura 2.8a**);
- Transferência globular: quando uma certa quantidade do metal de adição acumula-se na ponta do eletrodo, formando uma gota que é transferida para a peça ao se atingir um certo volume (**Figura 2.8b**);
- Transferência por “*spray*”: quando pequenas quantidades do eletrodo são transferidas na forma de uma chuva de pequenas gotículas (**Figura 2.8 c**);

Cada um destes tipos de transferência apresenta formas de onda características de tensão e corrente, que podem ser monitoradas a partir da fonte de energia através de um sistema de aquisição de dados. A partir destas formas de onda, pode-se analisar as relações existentes entre os parâmetros de soldagem, os tipos de transferências que ocorrem e as características finais dos elementos soldados. Na **Figura 2.8** apresenta-se, também, a forma mais comum dos sinais de tensão e corrente pertinente ao tipo de transferência que está ocorrendo no momento.



**Figura 2.8:** Tipos de transferências entre o eletrodo e o metal de base e seus sinais de tensão e corrente característicos: (a) transferência por curto-circuito, (b) transferência globular e (c) transferência por “*spray*” (Fonte: Adolfsson, 1999).

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

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

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

Graig (1987) mostra que, utilizando-se diâmetros de arame de 0,6 à 1,2mm, a faixa de corrente para a ocorrência da transferência por curto-circuito situa-se entre 30 e 200 A. Dependendo da corrente utilizada, a freqüência de transferência das gotas pode ser de 20 a 200 vezes por segundo. Contudo, o mesmo autor relata que o principal aspecto negativo desse método situa-se no rápido resfriamento da gota de solda, a qual poderá solidificar-se, parcial ou completamente, antes que a gota seguinte seja transferida. Isto influencia não somente a capacidade de fusão, como também permite que contaminantes fiquem aprisionados na gota. A qualidade inconsistente, oriunda desse fato, faz com que o processo não seja utilizado em uma variedade de aplicações, onde qualidade é o principal critério. Essers e Van Gompel (1984) alegam que a ocorrência de respingos continua sendo a grande desvantagem desse tipo de transferência.

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

As correntes e tensões utilizadas situam-se acima daquelas utilizadas na transferência por curto-circuito. Este tipo de transferência é típico de ambientes que utilizam CO<sub>2</sub> ou argônio com alto percentual de CO<sub>2</sub> como gases de proteção. Com a utilização de argônio, observam-se baixas correntes e altas tensões e comprimentos de arco. Já na soldagem de aços,

utilizando misturas com adições de CO<sub>2</sub>, a transferência globular acontece mesmo com valores elevados de corrente.

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

À medida em que se aumenta a corrente de soldagem, ocorre, simultaneamente, um aumento no diâmetro das gotas até atingir-se um determinado patamar de corrente, o qual será denominado *corrente de transição*,  $I_c$ , onde ocorre, abruptamente, uma redução no tamanho das gotas e um aumento da frequência de transferência, ou seja, velocidades extremamente altas, ao mesmo tempo que o arco, antes confinado à porção inferior da gota, passa a envolvê-la completamente. Nestas condições, a transferência não é mais controlada pela gravidade, com as gotas passando a serem transferidas em direção à poça de fusão, independentemente da posição de soldagem, o que passa a caracterizar a transferência por “*spray*”. Collard (1988) e Essers e Van Gompel (1984) relatam que o gás de proteção utilizado, o comprimento do eletrodo e a tensão do arco influenciam significativamente a corrente de transição.

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

soldagem plana e horizontal. Sob este aspecto, o modo de soldagem pulsada permite alternativas interessantes que serão descritas a seguir.

Com o advento da eletrônica, trazendo profundas mudanças nas fontes de soldagem, surge na década de 60, no cenário fabril, o processo MIG pulsado, o qual revolucionou significativamente as técnicas convencionais anteriormente utilizadas. Com o modo pulsado é possível a obtenção de uma transferência tipicamente por “*spray*”, com a vantagem de se utilizar baixas correntes médias, fato esse que permite sua utilização na soldagem de chapas de menor espessura.

## **2.5. TRABALHOS DE OTIMIZAÇÃO NESTA ÁREA**

Basicamente, todo o setor automobilístico e outros utilizam processos de solda em suas linhas de produção, sejam eles MIG, MAG, TIG, Arco Submerso, etc. Sendo assim, é comum que surjam trabalhos de otimização nesta área.

Neto e Guimarães (2000) utilizaram o Planejamento Fatorial e o algoritmo de Yates para analisar o efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado. Gunaraj e Murugan (2000) desenvolveram modelos matemáticos na previsão e otimização do volume de um cordão de solda para o processo de arco submerso. Neste caso, foi utilizada a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), onde através de análises realizadas durante aproximadamente dois anos, foram obtidas previsões com precisão próxima a 98% de confiabilidade. Além deste trabalhos, pode-se destacar também o trabalho de Gunaraj e Murugan (1999) para verificação da influência dos parâmetros no formato da zona termicamente afetada em soldagens por arco submerso. Ribeiro (2002) analisou o efeito dos parâmetros de pulso no processo MIG sobre a qualidade e produtividade no cordão de solda. Através da utilização do Planejamento Fatorial em dois níveis e do algoritmo de Yates, foi possível a determinação dos principais fatores de influência, bem como o desenvolvimento de modelos matemáticos. Murugan e Parmar (1994) analisaram a influência de alguns parâmetros de soldagem no formato geométrico dos cordões de solda depositados através do processo MIG/MAG em soldagens de revestimento de aços inoxidáveis. Para analisar tais influências, a técnica da Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) foi utilizada com sucesso, permitindo obter modelos geométricos correlacionando a influência dos parâmetros nas respostas de interesse. Rowlands e Antony (2003) também analisaram os parâmetros de soldagem por resistência elétrica na resistência mecânica da solda, gerando posteriormente modelos matemáticos permitindo otimizações. Darwish e Al-Dekhial (1999) aplicaram a MSR para a análise de

solda ponto em aplicações com alumínio e Gupta e Dorn (1996) em aplicações de aços com baixo teor de carbono. Guha e Balasubramanian (1999) desenvolveram modelos matemáticos aplicados à soldagem com eletrodos revestidos para a verificação da influência dos parâmetros na ocorrência de falta de penetração em soldagens de aços carbono.

## CAPÍTULO 3

# A TÉCNICA DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

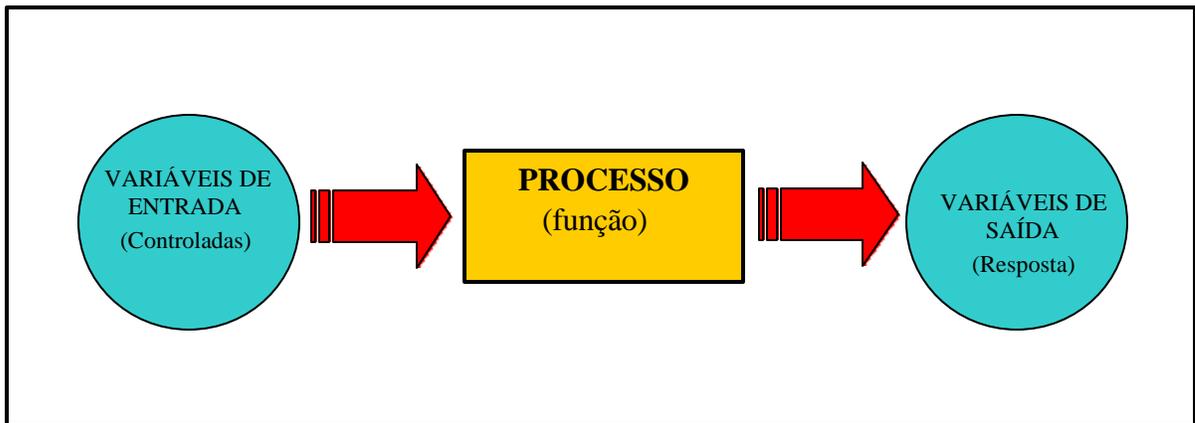
A técnica do Projeto e Análise de Experimentos não é uma técnica nova. Algumas aplicações datam mesmo das primeiras décadas do século, com os trabalhos pioneiros de Fisher e Student (citado por Neto et al, 1995). De acordo com Montgomery (1991), Fisher foi o inovador da utilização de métodos estatísticos no projeto experimental, mas há outras significantes contribuições de Yates, Bose, Kempthorne, Cochran e Box. Basicamente, a experimentação tem como abordagem principal a quantitativa (Nakano e Fleury, 1996)

Apesar de ter suas primeiras publicações na década de 30 e de ser ainda pouco conhecida, vem despertando um grande interesse no meio acadêmico e produtivo, após as idéias apresentadas pelo Dr. Genesi Tagushi nos anos 80. Alguns trabalhos, como exemplo Connell e Pherson (1997), relatam o sucesso da aplicação dessa técnica, que permitiu a redução do índice de defeito em um determinado processo de soldagem de 47% para 0,074%, sendo realizados apenas 18 testes (tratamentos) contra os mais de 2000 que seriam necessários, caso a técnica não fosse aplicada (citado por Mont'Alvão, 1998). Em aplicações na área industrial, destacamos Box e Hunter (1978), Box e Draper (1987) e Mason et al (1989). Observa-se ainda muitos trabalhos que se referem a aplicações na indústria ou não, como por exemplo Ramirez *et al* (2001), na área biológica. Na área industrial, pode-se citar diversos, como o de Câmara (1998), voltado para a área química, Antony (2000), com ênfase na melhoria da capacidade de processos, Albin (2001), na indústria eletrônica, Goodman e Wyld (2001), na indústria mecânica, Galdámez (2002), na área fabril de plásticos, Giddings et al (2000), com resolução de problemas de logística através da utilização da Metodologia de Superfície de Resposta, Neto et al (2000), Gunaraj e Murugan (2000) e Ribeiro (2002), estes três últimos voltados para a área de soldagem.

Muitas indústrias têm se utilizado desta técnica na resolução de seus problemas, conforme destacam Konda et al (1998), pois é possível um maior conhecimento do processo, bem como posteriores melhorias em dispersões.

Antony et al (1998) citam o DOE como uma das técnicas estatísticas mais avançadas para melhoria da qualidade. Em novas metodologias de melhoria da qualidade, como a Seis Sigma, a técnica é de fundamental importância para diminuição da dispersão dos processos, conforme descrevem Ingle e Roe (2001). Além do mais, está presente como ferramenta em normas internacionais de qualidade, como a QS-9000 (1998).

Um dos problemas mais comuns que um experimentador pode enfrentar é a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse. No jargão estatístico diz-se que há o interesse de descobrir como a *resposta* é influenciada por fatores chamados de *entrada*. Isto pode ser demonstrado esquematicamente através da **Figura 3.1**, que mostra que as variáveis de entrada, atuando sobre um sistema em estudo, influencia nas respostas (variáveis de saída). O sistema (processo) é considerado como uma função (desconhecida, em princípio, caso contrário não precisaria de um experimento) que atua sobre as variáveis de entrada (fatores) e produz como saída as respostas observadas. O objetivo da pessoa que realiza os experimentos é descobrir esta função, ou pelo menos obter uma aproximação satisfatória para ela.



**Figura 3.1:** Correlação entre variáveis de entrada e saída de um processo.

No setor industrial, geralmente se objetiva extrair o máximo de informações sobre a influência dos fatores de entrada, que são as variáveis controladas do processo, sobre os fatores de saída (respostas) ou variáveis de interesse, com o menor número possível de observações, visando um menor custo e maior rapidez.

## 3.2 PRINCIPAIS PASSOS NA EXPERIMENTAÇÃO

Para que um experimento tenha maiores chances de sucesso, é necessário que sejam observadas algumas importantes etapas. Montgomery (1991) descreve os principais passos, que podem ser verificados através da **Tabela 3.1**.

Nº	PASSO	DESCRIÇÃO
1	Conhecimento e Exposição do Problema	O experimentador deve ter o máximo de informações sobre o problema a ser analisado
2	Escolha de Fatores e Níveis	Devem ser determinados os fatores (entrada), bem como os níveis de estudo. Neste passo, soma-se conhecimento prático e teórico por parte do observador.
3	Seleção das Variáveis de Resposta	As respostas a serem analisadas devem prover informação suficiente para resolver o problema em questão.
4	Escolha do Projeto Experimental	Caso os passos anteriores estejam corretos, este passo é relativamente simples. Deve-se escolher o tipo de análise levando-se em consideração tempo, custo, dificuldades dos experimentos e objetivos pretendidos.
5	Realização do Experimento	Processo de coleta de dados. Deve-se tomar cuidados para se evitar erros experimentais.
6	Análise dos Dados	Utilização de métodos estatísticos para análise dos resultados e conclusões. Aconselha-se a utilização de softwares de apoio. Dois deles, bastante utilizados: STATGRAPHICS e MINITAB.
7	Conclusões e recomendações	Conclusões através dos resultados obtidos e inferências estatísticas. Acompanhamentos e confirmações devem ser executados para validação dos resultados e conclusões.

**Tabela 3.1** – Passos para a condução de um experimento.

Box et al (1978) enfocam a importância da união do conhecimento teórico e prático para os experimentadores. Além da importância na condução do experimento, a mesma é fundamental para a determinação dos fatores de entrada e região de interesse, bem como as seleções das respostas.

### 3.3 TÉCNICAS DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS MAIS UTILIZADAS

Dentre as técnicas mais utilizadas do projeto e análise de experimentos cita-se:

- Planejamento fatorial completo  $2^k$ ;
- Planejamento fatorial fracionado  $2^{(k-p)}$ ;
- Engenharia Robusta – Taguchi;
- Metodologia da Superfície de Resposta (MSR).

Diversos autores, como Box et al (1978), Montgomery (1991), Neto et al (1995) descrevem matematicamente todas as técnicas citadas anteriormente. Baseado nestas fontes, a **Tabela 3.2** apresenta, de forma resumida, as principais características ligadas a cada técnica.

TÉCNICA	VANTAGENS	DESvantagens	APLICAÇÕES
Fatorial Completo $2^k$	Permite varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis, além de demandar um alto nº de corridas para problemas com grande nº de variáveis.	Em processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda alto tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma pré-análise do processo com um nº reduzido de corridas.	Não permite varredura completa da região.	Em processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada ou para corridas que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite uma análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um nº extremamente reduzido de experimentos.	Geralmente dá uma idéia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Em processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento, para processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo.
MSR	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos níveis +2 e -2, pois são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

**Tabela 3.2** – Principais Técnicas de Análise de Experimentos e características fundamentais.

O presente trabalho teve por foco a otimização de um processo com os níveis de variação dos parâmetros de entrada previamente conhecidos. Portanto, optou-se pela utilização com base na técnica da Metodologia da Superfície de Resposta, que por conseguinte será descrita de maneira mais objetiva, focando-se nos pontos principais de análise utilizados no trabalho. É importante também ressaltar que não foram feitos todos os passos previstos nesta metodologia que direcionam à superfície otimizada, como por exemplo o Método da Ascendente de Maior Inclinação, que é um procedimento para se mover seqüencialmente ao longo do caminho ascendente de maior inclinação, ou seja, na direção do aumento máximo na resposta, conforme definido por Montgomery e Runger (2003).

### 3.4 A METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (MSR)

Introduzida por Box na década de 1950, a Metodologia de Superfície de Resposta tem sido utilizada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais (Neto et al ,1995).

A técnica MSR permite responder um número diferente de questões, tais como (Box, 1978):

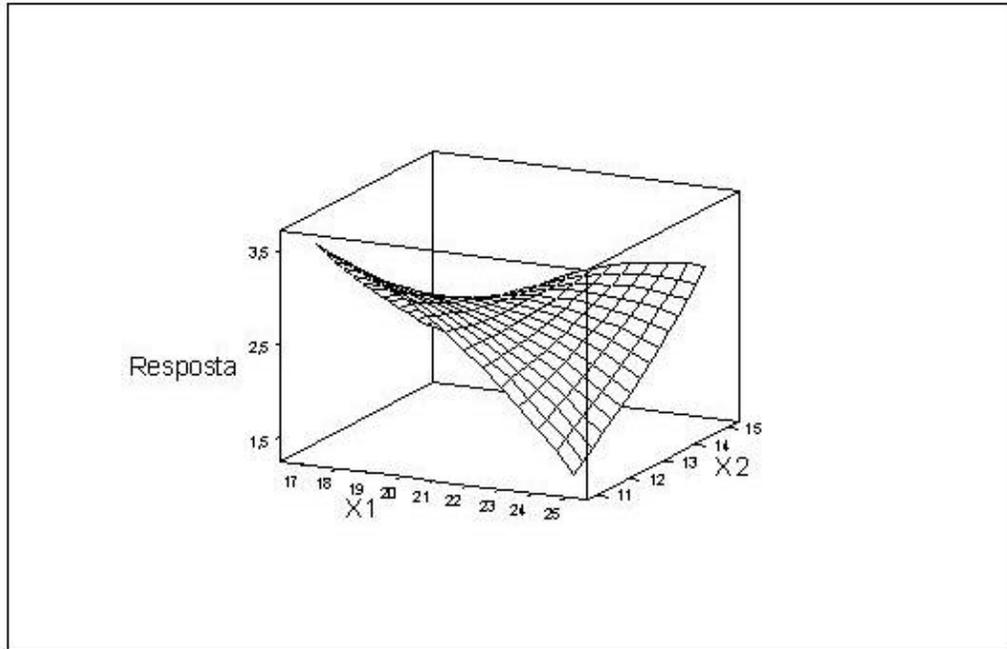
1. Como as respostas são afetadas quando as variáveis de entrada são ajustadas fora da região de interesse?
2. Quais variáveis de entrada (se houver) quando combinadas podem afetar as respostas?
3. Quais valores das variáveis de entrada trarão máximo rendimento desejado e qual a superfície de resposta mais próxima deste máximo?

De acordo com Montgomery (1991), a função que representa a superfície de resposta é descrita conforme a equação (3.1) a seguir:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \quad (3.1)$$

onde  $x_1, x_2, \dots, x_k$  representam os fatores de entrada e  $\epsilon$  o erro experimental (dispersão) observado na resposta.

Usualmente, representa-se uma superfície de resposta graficamente, conforme pode ser observado por um exemplo na **Figura 3.2**.



**Figura 3.2** – Exemplo de gráfico de superfície de resposta para  $x_1$  ,  $x_2$ .

Montgomery (1991) descreve que na grande maioria dos problemas de MSR, a relação entre os fatores de entrada e as respostas é desconhecida. Desta forma, deve-se como primeira providência encontrar a melhor aproximação para esta relação. Geralmente, utilizam-se polinômios de baixa ordem (primeira ordem). Entretanto, caso o processo a ser estudado esteja relativamente próximo ao ótimo, um polinômio de segundo ou maior grau é necessário, devido à curvatura do processo, sendo que na maioria dos casos um modelo de segunda ordem já é suficientemente adequado. Gunaraj e Murugan (2000) aplicaram com sucesso um modelo de segunda ordem na otimização de um cordão de solda pelo processo de arco submerso. A **Tabela 3.3** mostra as funções para modelos de primeira e segunda ordem com variáveis de entrada  $x_1$  ,  $x_2$  ,  $x_3$  e  $x_4$ .

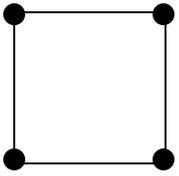
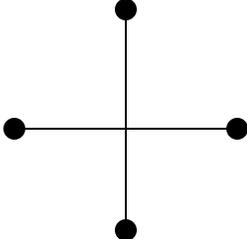
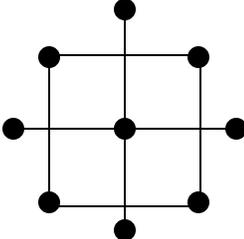
ORDEM	FUNÇÃO
Primeira	$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4$
Segunda	$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4$

**Tabela 3.3** – Descrição das funções para modelos de primeira e segunda ordem.

Para se estimar os coeficientes do modelo polinomial, emprega-se o método dos mínimos quadrados, conforme a denominação introduzida por Fisher, que é universalmente adotada (Costa Neto, 1992). Atualmente, *softwares* como o MINITAB determinam de maneira bastante rápida a função através do método dos mínimos quadrados.

### 3.4.1. CENTRAL COMPOSITE DESIGN (CCD)

O design quadrático chamado Box-Wilson Central Composite Design, ou, como mais comumente é conhecido, Central Composite Design (CCD), é formado por três grupos distintos de elementos experimentais. Um CCD contém um fatorial completo ou fracionário, um design com um determinado número de pontos centrais (*center points*) e, adicionalmente, apresenta um grupo de níveis extras denominados de pontos estrela (*star points*), os quais permitem a estimação da curvatura. Se a distância entre o centro do design e o ponto fatorial (+1 ; -1) for aproximadamente 1 (em módulo), a distância do centro ao *star point* será maior que a unidade. Esta distância é comumente representada por  $\alpha$  e depende de certas propriedades desejadas para o experimento e do número de fatores envolvidos, observação também válida para os *center points*. A **Tabela 3.4** ilustra os *star points* e os *center points*, bem como os fatores em um CCD.

		
Pontos fatoriais	Pontos Axiais ( <i>star points</i> )	Sobreposição dos pontos fatoriais e axiais, com a adição de pontos centrais ( <i>center points</i> )
Coordenadas : +1 e -1	Coordenadas: $(+\alpha, 0)$ ; $(-\alpha, 0)$ ; $(0, +\alpha)$ e $(0, -\alpha)$	Coordenadas do <i>center point</i> : $(0, 0)$

**Tabela 3.4** – Ilustração dos fatores, *star points* e *center points* em um CCD.

O número de *star points* em um CCD é igual ao dobro do número de fatores envolvidos no experimento. Os *star points* representam novos valores extremos para cada

fator, ou seja, de certa forma há uma extrapolação que permite um maior comportamento do modelo fora dos níveis determinados inicialmente.

Há três tipos de CCD, dependendo de onde se localizam os *star points*: circunscrito (CCC), Inscrito (CCI) e Face Centrada (CCF). A **Tabela 3.5** descreve os três tipos, bem como ilustra graficamente cada tipo para uma melhor visualização.

TIPO	CARACTERÍSTICA	GRÁFICO
Circunscrito (CCC)	É o CCD original. Os <i>star points</i> estão a uma distância $\alpha$ do centro, baseado nas propriedades desejadas do design. Os pontos axiais estabelecem novos extremos para os fatores. Requerem 5 níveis para cada fator. Aumentando-se um fatorial existente ou um fatorial fracionário com pontos axiais há a obtenção do CC.	
Inscrito (CCI)	Para as situações nos quais os limites especificados para o conjunto de fatores são os limites reais, ou seja, não podem ser extrapolados. O CCI utiliza os níveis dos fatores como <i>star points</i> e cria um fatorial completo ou fracionário dentro desses limites (o CCI é na verdade em CCC no qual os níveis dos fatores são divididos por $\alpha$ ). Também requer 5 níveis para cada fator.	
Face Centrada (CCF)	Os <i>star points</i> estão sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja, $\alpha=+1$ ou $-1$ . Requer 3 níveis para cada fator. Acrescentando os <i>star points</i> a um fatorial completo ou fracionário obtém-se este design	

**Tabela 3.5** – Descrição dos tipos de CCD.

Box & Hunter (1957) descrevem que a classe de planejamento mais utilizada para ajustar o modelo de Segunda ordem é o CCD (citado por Galdámez, 2002). A distância  $\alpha$  é dada pela equação (3.2) a seguir.

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (3.2)$$

Sendo  $k$  o número de fatores do experimentos, pela **Tabela 3.6** pode-se verificar a relação entre  $\alpha$  e o número de fatores para alguns experimentos. Observa-se, ainda, que a porção fatorial pode ser em planejamento fatorial fracionado.

Nº DE FATORES	PORÇÃO FATORIAL	VALOR DE ALFA ( $\alpha$ )
2	$2^2$	$2^{2/4} = 1,414$
3	$2^3$	$2^{3/4} = 1,682$
4	$2^4$	$2^{4/4} = 2,000$
5	$2^{5-1}$	$2^{4/4} = 2,000$
5	$2^5$	$2^{5/4} = 2,378$
6	$2^{6-1}$	$2^{5/4} = 2,378$
6	$2^6$	$2^{6/4} = 2,828$
n	$2^{n-1}$	$2^{n/4}$
n	$2^n$	$2^{n/4}$

**Tabela 3.6** – Valores de alfa ( $\alpha$ ) para experimentos com  $n$  fatores.

Em termos resumidos, fazendo-se algumas comparações entre os três tipos de designs, pode-se dizer que os tipo CCC fornecem uma boa qualidade na predição das respostas em todo o espaço experimental, pois requerem 5 níveis para cada fator e a extrapolação dos *star points* fora dos níveis +1 e -1. O tipo CCI, contudo, não apresenta a mesma qualidade na predição das respostas, pois trabalha apenas dentro da amplitude dos níveis da parte fatorial. Já o tipo CCF permite uma qualidade de predição dentro do espaço experimental relativamente alta e não exige a utilização de pontos além da amplitude dos níveis da parte fatorial. Entretanto, sua precisão na estimação dos coeficientes quadráticos puros é relativamente pobre, pois requer apenas três níveis para cada fator.

### 3.4.2. METODOLOGIA DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA)

Para se analisar estatisticamente se o modelo matemático é adequado ou não, bem como a significância dos coeficientes dentro do mesmo, utiliza-se a técnica da análise da variância (ANOVA). Este processo basicamente consiste em um teste de hipóteses, que é um teste para determinar se existe uma relação linear entre a variável de resposta  $y$  e um

subconjunto de regressores  $x_1, x_2, \dots, x_k$  (Montgomery e Runger, 2003). Por exemplo, em uma regressão linear múltipla, as hipóteses apropriadas são:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para no mínimo um } j,$$

onde:  $\beta$  são os coeficientes de regressão

A rejeição de  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$  implica que no mínimo um dos regressores  $x_1, x_2, \dots, x_k$  contribui significativamente para o modelo.

A descrição completa passo a passo da ANOVA, que não é focado neste trabalho, pode ser encontrada em diversos autores, como Box et al. (1978), Montgomery (1991), Neto et al (1995) e Montgomery e Runger (2003).

A metodologia ANOVA permite a determinação da adequação do modelo matemático através do teste de hipóteses, exemplificado anteriormente de forma resumida, de forma via obtenção dos valores de F. A partir do valor de F, pode-se determinar a probabilidade de erro ao aceitar a hipótese, que é definido por  $P_{\text{value}}$ . Este índice é obtido através da distribuição de F em um determinado nível de significância. Geralmente, são utilizados níveis de significância acima de 90%.

Através de softwares específicos, pode-se determinar o quadro da análise de variância, onde os valores de P já são determinados automaticamente, sem a necessidade de uso de tabelas específicas de comparação de F. Além disso, podem ser verificadas as regressões mais próximas, bem como os erros residuais do modelo. Um exemplo deste quadro pode ser visto na **Tabela 3.7**.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	16218,1	16218,08	1158,43	3,22	0,014
Linear	4	9296,3	602,27	150,57	0,42	0,793
Square	4	4342,0	4342,03	1085,51	3,02	0,049
Interaction	6	2579,8	2579,78	429,96	1,20	0,358
Residual Error	16	5755,6	5755,59	359,72		
Lack-of-Fit	10	5745,0	5744,96	574,50	324,29	0,000
Pure Error	6	10,6	10,63	1,77		
Total	30	21973,7				

**Tabela 3.7** – Exemplo de ANOVA para um determinado modelo obtido através do MINITAB.

Além dos valores de  $P_{\text{value}}$ , o *software* permite também a determinação de  $R^2$ , que mostra indica qual a porcentagem é efetivamente explicada pelo modelo determinado, bem como o índice  $P_{\text{value}}$  para todos os coeficientes do modelo, que permite realizar o ajuste através da redução do modelo matemático completo, eliminando os fatores e interações não significativas, permitindo a obtenção de um  $R^2$  maior.

Resumidamente, a **Tabela 3.8** propõe um seqüência de análise do modelo através do método ANOVA.

PASSO	DESCRIÇÃO
1	Obtenção do modelo matemático completo e análise da adequação do mesmo através da determinação de F.
2	Verificação da regressão mais adequada
3	Obtenção dos valores de F para todos os coeficientes
4	Verificação de $R^2$ , para determinação da porcentagem de variação explicada pelo modelo obtido
5	Eliminação dos coeficientes com baixa probabilidade de significância e determinação do modelo matemático reduzido
6	Verificação da adequação dos novos modelos através do teste de F
7	Verificação do novo valor de $R^2$

**Tabela 3.8** – Seqüência da aplicação do método ANOVA em um experimento.

# CAPÍTULO 4

## EXPERIMENTAÇÃO – PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG EM RODAS DE AÇO

### 4.1 INTRODUÇÃO

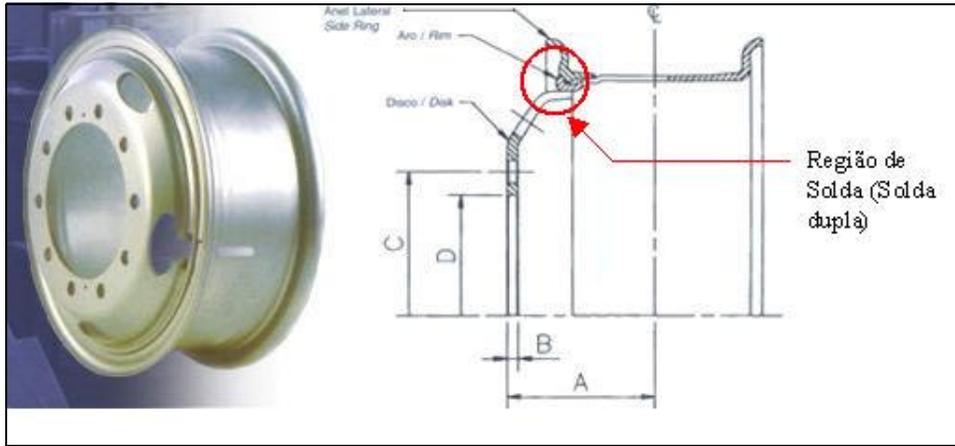
A indústria automotiva tem crescido constantemente nos dias atuais, tanto na parte de vendas quanto na parte tecnológica. Desta forma, este segmento torna-se um campo fértil para a aplicação de experimentos objetivando a otimização de processos.

Antony *et al* (1998) afirmam que a educação estatística nas Universidades voltada para Engenheiros frequentemente concentra-se em tópicos como Teorias de Probabilidade, Distribuições de Probabilidade e muitos aspectos simplesmente matemáticos, ao invés de focar no uso destas técnicas de uma maneira prática, como o DOE. Assim, ainda pode-se ter setores na indústria que não se utilizam da Estatística para melhoria de seus processos, que atualmente é um fator competitivo de fundamental importância.

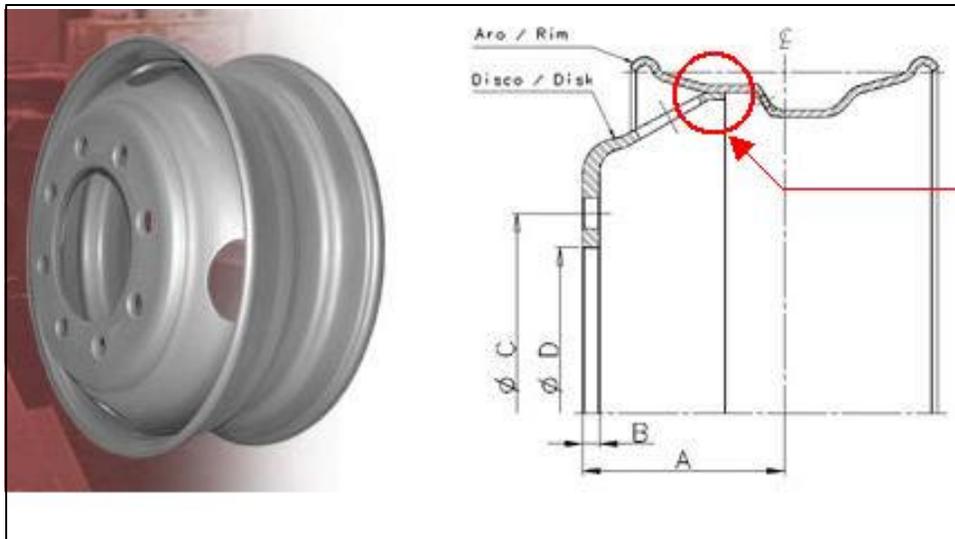
### 4.2 O PRODUTO RODA

A roda não é algo novo. Basicamente, fala-se da invenção da roda desde os primórdios da humanidade como uma revolução. Este trabalho baseou-se no estudo do processo de solda para rodas de aço pesadas de caminhões e ônibus.

De maneira mais geral, pode-se classificar as rodas pesadas de acordo com o tipo de pneu a ser utilizado: rodas para pneu sem câmara e rodas para pneu com câmara. As **Figuras 4.1 e 4.2** ilustram os dois modelos, tanto em visão geral quanto em corte do perfil. Através das mesmas, pode-se verificar que existem diferenças significativas entre os dois modelos, principalmente no que diz respeito aos aspectos do perfil do aro, que não é o foco deste trabalho, e ao cordão de solda, que une o aro ao disco, sendo este um item extremamente crítico para este produto, no que diz respeito ao desempenho e principalmente à segurança do usuário final.

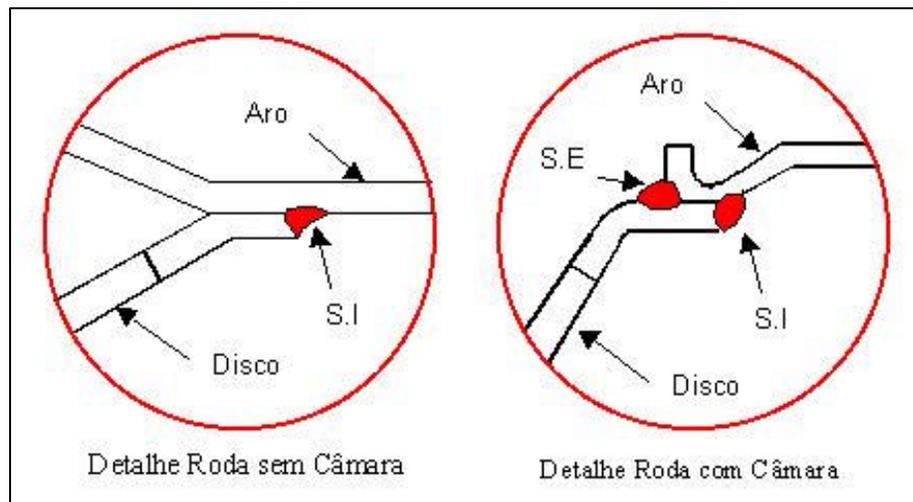


**Figura 4.1** – Roda para pneu com câmara – visão geral e corte do perfil.



**Figura 4.2** – Roda para pneu sem câmara – visão geral e corte do perfil.

As **Figuras 4.1** e **4.2** mostram também a região de solda dos dois tipos de rodas, que é o foco do estudo. O processo de solda é definido como uma característica crítica para o produto, ou seja, caso haja falha neste item, pode haver o comprometimento da segurança do usuário, conforme já descrito anteriormente, pois o cordão de solda une os componentes aro e disco. O aro tem a função de montagem do pneu. Já o disco, serve como componente de fixação no cubo do veículo. Porém há uma diferença que faz com que este processo seja mais crítico em rodas sem câmara: há apenas um cordão de solda, contra dois cordões em rodas com câmara. Esta diferença pode ser vista com mais detalhes na **Figura 4.3**.



**Figura 4.3** – Detalhes dos cordões de solda em corte para rodas sem e com câmara.

Observa-se através da **Figura 4.3** que a roda pneu com câmara possui dois cordões de solda: Interno (S.I.) e Externo (S.E.). Já a roda para pneu sem câmara possui apenas o cordão interno (S.I.). Desta forma, o esforço na região da solda causado pelo momento aplicado devido à carga de trabalho é minimizado em rodas com câmara. Além do mais, torna-se óbvio que se deve redobrar os cuidados em soldas aplicadas em rodas sem câmara, não só pelo fato do momento aplicado, mas por se tratar de um único cordão. Devido a este fato, optou-se neste trabalho pelo estudo da solda em rodas sem câmara, além de se tratar de um produto com maior volume no mercado atual.

Trata-se de uma diferença de projeto, que também é influenciada pela aplicação dos dois produtos. Nota-se que o perfil do aro é bastante diferenciado para os dois casos. O mesmo é projetado de acordo com normas internacionais, tais como a ALAPA (Associação Latino Americana de Pneus e Aros), TRA (Tire and Rim Association) e ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organisation).

Além da subdivisão apresentada (pneu com câmara e sem câmara), as rodas também podem ser classificadas quanto dimensão (largura x diâmetro) e capacidade de carga. Por exemplo: Roda 22.5" x 8.25 – 3000 kgf. Neste caso, trata-se de uma roda para pneu sem câmara, cujas dimensões são 22.5" de diâmetro (internacionalmente, utiliza-se o sistema inglês para denominação dimensional) por 8.25" de largura, e capacidade individual de carga de 3000 kgf. Outras características como a distância da linha de centro do aro à face externa do disco ("*off-set*") e tipo de fixação também são utilizadas para denominação, porém não foram focos deste trabalho.

Quanto ao material utilizado, as mesmas podem ser fabricadas com aço carbono (geralmente baixo carbono) ou ligas leves (Alumínio, Magnésio).

Os testes de validação ou durabilidade da roda também seguem normas internacionais. As mais importantes são a SAE J 267 (1999), NBR 6751 (1997), EUWA-ES 3.11 (1993) e JIS – D-4103 (1998). Basicamente, são realizados dois tipos de testes: fadiga do disco e compressão do aro, que serão enfocados posteriormente. Fundamentalmente, estes dois testes verificam o comportamento da estrutura como um todo quando aplicada uma determinada carga de trabalho (multiplicada por um fator de aceleração) em um determinado número de ciclos, que simula a vida útil do produto. Logicamente, a qualidade da solda também é fator importante para o sucesso destes testes.

### 4.3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS NA QUALIDADE DA SOLDA EM RODAS SEM CÂMARA

Através do conhecimento adquirido em mais de 50 anos da empresa no mercado, pode-se definir os principais elementos que influenciam na qualidade da solda em rodas. A **Tabela 4.1** apresenta os principais fatores, bem como especificações e importância.

CARACTERÍSTICA	DENOMINAÇÃO	ESPECIFICAÇÃO	IMPORTÂNCIA
Penetração no aro	$P_a$ (mm)	10 a 50% da espessura do aro	Correta fixação do aro, sem ocasionar concentradores de tensão para altas penetrações
Penetração no disco	$P_d$ (mm)	0,7 mm min	Correta fixação do disco
Índice de convexidade	$I_c$ =reforço/largura	-	Influencia diretamente no ângulo do pé de solda
Ângulo do pé de solda	$A_{ps}$	45° máximo	Evitar concentrador de tensão na região do aro
Área da solda	$AS$ (mm <sup>2</sup> )	-	Quanto maior a área de solda, maior a quantidade gasta em arame, conseqüentemente maiores são os custos agregados de produção

**Tabela 4.1** – Principais características que afetam a qualidade do cordão de solda.

Verifica-se que não há especificações para os índices de convexidade e área total de solda. Na verdade, resolveu-se neste trabalho incluir o estudo do índice de convexidade devido ao fato do mesmo influenciar no ângulo do pé de solda e também a fim de se verificar o tipo de relação entre os dois. O índice de convexidade ( $I_c$ ), que é um valor adimensional, é obtido através da seguinte fórmula:

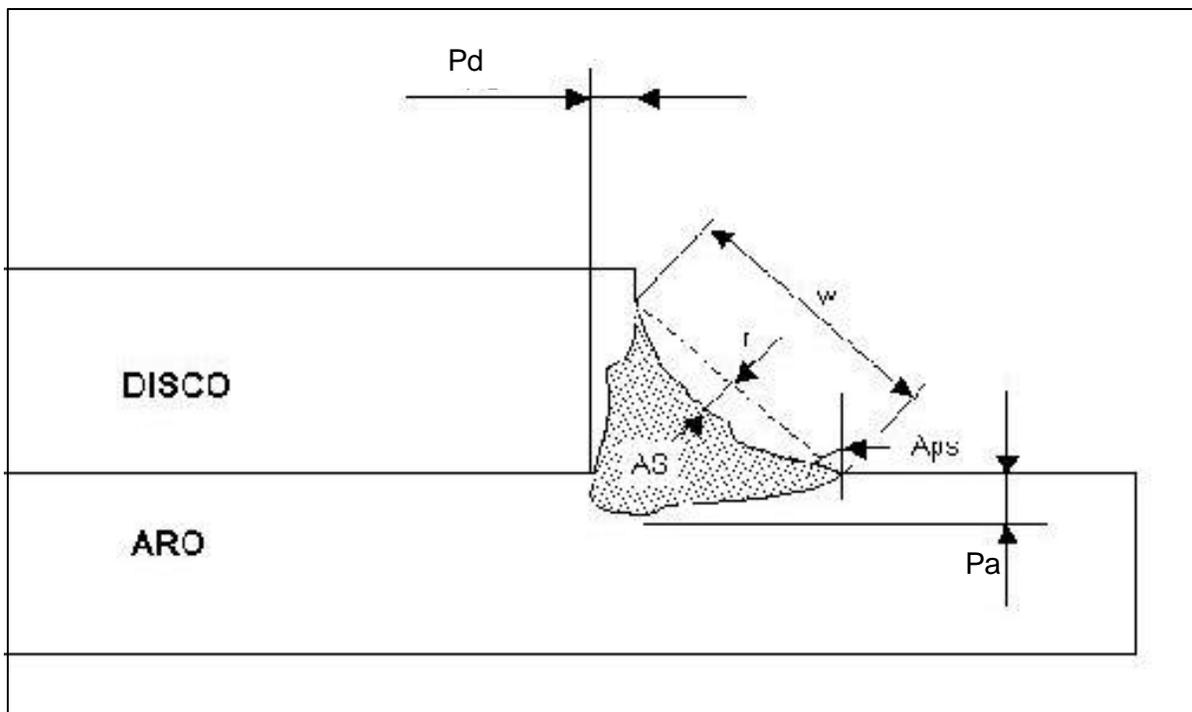
$$I_c = (r/w) \quad (4.1)$$

onde:  $w$  = largura do cordão e  $r$  = distância ao topo

Vale notar que o índice  $I_c$ , quando positivo, expressa a convexidade e quando negativo expressa a concavidade do cordão de solda.

Para a área total de solda, também não há especificação. Porém, a mesma influencia diretamente na quantidade de arame de solda gasta no processo. O objetivo, para este caso, é a diminuição de custos, bem como o aumento de produtividade.

A **Figura 4.4** apresenta um desenho esquemático indicando as principais características do cordão de solda.



**Figura 4.4** – Desenho esquemático das principais características do cordão de solda.

## 4.4 O PROCESSO DE SOLDAGEM E OS SEUS PARÂMETROS

Para a soldagem de rodas sem câmara, é utilizado o processo MIG/MAG automático, ou seja, o operador é responsável apenas pelo ajustamento (“setup”) da máquina e avaliação do cordão de solda. Após ajustados os valores iniciais dos parâmetros, todo o processo de soldagem é automático.

A empresa utiliza-se de várias estações de solda. Os testes foram realizados através da estação nº 01, que é composta dos seguintes equipamentos:

- Estação de solda SOLTRONIC;
- Unidade de controle HOBART HMC-410;
- Retificador tipo Tensão Constante, Modelo RC-650-RVS.

Uma visão geral da estação nº 01 e da unidade de controle pode ser verificada nas **Figuras 4.5 e 4.6**, respectivamente.

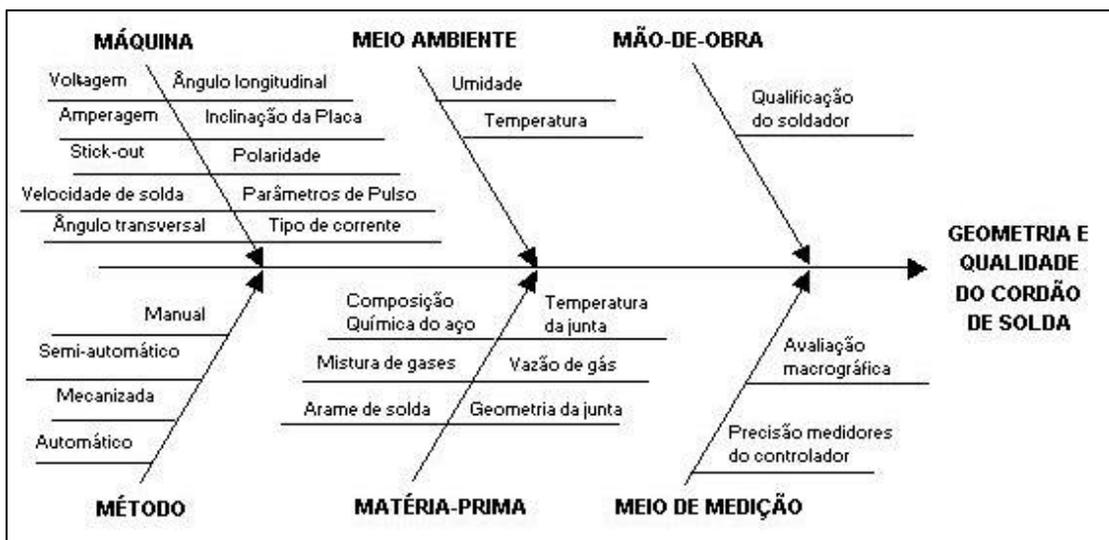


**Figura 4.5** – Estação de solda MIG/MAG nº 01 com a roda no posicionamento inicial.



**Figura 4.6** – Controlador HOBART.

Para identificação dos principais parâmetros de processo que influenciam na geometria e qualidade do cordão de solda, utilizou-se o auxílio de um diagrama de causa-efeito 6M, proposto inicialmente por Ishikawa (Antony *et al*, 1998). Este diagrama permite uma melhor visão do processo. Os resultados para o processo em análise podem ser verificados na **Figura 4.7**.



**Figura 4.7** – Diagrama 6M para identificação das principais causas para o cordão de solda.

## 4.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO EXPERIMENTO

Para a determinação dos parâmetros a serem estudados, foram levados em consideração basicamente quatro fatores fundamentais:

- Revisão da literatura (Livros, Artigos e Dissertações);
- Limitações do processo a ser verificado;
- Relação dos parâmetros com as respostas desejadas;
- Conhecimento adquirido de 50 anos da empresa em processos de solda.

Basicamente, o objetivo do experimento foi otimizar o processo, de maneira que se obtivesse a melhor geometria possível do cordão de solda com o menor custo. A variável custo pode ser definida como uma composição entre o ciclo do processo e quantidade exigida de material.

Considerando informações referentes à literatura, muitos trabalhos destacam a influência dos fatores na característica final de uma solda, principalmente aqueles relacionados à geometria do cordão final. Vários destes trabalhos serviram de diretriz para a fixação dos parâmetros de análise, bem como dos níveis de atuação dos mesmos nas respostas a serem trabalhadas. Alguns destes trabalhos serão mencionados a seguir.

Considerando a geometria final do cordão de solda, Gunaraj e Murugan (2000), utilizando-se de uma análise baseada em Análise de Superfície de Respostas (MSR), verificaram que a voltagem, taxa de alimentação do arame (que está diretamente ligada à amperagem), velocidade de soldagem e distância da tocha à junta são parâmetros bastante significativos em sua formação.

De acordo com Wainer *et. al* (1992), os ângulos de soldagem também influenciam diretamente no formato do cordão, além de fatores como a mistura de gases, tipo de arame (diâmetro e especificação), vazão de gás, voltagem, amperagem, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, “*stick-out*”, parâmetros de pulso, tipo de aço, quantidade de calor da junta. Estes parâmetros estão descritos no diagrama causa-efeito mostrado na **Figura 4.7**.

Apesar de existir uma série de variáveis de influência, o processo de soldagem de rodas sem câmara apresenta algumas limitações que, por características pertinentes ao próprio projeto da roda e à linha produtiva, devem permanecer constantes. São eles:

- Mistura de gases;
- Geometria da junta;
- Tipo de arame de soldagem;
- Ângulo de inclinação da placa;
- Tipo de soldagem (no caso, automática);
- Composição química do aço da junta;
- Polaridade;
- Parâmetros de pulso;
- Tipo de corrente;

Outros fatores de influência também podem ser descartados do estudo, como a qualificação do operador (já que se trata de um processo automático) e métodos de medição, pois a empresa já possui os mesmos definidos, além de ser certificada de acordo com a norma de Sistemas de Qualidade ISO / TS 16949 (1999). No caso das condições climáticas, trata-se de um processo executado dentro de uma linha produtiva, onde tais condições não interferem no processo. Em relação à temperatura da junta, a roda é sempre soldada em temperatura ambiente. Desta forma, deve-se ter cuidado apenas em verificar a temperatura da junta antes da execução de cada corrida.

Assim, dentre os fatores relacionados ao processo, os seguintes apresentam possibilidades de variação no estudo:

- Tensão ou voltagem;
- Intensidade de Corrente ou amperagem;
- Velocidade de soldagem;
- Ângulos transversal e longitudinal;
- Comprimento livre do eletrodo (“stick-out”);
- Distância da tocha à junta;
- Vazão de gás.

Em relação à vazão de gás, mesmo podendo ser variada sem restrições, optou-se por trabalhar em uma faixa constante já previamente definida no processo atual utilizado pela empresa. Desta forma, sua influência se manteria constante para todos os experimentos.

O “*stick-out*”, que é a distância do bico de contato até o início do arco, é um valor teórico e está ligado diretamente à voltagem, pois quanto maior o arco, menor o “*stick-out*”. Como a voltagem é um parâmetro importante a ser analisado, a influência do “*stick-out*” pode

ser verificada indiretamente caso haja interesse para tal. Analogamente, a distância da tocha à junta a ser soldada também apresentará, no caso deste trabalho, um valor constante já definido no processo atual de fabricação.

Quanto aos ângulos da tocha, como verificado na *Seção 2.2.6*, o ângulo longitudinal tem influência maior no formato do cordão, diferentemente do ângulo transversal.

Desta forma, no presente trabalho será analisada a influência dos seguintes parâmetros de processo na geometria do cordão de solda: Voltagem (V), Intensidade de corrente ou Amperagem (A), Velocidade de Soldagem ( $V_s$ ) e Ângulo Longitudinal ( $A_L$ ). A **Tabela 4.2** resume os fatores e efeitos, no que diz respeito às hipóteses para os resultados esperados na variação dos mesmos, baseando-se na revisão da literatura e no próprio conhecimento da empresa na área de soldagem.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>Tensão ou Voltagem (V)</b>	<b>Intensidade de corrente (A)</b>	<b>Velocidade de soldagem (<math>V_s</math>)</b>	<b>Ângulo longitudinal da tocha (<math>A_L</math>)</b>
<b>EFEITO</b>				
<b>Penetração no aro (<math>P_a</math>)</b>	O aumento da voltagem deve causar penetrações maiores	O aumento da amperagem deve causar penetrações maiores	O aumento da velocidade de solda deve causar menores penetrações	O aumento da inclinação deverá causar maiores penetrações
<b>Penetração no disco (<math>P_d</math>)</b>	O aumento da voltagem deve causar penetrações maiores	O aumento da amperagem deve causar penetrações maiores	O aumento da velocidade de solda deve causar menores penetrações	O aumento da inclinação deverá causar maiores penetrações
<b>Índice de convexidade (<math>I_c</math>)</b>	O aumento da voltagem deve diminuir o índice de convexidade	O aumento da amperagem deve aumentar o índice de convexidade	O aumento da velocidade de solda deve aumentar o índice de convexidade	O aumento da inclinação deverá causar diminuição do índice de convexidade
<b>Ângulo do pé de solda (<math>A_{ps}</math>)</b>	O aumento da voltagem deve diminuir o ângulo do pé de solda	O aumento da amperagem deve aumentar o ângulo do pé de solda	O aumento da velocidade de solda deve aumentar o ângulo do pé de solda	O aumento da inclinação deverá causar diminuição do ângulo do pé de solda
<b>Área total de solda (AS)</b>	O aumento da voltagem deve aumentar a área total de solda	O aumento da amperagem deve aumentar a área total de solda	O aumento da velocidade de solda deve diminuir a área total de solda	O aumento do inclinação deverá causar diminuição da área total de solda

**Tabela 4.2** – Hipóteses básicas para os parâmetros de estudo e respectivos efeitos.

Ainda para as hipóteses apresentadas na **Tabela 4.2**, pode-se afirmar que quanto maior a velocidade de soldagem, menor será o ciclo e a quantidade de consumo do arame, o que impactará diretamente nos índices de produtividade e gastos finais. Além disto, deve-se lembrar dos parâmetros interados. Neste caso, pode-se definir uma relação entre a interação corrente e voltagem, que deve ter uma relação positiva para os efeitos de penetração no aro e disco e área de soldagem.

Os valores dos parâmetros que serão mantidos constantes durante o experimento podem ser vistos através da **Tabela 4.3**.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO / VALOR
Ângulo Transversal	9°
Distância da tocha à peça	20 mm
Mistura de gases	80% Argônio + 20% CO <sub>2</sub>
Vazão de gás	28 l/min
Arame de Solda	AWS-ER 70S-6
Ø Arame de Solda	1,6 mm
Inclinação da placa de solda	45°
Polaridade	Positiva
Tipo de Corrente	Contínua
Material do Aro	SAE 1008 / 1010 Acalmado em Alumínio
Espessura do Aro (Junta)	5,65 mm
Material do Disco	SAE 1008 / 1010 Acalmado em Alumínio
Espessura do Disco (Junta)	7,50 mm

**Tabela 4.3** – Parâmetros mantidos constantes no experimento.

Optou-se por trabalhar com uma roda pneu sem câmara 22.5” x 8.25”, por tratar-se do modelo atualmente com maior volume de fabricação. Porém, como o processo é o mesmo para todos os modelos de rodas sem câmara, com poucas variações na espessura dos materiais da junta, pode-se utilizar este trabalho para previsão do comportamento para outros modelos.

## 4.6 DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DOS PARÂMETROS E ESCOLHA DA TÉCNICA DE EXPERIMENTAÇÃO

Como a empresa já apresenta um vasto conhecimento do processo de soldagem, optou-se por um trabalho de otimização baseando-se nas variações dos parâmetros atualmente trabalhadas no processo. Desta forma, utilizou-se como forma de análise a experimentação com quatro fatores, constituído de 31 corridas. Na verdade, trata-se de um fatorial completo  $2^4$  (=16) incluindo sete pontos centrais (*center points*) e oito pontos estrelas

(*star points*). Tal metodologia de análise foi utilizada com sucesso por Gunaraj e Murugan (2000) em um projeto para análise de influência de parâmetros na geometria de um cordão de solda através de arco submerso, enfoque este muito similar ao pretendido neste presente trabalho.

Os níveis utilizados usualmente no processo para os parâmetros de estudo podem ser verificados na **Tabela 4.4**. Neste caso, são definidos no processo atual apenas os níveis +1 e -1. Os limites +2 , -2 e 0 (zero), são calculados.

PARÂMETRO	NÍVEIS				
	-2	-1	0	1	2
Tensão (V)	26	28	30	32	34
Corrente (A)	300	340	380	420	460
Velocidade (%)	17	19	21	23	25
Ângulo (°)	11	12	13	14	15

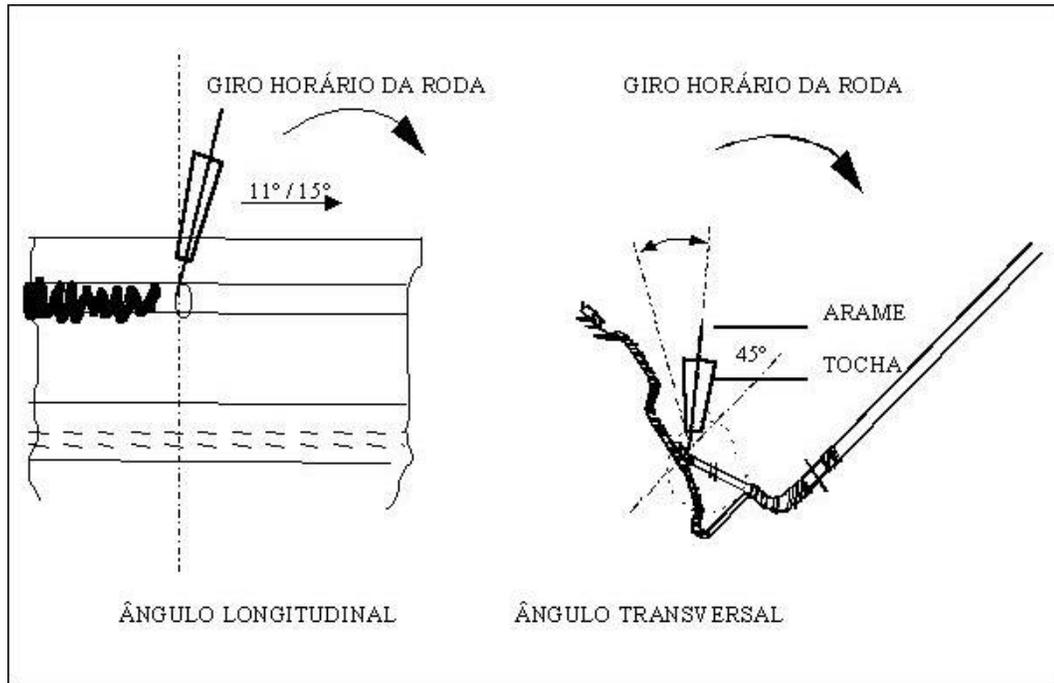
**Tabela 4.4** – Limites de variação dos parâmetros escolhidos.

As adequações dos parâmetros de tensão e intensidade de corrente foram realizadas diretamente através do controlador HOBART HMC-410.

A variação do ângulo longitudinal foi feita diretamente na estação de solda SOLTRONIC, conforme escala mostrada na **Figura 4.8**. A **Figura 4.9** mostra as referências para os ângulos longitudinal e transversal.



**Figura 4.8** – Método de variação do ângulo longitudinal.



**Figura 4.9** – Referências para os ângulos longitudinal e transversal.

Os níveis para a velocidade de soldagem foram expressos em porcentagem da máxima velocidade da placa, que é um parâmetro específico do fabricante utilizado no programa de solda da estação, sendo modificada através de um equipamento específico (FOTON 5 – ALTUS), que pode ser visto na **Figura 4.10**.



**Figura 4.10** – Controlador FOTON 5 – utilizado na variação da velocidade de solda.

Entretanto, pode-se determinar a velocidade linear de soldagem ( $V_S$ ) na unidade “m/min” utilizando-se a seguinte relação:

$$V_S = \omega \cdot R \text{ (m/min)} \quad (4.2)$$

onde:  $\omega$  = tempo gasto para percorrer uma volta (1/min)

$R$  = Circunferência total da junta ( $C_T$ ) /  $2 \cdot \pi$  (m)

A relação entre a porcentagem de velocidade e a velocidade linear de soldagem ( $V_S$ ) será utilizada posteriormente. Porém, para efeitos de cálculos nas análises dos resultados, trabalhar-se-á com os valores de porcentagem de velocidade, que são as variáveis atualmente utilizadas no processo MIG/MAG. Os valores em unidade m/min serão calculados apenas para efeito comparativo com demais trabalhos.

## 4.7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes da execução das corridas do experimento, foram tomados alguns cuidados especiais, objetivando a validação interna do experimento interna, ou seja:

- **Garantia da variação da espessura da junta (aro e disco):** as mesmas ficaram dentro de uma tolerância de 0,30 mm para a espessura do aro e 0,50 mm para a espessura do disco, variações atualmente permitidas pelo processo. As dimensões foram verificadas utilizando-se de um medidor de espessura aferido no setor de metrologia da própria empresa.
- **Garantia da composição química do material da junta (aro e disco):** a composição foi verificada utilizando-se de um espectrofotômetro digital da empresa, também aferido (organismo externo). A composição química do material pode ser vista na **Tabela 4.5** e está de acordo com a variação permitida pela norma SAE J403 para o material em questão.

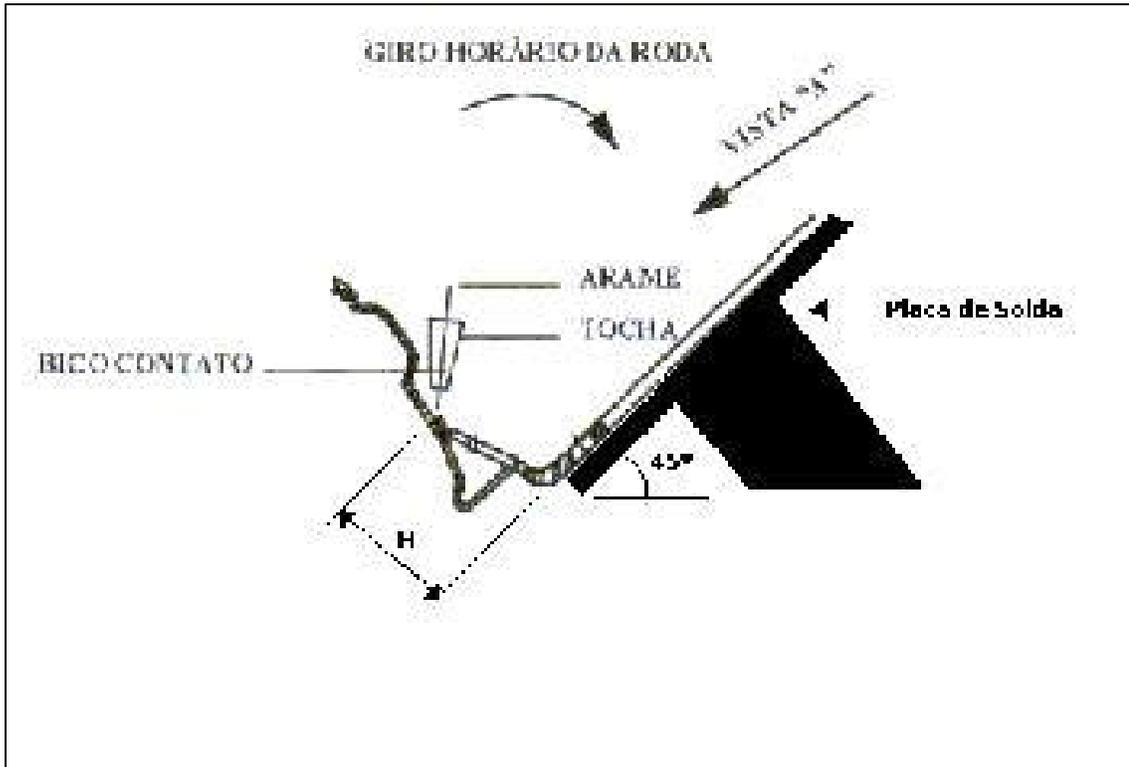
ELEMENTO QUÍMICO	COMPONENTE			
	ARO (SAE 1008/1010)		DISCO (SAE 1008/1010)	
	ESPECIFICADO	ENCONTRADO	ESPECIFICADO	ENCONTRADO
% C	0,08 a 0,13	0,11	0,08 a 0,18	0,135
% Mn	0,30 a 0,60	0,403	0,30 a 0,60	0,447
% P	0,030 máximo	0,018	0,030 máximo	0,021
% Si	0,035 máximo	0,016	0,035 máximo	0,011

**Tabela 4.5** – Composição química do aço dos componentes aro e disco da junta de solda.

- **Garantia da altura do disco:** a altura do disco deve estar dentro de uma faixa de variação de no máximo 0,5 mm, conforme especificado no processo atual. Os mesmos foram verificados utilizando-se um altímetro digital aferido pelo laboratório de metrologia da própria empresa. A garantia da altura do disco é importante, pois influencia no posicionamento da tocha durante o processo de soldagem, conforme pode ser visto na **Figura 4.11**.

Verifica-se que, caso a altura do disco (H) – conforme indicado na **Figura 4.11** varie, a tocha irá acompanhar esta variação, o que comprometerá o experimento.

- **Garantia da variação dos parâmetros dentro dos níveis especificados:** a correta variação dos parâmetros dentro dos níveis é garantida através de aferição dos instrumentos da estação de solda (voltímetro e amperímetro), do programa de velocidade e da escala numérica do ângulo longitudinal.



**Figura 4.11** – Esquema experimental com indicação da altura do disco (H).

#### 4.7.1 EXECUÇÃO DAS CORRIDAS

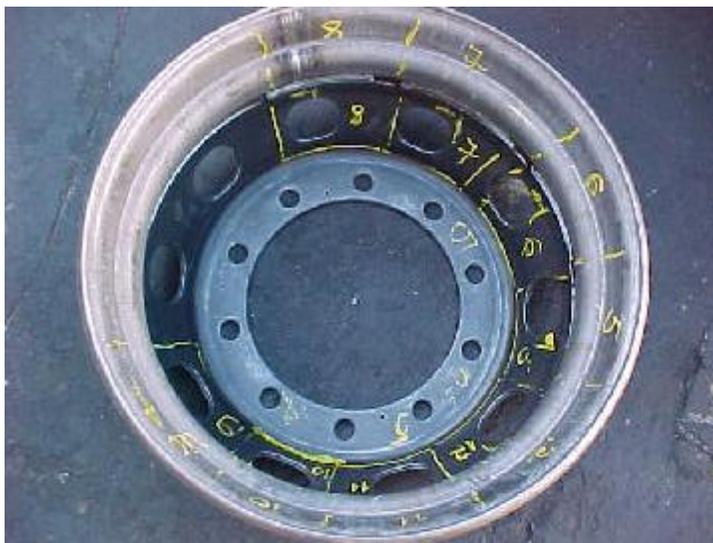
Para a execução das corridas, deve-se ainda observar dois pontos importantes: seqüência das corridas (aleatorização ou não do experimento, a fim de se evitar erros sistemáticos) e a disposição dos corpos de provas.

Quanto à ordem das corridas, optou-se por não se utilizar o sistema de aleatorização clássico, mas sim por um sistema baseado na no agrupamento de blocos para o ângulo longitudinal. Isto se deve ao fato da variação do ângulo ser manual e mais complicada e para se evitar erros de repetibilidade por parte da leitura da escala. Como ponto inicial, foi escolhido de maneira aleatória o ângulo longitudinal de 15°, que é o fator de limite +2. A seqüência das corridas gerada a partir do *software* MINITAB pode ser vista através da **Tabela 4.6**.

<b>Ordem da Corrida</b>	<b>V</b>	<b>A</b>	<b>V<sub>S</sub></b>	<b>A<sub>L</sub></b>
<b>16</b>	-1	-1	-1	-1
<b>17</b>	+1	-1	-1	-1
<b>18</b>	-1	+1	-1	-1
<b>19</b>	+1	+1	-1	-1
<b>24</b>	-1	-1	+1	-1
<b>25</b>	+1	-1	+1	-1
<b>26</b>	-1	+1	+1	-1
<b>27</b>	+1	+1	+1	-1
<b>20</b>	-1	-1	-1	+1
<b>21</b>	+1	-1	-1	+1
<b>22</b>	-1	+1	-1	+1
<b>23</b>	+1	+1	-1	+1
<b>28</b>	-1	-1	+1	+1
<b>30</b>	+1	-1	+1	+1
<b>29</b>	-1	+1	+1	+1
<b>31</b>	+1	+1	+1	+1
<b>10</b>	-2	0	0	0
<b>11</b>	+2	0	0	0
<b>12</b>	0	-2	0	0
<b>13</b>	0	+2	0	0
<b>1</b>	0	0	-2	0
<b>2</b>	0	0	+2	0
<b>14</b>	0	0	0	-2
<b>15</b>	0	0	0	+2
<b>3</b>	0	0	0	0
<b>4</b>	0	0	0	0
<b>5</b>	0	0	0	0
<b>6</b>	0	0	0	0
<b>7</b>	0	0	0	0
<b>8</b>	0	0	0	0
<b>9</b>	0	0	0	0

**Tabela 4.6** – Matriz experimental com a ordem utilizada nas corridas.

Quanto aos corpos de prova, foi decidido pela utilização de cordões de solda de aproximadamente 200 mm de comprimento dispostos na mesma roda, conforme pode ser verificado através da **Figura 4.12**. Um exemplo de cordão individual (por exemplo, o da corrida número 19) pode ser visto na **Figura 4.13**. Foram utilizadas 04 peças na execução do experimento. O perímetro total da região da junta de cada roda foi de 1683 mm. Caso se utilizassem 31 rodas, correspondente ao número total de corridas, ter-se-iam os seguintes problemas: aumento da dispersão de alguns parâmetros considerados constantes, aumento do custo do experimento e dos tempos de execução e preparação dos corpos de prova.



**Figura 4.12** – Disposição dos corpos de prova na roda.



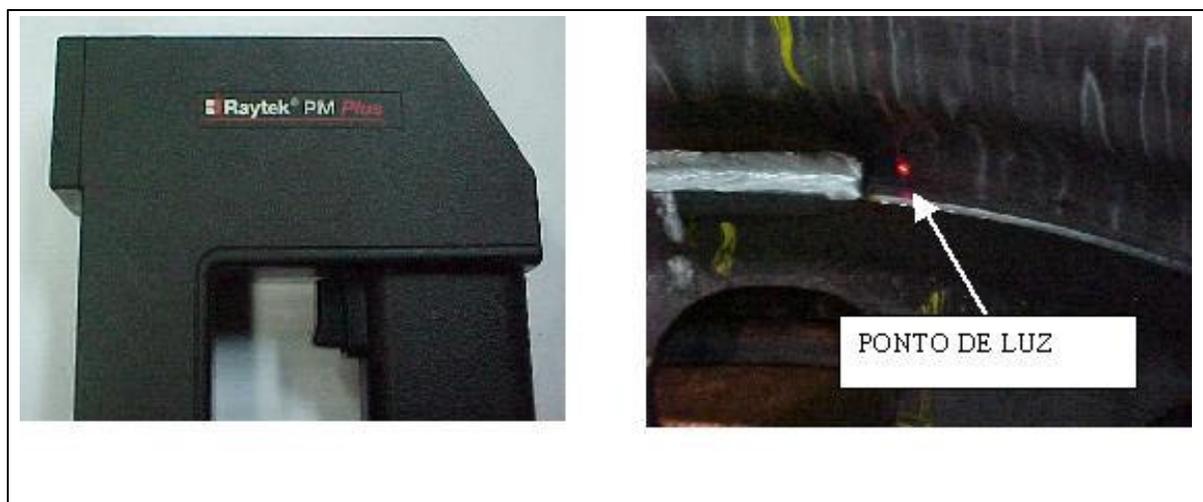
**Figura 4.13** – Cordão de solda da corrida nº 19.

Apenas para efeito de complementação do trabalho, a **Tabela 4.7** relaciona as corridas com o número de cada roda.

RODA Nº	NÚMERO DAS CORRIDAS
01	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10 e 11
02	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19
03	20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27
04	28, 29, 30 e 31

**Tabela 4.7** – Testes para cada roda.

Como se optou pela utilização de 04 rodas, teve-se o cuidado de garantir a temperatura inicial de teste para cada junta de soldagem. Isto foi necessário, pois à medida que se realizavam as corridas, havia um aquecimento da roda como um todo, pois a dissipação de calor era grande. Para isto, os cordões foram soldados sempre a 180° (para evitar o calor proveniente da corrida anterior) e foi utilizado um termômetro de ponto RAYTEK PM-PLUS para medição da temperatura inicial da junta (conforme **Figura 4.14**), que foi mantida entre 30°C e 60°C, garantindo assim nenhuma variação da granulação do aço, conforme o clássico diagrama ferro-carbono.

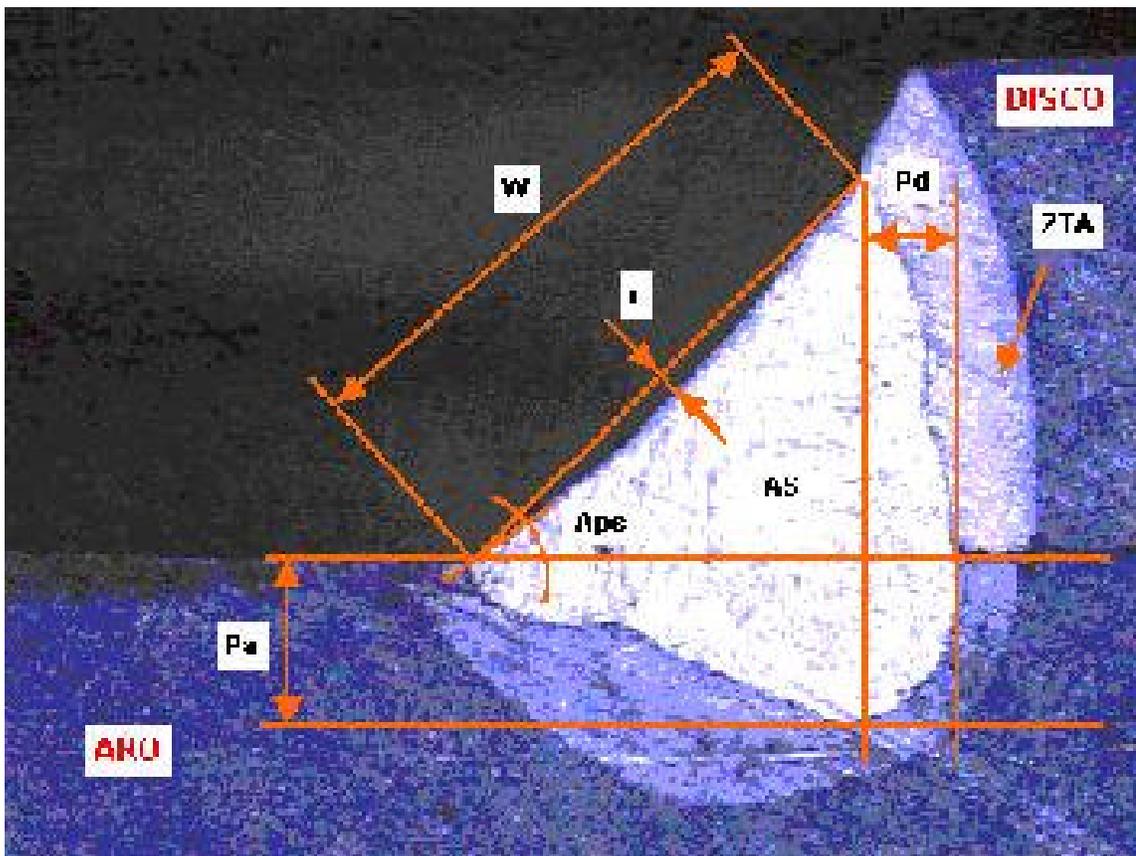


**Figura 4.14** – Termômetro RAYTEK PM Plus e medição da junta antes da solda.

## 4.7.2 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS

A determinação das respostas desejadas foi realizada através de análise macrográfica da secção central do cordão de solda.

Para a análise, foram utilizados os métodos de ataque em Nital (15%) e ampliação de 06 vezes em microscópio óptico OLYMPUS SZ-CVT, com câmara de vídeo diretamente ligada a um microcomputador, permitindo a visualização *on line* da imagem. A medição das respostas foi realizada com auxílio do Software de verificação IMAGE PRO PLUS versão 4.1. Um exemplo da medição da macrografia da junta pode ser visto através da **Figura 4.15**, que retrata a imagem captada da macrografia da corrida número 25. Pode-se verificar na mesma figura o contorno referente a ZTA (Zona Termicamente Afetada).



**Figura 4.15** – Exemplo de análise macrográfica com o software IMAGE PRO PLUS.

# CAPÍTULO 5

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nas corridas bem como as análises dos principais fatores de influência e suas interações nas respostas, além do desenvolvimento dos modelos matemáticos com aplicação da Análise de Variância (ANOVA), são os pontos básicos de discussão neste capítulo.

Basicamente utilizou-se como apoio os softwares comerciais MINITAB e Microsoft Excel para as análises estatísticas e construção dos gráficos, respectivamente.

Como metodologia de análises, após executados os experimentos e colhidos os resultados, foi determinado o modelamento matemático para cada uma das respostas analisadas, sua adequação e posterior redução, considerando os fatores significativos no processo de soldagem. Posteriormente, a influência dos fatores em cada resposta foi analisada separadamente, através dos modelos matemáticos obtidos. Então, as diretrizes para uma melhor utilização do processo foram elaboradas, considerando uma análise global do processo. Finalmente testes de validação foram realizados no intuito de comprovar as respostas previstas através da ferramenta de otimização do software MINITAB.

A seguir cada uma destas etapas será descrita separadamente.

### 5.1 RESULTADOS OBTIDOS

Todos os testes foram realizados no mesmo dia e sem interrupções. A matriz de experimentos com os respectivos resultados obtidos para as respostas estudadas pode ser verificada na **Tabela 5.1**. Vale ressaltar que também na mesma Tabela são mostrados os valores iniciais para a temperatura da junta (Símbolo “T”), verificados antes de cada teste, para garantir o correto comportamento estrutural do aço, bem como qualquer alteração microestrutural que poderia influenciar nos resultados, conforme descrito no item 4.7.1.

MATRIZ DE EXPERIMENTOS						RESPOSTAS							
Corrida	Ordem	V	I	V <sub>S</sub>	A <sub>L</sub>	P <sub>a</sub>	P <sub>d</sub>	W	r	I <sub>c</sub> (r/W)	A <sub>ps</sub>	AS	T
		V	Amps	%	°	mm	mm	mm	mm	%	°	mm <sup>2</sup>	°C
1	16	28	340	19	12	2,13	1,53	7,76	0,12	1,55	52,82	27,77	42
2	17	32	340	19	12	2,14	1,87	7,94	-0,24	-3,02	48,36	31,48	54
3	18	28	420	19	12	3,92	2,33	7,89	1,21	15,34	88,09	41,68	55
4	19	32	420	19	12	3,57	1,36	9,47	-0,33	-3,48	50,34	39,24	53
5	24	28	340	23	12	1,36	1,70	6,91	-0,18	-2,60	41,42	21,18	47
6	25	32	340	23	12	2,08	0,94	8,53	-0,12	-1,41	46,63	28,99	48
7	26	28	420	23	12	1,96	2,21	7,38	1,06	14,36	136,85	30,21	49
8	27	32	420	23	12	2,72	1,99	7,68	0,33	4,30	68,19	32,56	44
9	20	28	340	19	14	1,49	1,32	7,77	-0,60	-7,72	20,22	22,86	24
10	21	32	340	19	14	2,04	0,98	8,81	-0,61	-6,92	25,34	27,24	53
11	22	28	420	19	14	2,38	2,04	8,13	1,35	16,61	97,77	36,93	48
12	23	32	420	19	14	4,59	1,83	9,89	0,24	2,43	73,31	49,54	54
13	28	28	340	23	14	1,96	1,23	6,65	-0,06	-0,90	44,98	23,01	39
14	30	32	340	23	14	2,21	1,24	8,51	-0,58	-6,82	42,71	26,36	47
15	29	28	420	23	14	2,59	1,66	7,13	0,78	10,94	108,44	28,25	47
16	31	32	420	23	14	3,28	1,65	8,24	0,42	5,10	61,39	37,06	46
17	10	26	380	21	13	1,96	0,98	6,88	0,05	0,73	34,51	21,06	51
18	11	34	380	21	13	2,47	1,28	8,28	0,55	6,64	39,47	30,25	55
19	12	30	300	21	13	0,85	0,55	8,21	0,00	0,00	53,13	19,48	25
20	13	30	460	21	13	3,19	1,91	8,16	0,36	4,41	81,87	36,97	46
21	1	30	380	17	13	1,91	0,94	10,18	-0,82	-8,06	24,82	31,26	26
22	2	30	380	25	13	2,42	1,36	7,14	-0,39	-5,46	34,78	24,42	42
23	14	30	380	21	11	2,81	1,19	7,89	-0,06	-0,76	39,56	28,08	34
24	15	30	380	21	15	2,25	1,20	7,26	-0,49	-6,75	26,57	24,09	39
25	3	30	380	21	13	2,42	1,28	7,61	-0,30	-3,94	32,90	26,12	34
26	4	30	380	21	13	2,55	0,81	7,81	-0,36	-4,61	34,22	25,88	43
27	5	30	380	21	13	2,54	0,89	8,05	-0,33	-4,10	34,19	28,95	49
28	6	30	380	21	13	2,85	0,97	7,89	-0,27	-3,42	32,50	29,12	54
29	7	30	380	21	13	2,89	1,19	7,74	-0,30	-3,88	35,57	30,01	48
30	8	30	380	21	13	2,76	1,18	8,22	-0,24	-2,92	34,29	31,04	52
31	9	30	380	21	13	2,55	1,23	7,70	-0,36	-4,68	36,25	29,22	54

**Tabela 5.1** – Resultados obtidos no experimento.

Obtidos os resultados do experimento, o próximo passo foi o desenvolvimento dos modelos matemáticos. Para este desenvolvimento considerou-se que as respostas podem ser

expressas através da função  $y = f(V, I, V_S, A_L)$ , onde a relação selecionada segue o modelo da equação 5.1 (Gunaraj, 2000):

$$Y = b_0 + b_1V + b_2I + b_3V_S + b_4A_L + b_{11}V^2 + b_{22}I^2 + b_{33}V_S^2 + b_{44}A_L^2 + b_{12}VI + b_{13}VV_S + b_{14}VA_L + b_{23}IV_S + b_{24}IA_L + b_{34}V_S A_L \quad (5.1)$$

Através da análise de regressão, foram determinados, a partir dos resultados constantes da **Tabela 5.1**, os coeficientes dos modelos através do software MINITAB. Estes coeficientes podem ser vistos na **Tabela 5.2** para cada resposta analisada.

Coeficiente	Termo	$P_a$ (mm)	$P_d$ (mm)	Ic	$A_{ps}$ (°)	AS (mm <sup>2</sup> )
$b_0$	Livre	22,945	72,687	881,60	1646,1	400,44
$b_1$	V	-0,544	-1,629	-34,51	-10,7	-8,23
$b_2$	I	0,072	-0,050	-0,38	-2,6	-0,12
$b_3$	$V_S$	0,511	-1,153	-5,72	-4,4	-2,58
$b_4$	$A_L$	-5,394	-3,985	-36,61	-145,2	-34,57
$b_{11}$	$V^2$	-0,015	0,022	0,62	1,0	0,01
$b_{22}$	$I^2$	-0,000	0,000	0,00	0,0	0,00
$b_{33}$	$V_S^2$	-0,018	0,023	-0,03	0,6	0,14
$b_{44}$	$A_L^2$	0,019	0,103	0,63	3,2	0,13
$b_{12}$	$V*I$	0,001	-0,001	-0,03	-0,1	0,00
$b_{13}$	$V*V_S$	-0,000	0,003	0,25	-0,8	0,06
$b_{14}$	$V*A_L$	0,080	0,033	0,22	1,2	0,55
$b_{23}$	$I*V_S$	-0,003	0,000	-0,00	0,0	-0,02
$b_{24}$	$I*A_L$	0,001	0,001	0,03	0,1	0,03
$b_{34}$	$V_S*A_L$	0,099	-0,004	-0,01	-0,4	0,17

**Tabela 5.2** – Coeficientes calculados através da análise de regressão.

Após o cálculo dos coeficientes, pode-se determinar os modelos matemáticos para cada resposta separadamente. A **Tabela 5.3** apresenta os modelos completos em suas formas finais.

RESPOSTA	MODELO MATEMÁTICO COMPLETO
$P_a =$	$22,945 - 0,544*V + 0,072*I + 0,511*V_s - 5,394*A_L - 0,015*V^2 - 0,000*I^2 - 0,018*V_s^2 + 0,018*A_L^2 + 0,001*V*I - 0,000*V*V_s + 0,080*V*A_L - 0,003*I*V_s + 0,001*I*A_L + 0,099*V_s*A_L$
$P_d =$	$72,687 - 1,629*V - 0,050*I - 1,153*V_s - 3,985*A_L + 0,022*V^2 + 0,000*I^2 + 0,023*V_s^2 + 0,103*A_L^2 - 0,001*V*I + 0,003*V*V_s + 0,033*V*A_L + 0,000*I*V_s + 0,001*I*A_L - 0,004*V_s*A_L$
$I_c =$	$881,60 - 34,51*V - 0,38*I - 5,72*V_s - 36,61*A_L + 0,62*V^2 + 0,00*I^2 - 0,03*V_s^2 + 0,63*A_L^2 - 0,03*V*I + 0,25*V*V_s + 0,22*V*A_L - 0,00*I*V_s + 0,03*I*A_L - 0,01*V_s*A_L$
$A_{ps} =$	$1646,1 - 10,7*V - 2,6*I - 4,4*V_s - 145,2*A_L + 1,0*V^2 + 0,0*I^2 + 0,6*V_s^2 + 3,2*A_L^2 - 0,1*V*I - 0,8*V*V_s + 1,2*V*A_L + 0,0*I*V_s + 0,1*I*A_L - 0,4*V_s*A_L$
$AS =$	$400,44 - 8,23*V - 0,12*I - 2,58*V_s - 34,57*A_L + 0,01*V^2 + 0,00*I^2 + 0,14*V_s^2 + 0,13*A_L^2 + 0,00*V*I + 0,06*V*V_s + 0,55*V*A_L - 0,02*I*V_s + 0,03*I*A_L + 0,17*V_s*A_L$

**Tabela 5.3** – Modelos matemáticos completos em suas formas finais.

Após a determinação dos coeficientes da regressão, foram levantados através da análise de variância (ANOVA), também utilizando o *software* MINITAB, a probabilidade  $P_{value}$ , onde a mesma é verificada através da comparação com o fator F para 14 graus de liberdade e 95% de nível de significância. Vale ressaltar que, para a adequação do modelo a um nível de significância de 95%, o valor de  $P_{value}$  deve ser menor do que  $P_{95\%} = 0,05$ . Os valores para cada modelo do experimento em análise podem ser verificados na **Tabela 5.4**.

PARÂMETRO	F	$P_{value}$	ADEQUADO?
Penetração no Aro ( $P_a$ )	4,67	0,002	Sim
Penetração no Disco ( $P_d$ )	1,51	0,214	Não
Índice de Concavidade ( $I_c$ )	2,85	0,024	Sim
Ângulo do Pé de Solda ( $A_{ps}$ )	3,22	0,014	Sim
Área da Solda ( $AS$ )	5,57	0,001	Sim

**Tabela 5.4** – Valores obtidos nos testes ANOVA de adequação dos modelos matemáticos.

Observa-se que os modelos são adequados para um nível de significância de 95%, com exceção do modelo proposto para a penetração no disco ( $P_d$ ). Todavia, deve-se verificar ainda a adequação dos modelos reduzidos. A próxima etapa de análise foi o teste de significância dos coeficientes, realizado utilizando-se também o *software* MINITAB. Neste

teste determinou-se os valores de  $R^2$  ajustado e do erro padrão esperado em cada modelo. Os resultados dos testes podem ser vistos nas **Tabelas 5.5 e 5.6**.

RESPOSTA	$R^2$ (Ajustado) - %	Erro Padrão (E)
Penetração no aro ( $P_a$ )	63,1	0,446
Penetração no disco ( $P_d$ )	19,1	0,394
Índice de convexidade ( $I_c$ )	46,4	4,986
Ângulo do pé de solda ( $A_{ps}$ )	50,9	18,970
Área da solda ( $AS$ )	68,1	3,663

**Tabela 5.5** – Valores de  $R^2$  (ajustado) e erros padrão (E) para os modelos completos.

Termo	Coeficiente	Probabilidade de Significância ( $P_{value}$ )				
		$P_a$ (mm)	$P_d$ (mm)	$I_c$	$A_{ps}$ (°)	$AS$ (mm <sup>2</sup> )
Livre	$b_0$	<b>0,650</b>	<b>0,116</b>	<b>0,131</b>	<b>0,446</b>	<b>0,340</b>
V	$b_1$	<b>0,746</b>	<b>0,280</b>	<b>0,079</b>	<b>0,881</b>	<b>0,552</b>
I	$b_2$	<b>0,345</b>	<b>0,453</b>	<b>0,653</b>	<b>0,421</b>	<b>0,847</b>
$V_S$	$b_3$	<b>0,739</b>	<b>0,400</b>	0,739	<b>0,946</b>	<b>0,838</b>
$A_L$	$b_4$	<b>0,107</b>	<b>0,173</b>	<b>0,316</b>	<b>0,296</b>	<b>0,202</b>
$V^2$	$b_{11}$	0,481	<b>0,258</b>	<b>0,017</b>	<b>0,254</b>	0,976
$I^2$	$b_{22}$	0,210	<b>0,150</b>	<b>0,037</b>	<b>0,004</b>	0,347
$V_S^2$	$b_{33}$	0,397	<b>0,233</b>	0,899	<b>0,509</b>	0,420
$A_L^2$	$b_{44}$	0,826	<b>0,183</b>	0,508	<b>0,378</b>	0,854
$V*I$	$b_{12}$	0,333	0,681	<b>0,060</b>	<b>0,029</b>	0,889
$V*V_S$	$b_{13}$	1,000	0,901	0,430	0,509	0,785
$V*A_L$	$b_{14}$	<b>0,171</b>	0,511	0,726	0,632	<b>0,244</b>
$I*V_S$	$b_{23}$	<b>0,053</b>	0,736	0,977	0,638	<b>0,061</b>
$I*A_L$	$b_{24}$	0,708	0,727	<b>0,298</b>	<b>0,491</b>	<b>0,236</b>
$V_S*A_L$	$b_{34}$	<b>0,094</b>	0,930	0,987	0,870	0,720

**Tabela 5.6** – Significância (P) dos coeficientes dos modelos completos (obs.- valores em negrito foram aqueles considerados significativos na resposta em questão).

A probabilidade  $P_{value}$  para os coeficientes, indicada na **Tabela 5.6**, exprime a significância dos coeficientes dentro dos modelos. Quanto menor o valor de  $P_{value}$ , maior a significância do mesmo dentro do modelo, sendo que na Tabela 5.6 os valores em negrito indicam aqueles considerados significativos. Logicamente, mesmo com altos valores para

$P_{\text{value}}$ , foram considerados os fatores individuais nos modelos reduzidos em casos de interações significativas.

A partir daí, foi possível a determinação do modelo matemático reduzido, através da eliminação dos coeficientes com menor significância (maior valor para  $P_{\text{value}}$ ). A **Tabela 5.7** mostra os novos coeficientes para os modelos matemáticos reduzidos, determinados através do MINITAB. Nota-se que não foi utilizado o método de arredondamento das casas decimais. Isto objetivou a obtenção de um resultado mais preciso, principalmente devido aos termos quadráticos.

Coeficiente	Termo	$P_a$ (mm)	$P_d$ (mm)	Ic	$A_{ps}$ (°)	AS (mm <sup>2</sup> )
$b_0$	Livre	29,89879	57,1827	539,855	1580,14	148,82
$b_1$	V	-0,917917	-1,32848	-25,5868	-12,4452	-5,97042
$b_2$	I	0,0759063	-0,0456436	-0,366336	-2,00904	0,244172
$b_3$	$V_S$	-0,251667	-0,955521	*	-22,7817	7,44948
$b_4$	$A_L$	-4,50604	-2,75054	-13,7425	-118,469	-27,7337
$b_{11}$	$V^2$	*	0,0215997	0,610517	1,04848	*
$b_{22}$	$I^2$	*	0,0000696243	0,00129504	0,00738839	*
$b_{33}$	$V_S^2$	*	0,0228497	*	0,599107	*
$b_{44}$	$A_L^2$	*	0,102649	*	3,21268	*
$b_{12}$	$V*I$	*	*	-0,0315625	-0,141813	*
$b_{13}$	$V*V_S$	*	*	*	*	*
$b_{14}$	$V*A_L$	0,080	*	*	*	0,553750
$b_{23}$	$I*V_S$	-0,00290625	*	*	*	-0,0230469
$b_{24}$	$I*A_L$	*	*	0,0335	0,0834688	0,0281875
$b_{34}$	$V_S*A_L$	0,099375	*	*	*	*

**Tabela 5.7** – Coeficientes calculados para o modelo matemático reduzido (Obs.: \* *Coeficiente eliminado*).

A **Tabela 5.8** apresenta os modelos matemáticos reduzidos a partir dos novos coeficientes gerados na Tabela 5.7.

RESPOSTA	MODELO MATEMÁTICO REDUZIDO
$P_a =$	$29,8979 - 0,917917 * V + 0,0759063 * I - 0,251667 * V_s - 4,50604 * A_L + 0,080 * V * A_L - 0,00290625 * I * V_s + 0,099375 * V_s * A_L$
$P_d =$	$57,1827 - 1,32848 * V - 0,0456436 * I - 0,955521 * V_s - 2,75054 * A_L + 0,0215997 * V^2 + 0,0000696243 * I^2 + 0,102649 * A_L^2 + 0,0228497 * V_s^2$
$I_c =$	$539,855 - 25,5868 * V - 0,366336 * I - 13,7425 * A_L + 0,610517 * V^2 + 0,00129504 * I^2 - 0,0315625 * V * I + 0,0335 * I * A_L$
$A_{ps} =$	$1580,14 - 12,4452 * V - 2,00904 * I - 22,7817 * V_s - 118,769 * A_L + 1,04848 * V^2 + 0,00738839 * I^2 + 3,21268 * A_L^2 + 0,599107 * V_s^2 - 0,141813 * V * I + 0,0834688 * I * A_L$
$AS =$	$148,82 - 5,97042 * V + 0,244172 * I + 7,44948 * V_s - 27,7337 * A_L + 0,553750 * V * A_L - 0,0230469 * I * V_s + 0,0281875 * I * A_L$

**Tabela 5.8** – Modelos matemáticos reduzidos em suas formas finais.

Os novos valores para a probabilidade  $P_{value}$ ,  $R^2$  (ajustado) e erro padrão são mostrados na **Tabela 5.9**. Nota-se que na redução o modelo matemático para a Penetração no Disco ( $P_d$ ) passa a ser adequado.

RESPOSTA	$R^2$ (ajustado) - %	Erro Padrão (E)	P	Adequado?
Penetração no aro ( $P_a$ )	68,1	0,415	0,000	Sim
Penetração no disco ( $P_d$ )	37,9	0,345	0,013	Sim
Índice de convexidade ( $I_c$ )	59,0	4,360	0,000	Sim
Ângulo do pé de solda ( $A_{ps}$ )	58,4	17,46	0,001	Sim
Área da solda ( $AS$ )	75,4	3,215	0,000	Sim

**Tabela 5.9** – Valores de  $R^2$  (ajustado), erros padrão e P para os modelos reduzidos.

Observa-se que todos os modelos continuam adequados, tendo os valores de  $P_{value}$  ainda diminuídos, o que aumenta a adequação do mesmo. Além disto, os valores de  $R^2$  (ajustado) sofreram aumento e os valores para o erro padrão diminuição, o que aumenta a confiabilidade do modelamento. A **Tabela 5.10** apresenta um quadro comparativo para os valores de  $R^2$  (ajustado) e erro padrão para os modelos matemáticos completo e reduzido.

RESPOSTA	R <sup>2</sup> (ajustado)		Erro Padrão	
	Completo	Reduzido	Completo	Reduzido
Penetração no aro ( P <sub>a</sub> )	0,631	0,681	0,446	0,415
Penetração no disco ( P <sub>d</sub> )	0,191	0,379	0,394	0,345
Índice de convexidade ( I <sub>c</sub> )	0,464	0,590	4,986	4,360
Ângulo do pé de solda ( A <sub>ps</sub> )	0,509	0,584	18,97	18,97
Área da solda ( AS )	0,681	0,754	3,660	3,215

**Tabela 5.10** – Valores de R<sup>2</sup> (ajustado) e erros padrão para os modelos completo e reduzido.

Finalizando a determinação dos modelos matemáticos, o próprio *software* MINITAB sugere o tipo de regressão mais adequado (linear, quadrática ou interação), baseando-se no teste F para um nível de significância de 95%. A **Tabela 5.11** apresenta os valores de P<sub>value</sub>, bem como o tipo de regressão mais adequado para os modelos reduzidos.

Resposta	Valores de P <sub>value</sub>				Regressão Adequada
	Regressão	Regressão Linear	Regressão Quadrática	Regressão Interação	
Penetração no aro ( P <sub>a</sub> )	0,000	0,011	-	0,026	Linear
Penetração no disco ( P <sub>d</sub> )	0,013	0,195	0,171	-	Quadrática
Índice de convexidade ( I <sub>c</sub> )	0,000	0,127	0,004	0,049	Quadrática
Ângulo do pé de solda ( A <sub>ps</sub> )	0,001	0,731	0,024	0,044	Linear
Área da solda ( AS )	0,000	0,001	0,423	0,049	Linear

**Tabela 5.11** – Valores de P<sub>value</sub> para os tipos de regressão nos modelos reduzidos.

Através da determinação dos modelos reduzidos, partiu-se para a análise dos efeitos dos parâmetros significativos bem como de suas interações nas respostas.

## 5.2 EFEITOS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Na análise dos efeitos individuais de cada parâmetro através dos modelos matemáticos reduzidos, utilizou-se a representação gráfica dos parâmetros a serem estudados nos limites  $-2$  ,  $-1$  ,  $0$  ,  $+1$  e  $+2$  , mantendo-se constante os demais parâmetros no nível intermediário (zero).

### 5.2.1 EFEITOS DOS PARÂMETROS PARA PENETRAÇÃO NO ARO

#### (Pa)

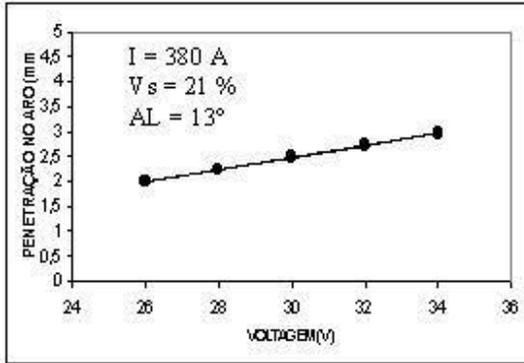
O modelo reduzido proposto para a penetração no aro ( $P_a$ ) pode ser visto na equação (5.2).

$$P_a = 29,8979 - 0,917917 * V + 0,0759063 * I - 0,251667 * V_S - 4,50604 * A_L + 0,080 * V * A_L - 0,00290625 * I * V_S + 0,099375 * V_S * A_L \quad (5.2)$$

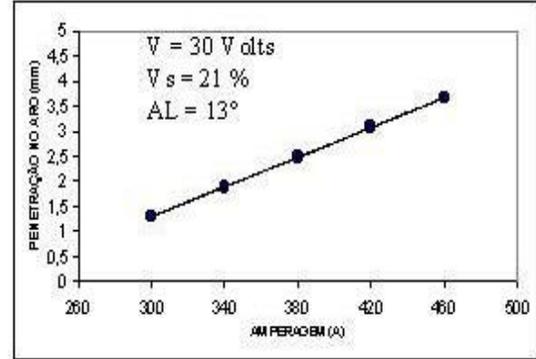
Através do modelo, é possível identificar que os parâmetros tensão ( $V$ ), corrente ( $I$ ) e velocidade de soldagem ( $V_S$ ) mostram-se significativos e comportam-se de acordo com o esperado na literatura, sendo que para o ângulo longitudinal da tocha ( $A_L$ ) o efeito da variação do mesmo é bastante pequeno. Também as interações  $V \times I$  e  $V_S \times A_L$  influenciam na penetração do aro.

A **Figura 5.1** mostra a influência da tensão, intensidade de corrente, velocidade de soldagem e inclinação da tocha na penetração do aro. Observa-se que com relação a tensão do arco, **Figura 5.1(a)**, o aumento da voltagem causa, em consequência, aumento na penetração do aro, sendo esta relação linear positiva. O comportamento da corrente, **Figura 5.1(b)**, é semelhante ao da tensão, porém com efeito mais significativo na penetração no aro. Isto pode ser verificado através da análise dos coeficientes. No entanto, para a velocidade de soldagem, **Figura 5.1(c)**, tem-se o efeito inverso da tensão e corrente. O aumento da velocidade de soldagem causa uma diminuição da penetração no aro, sendo este efeito também linear. Em relação ao ângulo longitudinal, o aumento do mesmo causa uma leve tendência de diminuição dos valores de penetração para as condições estabelecidas na **Figura 5.1(d)**. Porém, observa-se que este efeito é bem menos significativo que os parâmetros anteriores, como esperado.

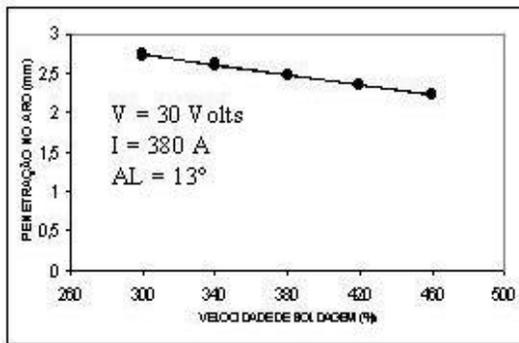
Em princípio, como se pretende maximizar a penetração do aro, porém para níveis próximos a 30% da espessura da chapa (aproximadamente 2,0 mm), observando apenas os efeitos individuais dos parâmetros, sugere-se que a combinação ideal para tal seja de utilizar-se a tensão no nível intermediário, associado a uma corrente também no nível intermediário e uma velocidade em seu nível mínimo. Porém, no caso desta velocidade o aspecto de produtividade é afetado, já que o interessante seria trabalhar com o máximo de velocidade, objetivando um menor tempo de ciclo. Há que se considerar ainda o aspecto prático desta condição, já que muitas vezes o incremento da corrente exige em contrapartida o aumento da velocidade de soldagem para garantir a qualidade do cordão. Com relação ao ângulo longitudinal, sugere-se que o mesmo seja mantido em seu nível mínimo.



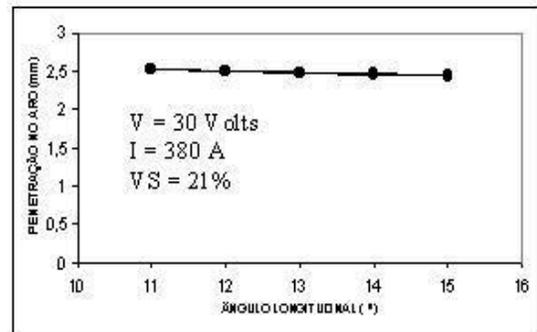
(a)



(b)



(c)

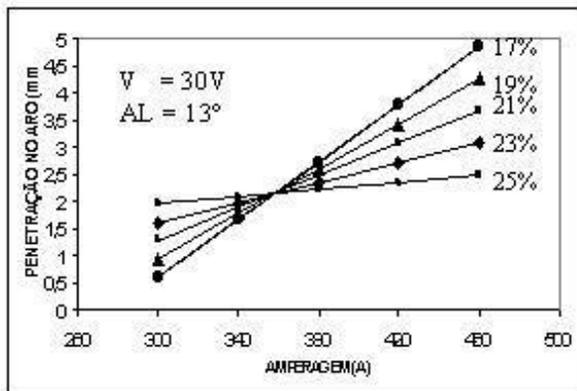


(d)

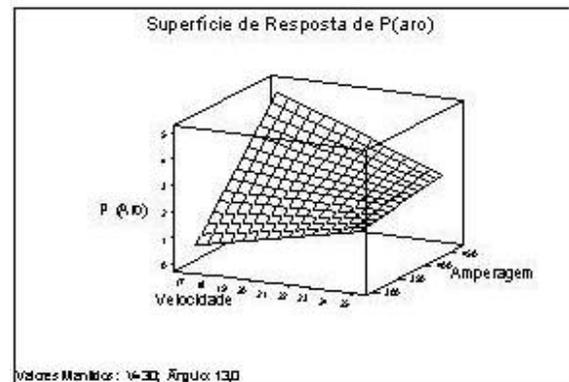
**Figura 5.1** – Efeito dos parâmetros na penetração do aro: (a) Tensão; (b) Corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal.

Em relação às interações significativas, as **Figuras 5.2, 5.3 e 5.4** mostram os efeitos de  $V \times A_L$ ,  $I \times V_s$  e  $V_s \times A_L$  respectivamente, na penetração no Aro ( $P_a$ ).

Considerando a interação da corrente com a velocidade de soldagem (**Figuras 5.2a e 5.2b**), observa-se que para uma máxima corrente do processo a utilização de uma baixa velocidade maximiza a penetração, porém diminui a produtividade do sistema, já que o ciclo da operação torna-se maior. Por outro lado, a utilização de uma alta velocidade de soldagem diminui a penetração do aro, o que não é o objetivo. Desta forma, uma melhor solução é a utilização de uma velocidade média de 21%, sendo tal nível reforçado através da interação desta variável ( $V_s$ ) com o ângulo da tocha (**Figuras 5.3a e 5.3b**). Observa-se que para o nível de velocidade intermediário, independentemente da inclinação da tocha, a penetração do aro permanece praticamente constante. Porém, observando o gráfico e a superfície de resposta da interação tensão e ângulo da tocha (**Figuras 5.4a e 5.4b**), nota-se que a maior penetração no aro é obtida com a utilização da tensão e ângulo da tocha em seus níveis máximos.

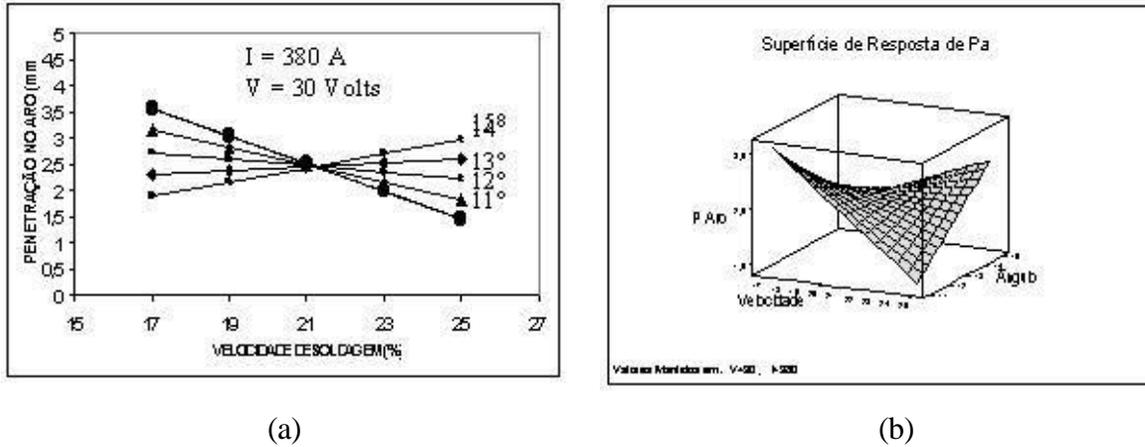


(a)

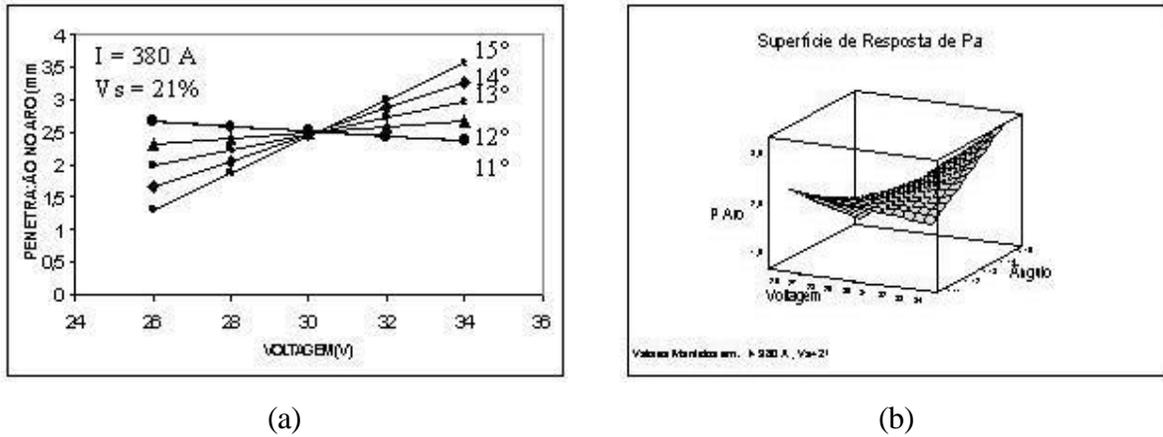


(b)

**Figura 5.2** – Efeito da interação  $I \times V_s$  nos parâmetros para penetração do aro: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).



**Figura 5.3** – Efeito da interação  $V_s \times A_L$  nos parâmetros para penetração do aro: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).



**Figura 5.4** – Efeito da interação  $V \times A_L$  nos parâmetros para penetração do aro: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).

Considerando todos estes aspectos, parece ser a melhor combinação de parâmetros, no que tange à penetração do aro para valores próximos a 2 mm (evitando fragilizar a estrutura) e produtividade da solda, a seguinte combinação:

$$I(0), V(0), v_s(0), A_L(+2)$$

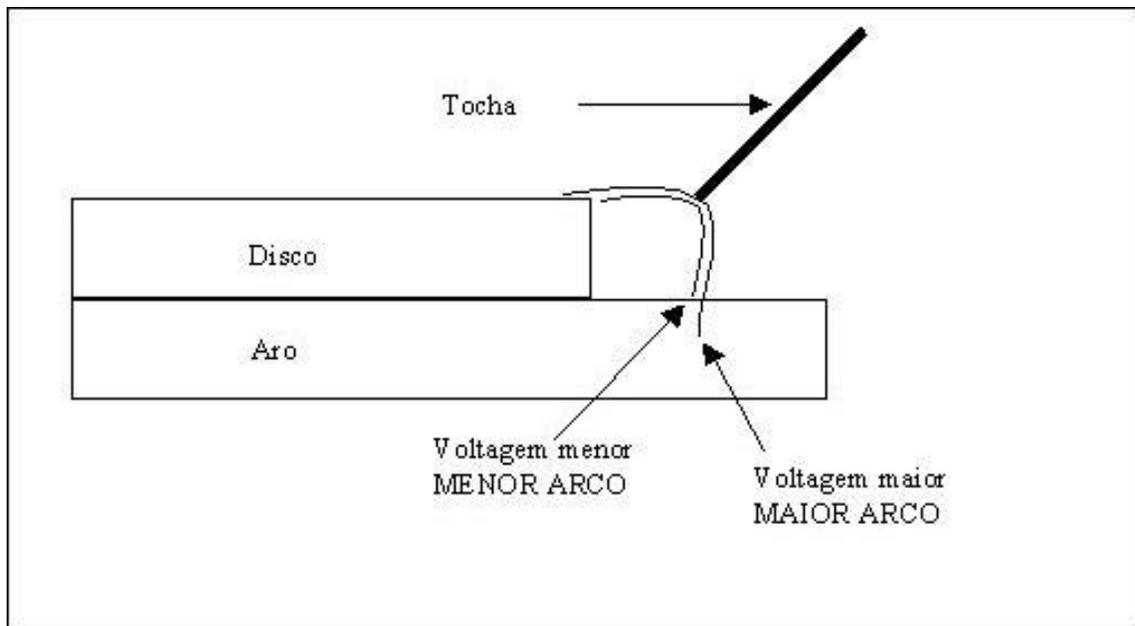
## 5.2.2 EFEITOS DOS PARÂMETROS PARA PENETRAÇÃO NO DISCO (Pd)

Para a penetração no disco (Pd), o modelo reduzido proposto pode ser visto na equação (5.3) abaixo:

$$P_d = 57,1827 - 1,32848 * V - 0,0456436 * I - 0,955521 * V_s - 2,75054 * A_L + 0,0215997 * V^2 + 0,0000696243 * I^2 + 0,102649 * A_L^2 + 0,0228497 * V_s^2 \quad (5.3)$$

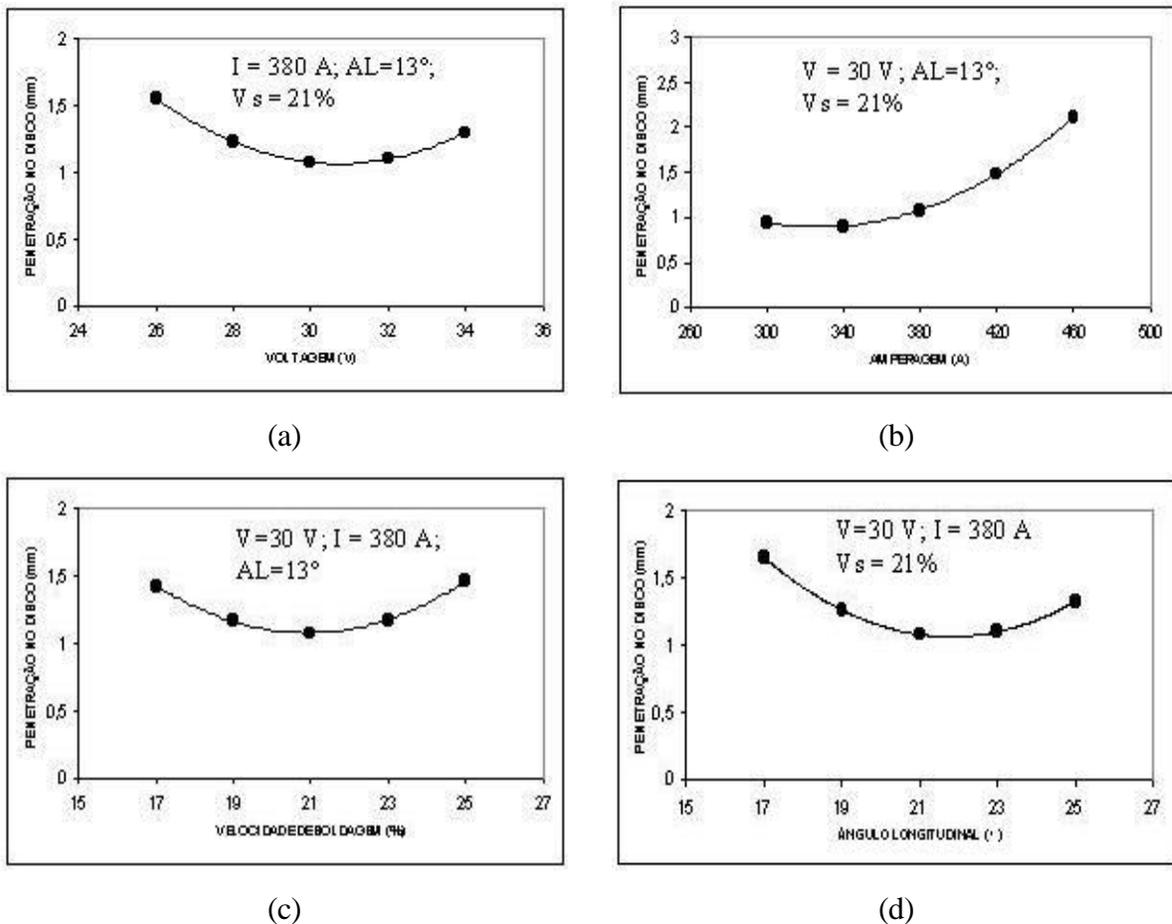
Pelo modelo, é possível identificar que os parâmetros voltagem, amperagem, velocidade de soldagem e ângulo longitudinal influenciam na penetração do disco, tanto em termos lineares quanto quadráticos.

Analisando os efeitos individuais dos parâmetros, observa-se que o aumento da tensão causa diminuição da penetração do disco (**Figura 5.6a**), diferentemente do comportamento esperado na literatura e também dos resultados obtidos para a penetração no aro. Este fato pode ser explicado pela abrangência do cordão, já que quanto maior a voltagem, maior também é o arco e a abertura do mesmo, sendo que esta abertura causa um efeito maior no aro. A representação deste efeito pode ser vista na **Figura 5.5**. Quanto ao pequeno acréscimo da penetração do disco observado no final da curva, este pode ser explicado por uma imprecisão do modelo estabelecido.



**Figura 5.5** – Efeito da abrangência do cordão na penetração do disco.

O efeito da amperagem, visto na **Figura 5.6 (b)**, mostra que correntes maiores causam maiores penetrações, conforme também já esperado, e o efeito da abrangência do cordão não apresenta influência para este caso. Para a velocidade de soldagem (**Figura 5.6c**), também ocorre o esperado nas hipóteses, já que velocidades maiores de soldagem implicam em uma diminuição da penetração. Da mesma forma, o pequeno aumento da penetração do disco nas velocidades maiores pode ser explicado por uma imprecisão do modelo. O efeito do ângulo longitudinal, visto na **Figura 5.6 (d)**, mostra que o aumento do ângulo longitudinal causa diminuição da penetração do disco. Este efeito pode ser explicado pelo posicionamento da tocha, já que quanto maior o ângulo maior é a aproximação da tocha na chapa do aro. Também para este caso, o pequeno aumento no final da curva é explicado por uma imprecisão do modelo.



**Figura 5.6** – Efeito dos parâmetros na penetração no disco: (a) voltagem; (b) corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal.

Em princípio, como se pretende neste caso também maximizar a penetração no disco associado a uma boa produtividade do cordão, sugere-se destes efeitos dos parâmetros que a voltagem para este caso deve ser mantida no mínimo, associado a uma velocidade máxima e ângulo longitudinal no mínimo. A corrente, por sua vez, deve ser ajustada no nível máximo. Como a penetração no disco deve ser associada à penetração no aro, considerando os efeitos dos parâmetros no comportamento da soldagem no aro, há a indicação de que as condições estipuladas neste caso podem ser perfeitamente aplicáveis ao disco, sem prejuízo de sua qualidade. Desta forma, ambos os casos seriam atendidos.

Considerando todos estes aspectos, sugere-se para que a penetração do disco e produtividade da solda sejam beneficiados em conjunto com a penetração do aro a seguinte combinação deva ser implementada:

$$I(0), V(0), v_s(0), A_L(+2)$$

### 5.2.3 EFEITOS DOS PARÂMETROS PARA O ÍNDICE DE CONVEXIDADE (IC)

A equação (5.4) mostra o modelo matemático reduzido para o Índice de convexidade (Ic):

$$Ic = 539,855 - 25,5868 * V - 0,366336 * I - 13,7425 * A_L + 0,610517 * V^2 + 0,00129504 * I^2 - 0,0315625 * V * I + 0,0335 * I * A_L \quad (5.4)$$

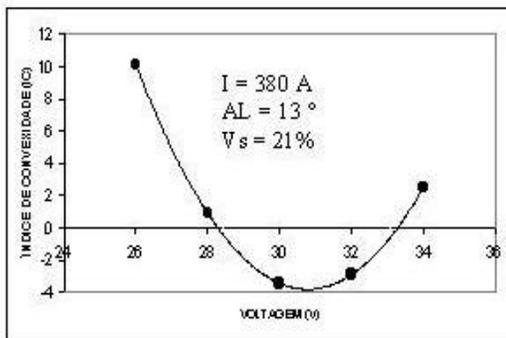
De acordo com o modelo, os parâmetros significativos são apenas a Voltagem (V), Amperagem (I) e Ângulo Longitudinal ( $A_L$ ). Também os termos quadráticos da Voltagem (V) e Amperagem (I) e as interações V x I e I x  $A_L$  são significativas no índice de convexidade do cordão.

Como a velocidade de soldagem não afeta a convexidade do cordão, sugere-se que o seu nível seja mantido nas mesmas condições analisadas anteriormente, ou seja,  $V_s$  médio de 21%.

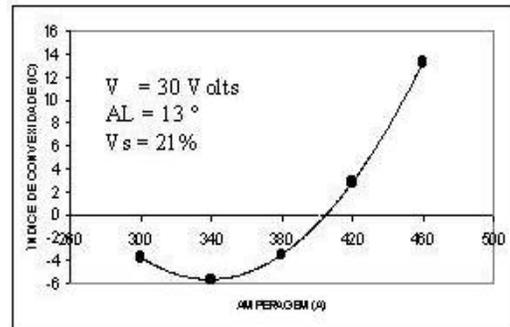
Com relação aos fatores significativos, seus efeitos isolados permitem tirar algumas conclusões com relação à convexidade geométrica ideal do cordão. Observa-se que o aumento da voltagem (**Figura 5.7b**) causa diminuição do índice de convexidade, tendo um pequeno aumento para voltagens mais altas. Isto se deve ao fato da energia cinética das gotículas de solda, pois trata-se de um modo de transferência por spray. Pode-se dizer que, do ponto de vista físico, é de supor-se que a baixa tensão, que corresponde a um pequeno comprimento de

arco, não permite que as gotas transferidas adquiram uma velocidade cinética suficiente para incrementar a penetração do cordão, e assim o reforço será aumentado, ocasionando aumento da convexidade. No caso de altas tensões, o aumento do comprimento do arco correspondente pode provocar perda de eficiência energética da gota, diminuindo a penetração e aumentando o reforço ou a largura do cordão. Para valores de tensão entre 28 e 33 V, ter-se-á uma melhor condição do cordão e, conseqüentemente, uma penetração na raiz mais adequada. Além disso, a força do arco voltaico faz com que a concavidade do cordão predomine. Para atender os objetivos de minimização da convexidade sem gerar concavidade, parece que a melhor alternativa seja, assim como nos casos anteriores, trabalhar com altos valores de tensão.

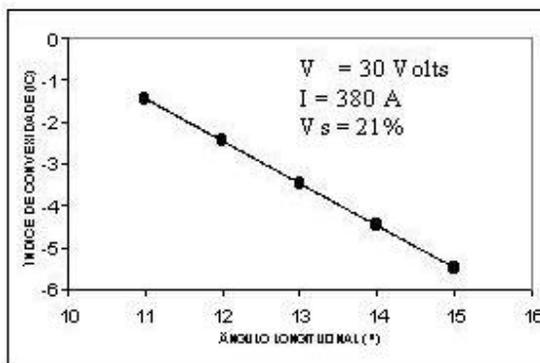
Em relação à **Figura 5.7(b)**, observa-se que o aumento da amperagem causa, de maneira geral, aumento do índice de convexidade, já que o aumento da mesma implica em uma maior taxa de deposição de material, o que faz com que o cordão tome a forma mais côncava. Já para o ângulo longitudinal (**Figura 5.7c**), era de se esperar que o seu aumento provocasse maior penetração na raiz, conseqüentemente maior força do arco voltaico, aumentando assim a possibilidade de concavidade do cordão (Figura 5.8 c). Desta forma, para a minimização desta concavidade, sugere-se que o ângulo da tocha seja mantido em seu nível máximo de 15°.



(a)



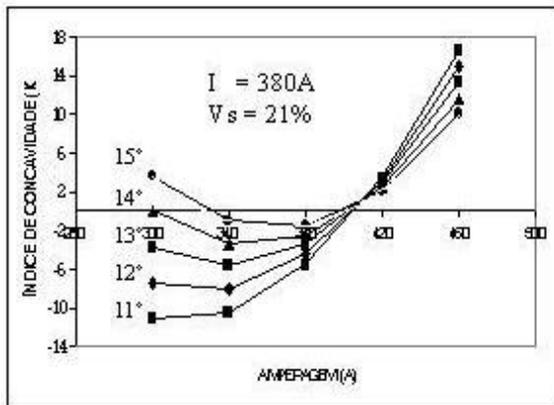
(b)



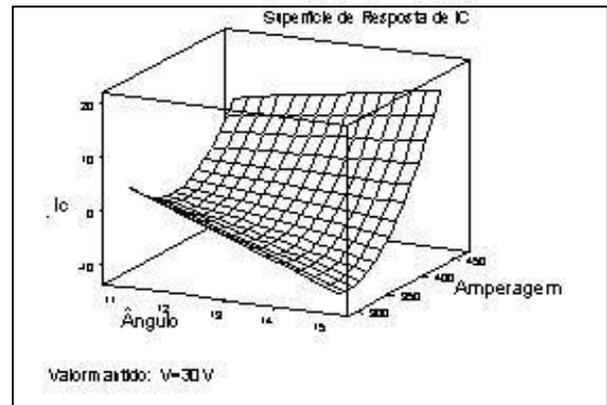
(c)

**Figura 5.7** – Efeito dos parâmetros no índice de convexidade: (a) voltagem; (b) corrente; (c) ângulo longitudinal.

Entretanto, considerando a interação significativa da corrente com o ângulo da tocha (Figura 5.8a e 5.8b), fica nítido que a utilização da corrente em 420 A permite obter uma convexidade adequada, independentemente da inclinação da tocha. Desta forma, para atender aos requisitos estabelecidos nos itens anteriores (penetração do disco e do aro), sugere-se que tal ângulo tenha a sua inclinação no máximo. Vale ressaltar ainda que da interação da corrente com a tensão do arco (Figuras 5.9a e 5.9b) observa-se que a utilização da corrente no nível anterior associado à tensão no máximo permite obter uma convexidade adequada, reforçando a hipótese inicial, sem prejuízo da produtividade da solda.

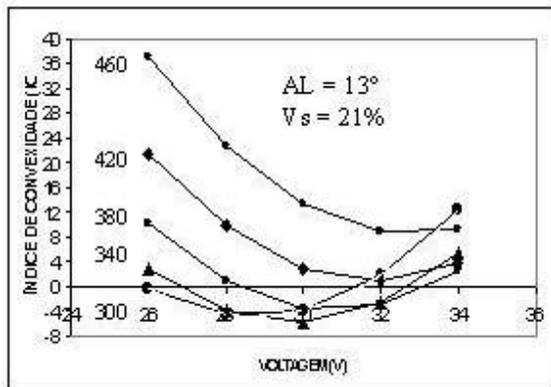


(a)

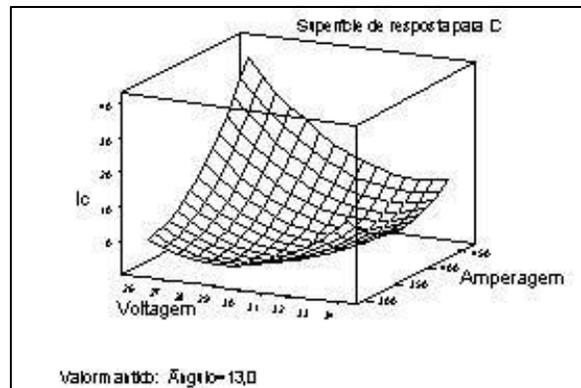


(b)

**Figura 5.8** – Efeito da interação  $V \times A_L$  nos parâmetros para índice de convexidade IC: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).



(a)



(b)

**Figura 5.9** – Efeito da interação  $I \times V$  nos parâmetros para índice de convexidade IC: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).

Considerando todos estes aspectos, sugere-se que para uma convexidade adequada, com índices de convexidade mais negativos e não influenciando de maneira significativa as penetrações do aro e do disco e também a produtividade da solda, que está diretamente relacionada à velocidade de soldagem, a seguinte combinação deva ser implementada:

$$I(0), V(0), v_s(0), A_L(+2)$$

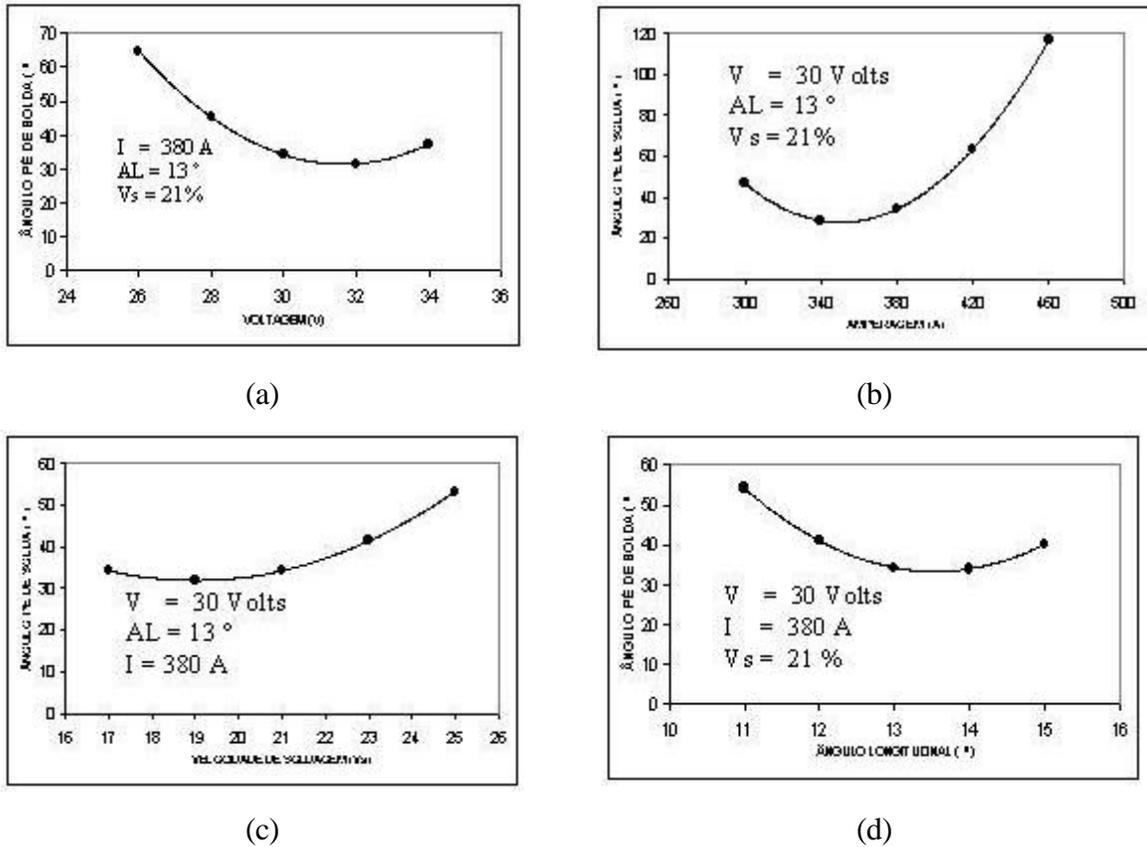
#### 5.2.4 EFEITOS DOS PARÂMETROS PARA O ÂNGULO DE PÉ DE SOLDA ( $A_{ps}$ )

Na equação (5.5), verifica-se o modelo matemático reduzido para o Ângulo do Pé de Solda ( $A_{ps}$ ):

$$\begin{aligned} A_{ps} = & 1580,14 - 12,4452*V - 2,00904*I - 22,7817*V_S - 118,769*A_L + 1,04848V^2 \\ & + 0,00738839*I^2 + 3,21268*A_L^2 + 0,599107*V_S^2 - 0,141813*V*I + 0,0834688*I*A_L \end{aligned} \quad (5.5)$$

Pelo modelo, observa-se que todos os parâmetros são significativos, tanto para os termos simples quanto quadráticos. As interações  $V \times A_L$ ,  $I \times V_S$  e  $I \times A_L$  também se mostraram significativas.

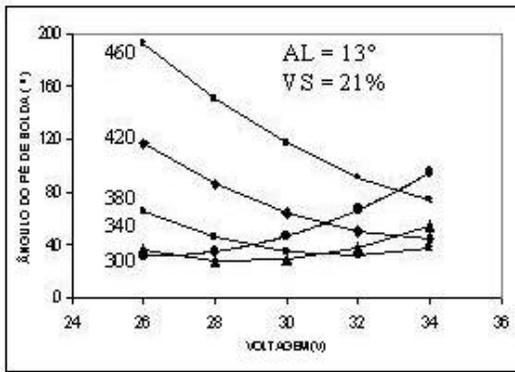
Com relação aos efeitos dos parâmetros (**Figura 5.10**), os mesmos apresentam um comportamento esperado. Com o aumento da tensão, o comprimento do arco é incrementado, e por sua vez o cordão fica mais espalhado, diminuindo o ângulo de pé de solda. A partir de aproximadamente 30 V, nota-se que este aumento não provoca alteração neste ângulo. Com relação ao aumento da corrente, maiores taxas de deposição ocorrem, o que por sua vez acarreta aumento do ângulo do pé de solda. Evidentemente que este parâmetro depende de outras interações, como ocorre, por exemplo, com a velocidade de soldagem. Valores crescentes de velocidade tornam o cordão mais fino (concentrado), o que acarreta aumento do ângulo. Com relação à inclinação da tocha, há uma tendência de aumento da força do arco (análise anterior no índice de convexidade) e, conseqüentemente, diminuição do ângulo do pé de solda. Nota-se pelos resultados obtidos (**Figura 5.10d**) uma estabilização deste ângulo a partir de uma inclinação de 13°.



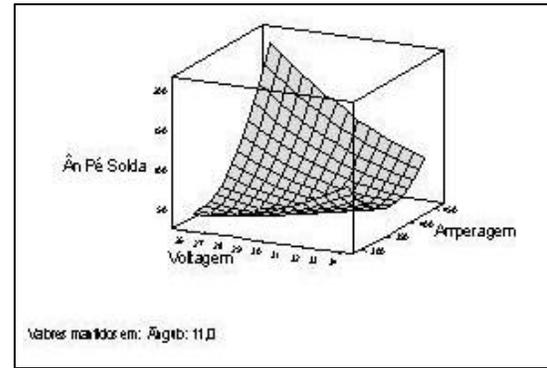
**Figura 5.10** – Efeito dos parâmetros no ângulo do pé de solda: (a) voltagem; (b) corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal.

Com relação às interações significativas, observa-se que a corrente é o parâmetro mais influente e que utilizações desta em níveis inferiores a aproximadamente 400 A conduzem a condições favoráveis do ângulo de pé de solda, evitando inclinações excessivas. Para este patamar, pode-se observar da interação  $V \times I$  (Figuras 5.11a e 5.11b) que a tensão pode ser utilizada em seu nível intermediário, garantindo um nível adequado do ângulo do pé de solda (condição esta que satisfaz os itens anteriores). Para este mesmo nível de corrente, observa-se da interação da corrente com a inclinação da tocha que este último não interfere no resultado, gerando uma condição adequada do ângulo do pé de solda. Desta forma, considerando as condições analisadas nos itens anteriores, sugere-se que a inclinação da tocha seja mantida em seu nível superior.

Com relação à velocidade de soldagem, nenhuma interação se mostrou significativa. Desta forma, observando as **Figura 5.11 e 5.12** prevê-se que a utilização da velocidade de soldagem no nível sugerido nos itens anteriores ( $\cong 21\%$ ) gere, em consequência, ângulos de pé de solda adequados garantindo ainda uma razoável produtividade do cordão de solda.

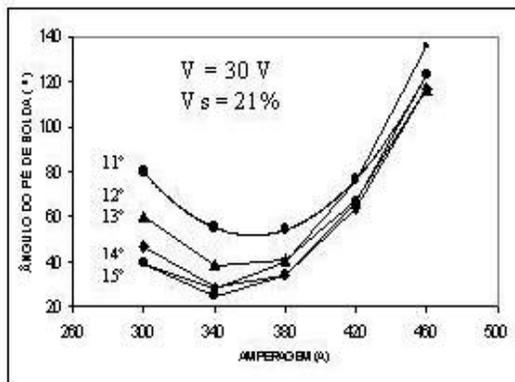


(a)

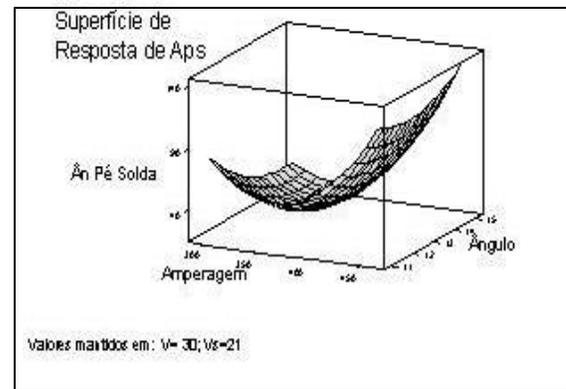


(b)

**Figura 5.11** – Efeito da interação  $I \times V$  nos parâmetros para o ângulo do pé de solda Aps: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).



(a)



(b)

**Figura 5.12** – Efeito da interação  $I \times A_L$  nos parâmetros para o ângulo do pé de solda Aps: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).

Considerando todos estes aspectos, sugere-se que para que uma inclinação adequada do ângulo do pé de solda seja obtida no cordão em conjunto com a produtividade da solda e as respostas penetração do aro e do disco e índice de convexidade, a seguinte combinação deva ser implementada:

$$I(0), V(0), vs(0), A_L(+2)$$

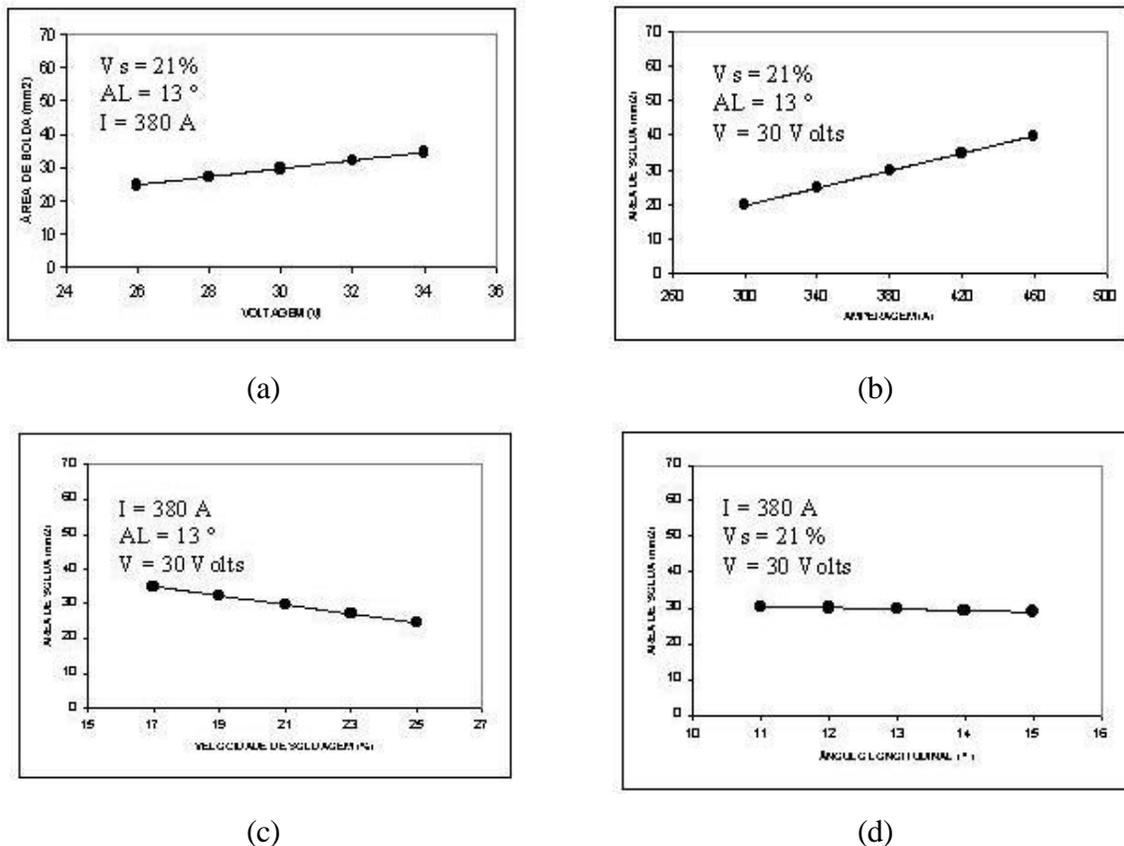
### 5.2.5 EFEITOS DOS PARÂMETROS PARA A ÁREA DE SOLDA (AS)

De acordo com o processamento dos resultados, verificou-se que o modelo matemático reduzido para a resposta área de solda (AS) pode ser determinado pela equação (5.6) abaixo:

$$AS = 148,82 - 5,97042 * V + 0,244172 * I + 7,44948 * V_s - 27,7337 * A_L + 0,553750 * V * A_L - 0,0230469 * I * V_s + 0,0281875 * I * A_L \quad (5.6)$$

Observa-se desta equação que todos os parâmetros são significativos, além das interações  $V \times A_L$ ,  $I \times V_s$  e  $I \times A_L$ .

A **Figura 5.13** mostra a influência dos parâmetros tensão, corrente, velocidade e ângulo longitudinal no comportamento da área de solda (AS). Observando o comportamento dos parâmetros, nota-se uma similaridade destes com aqueles gerados para a penetração do aro, como era de se esperar .



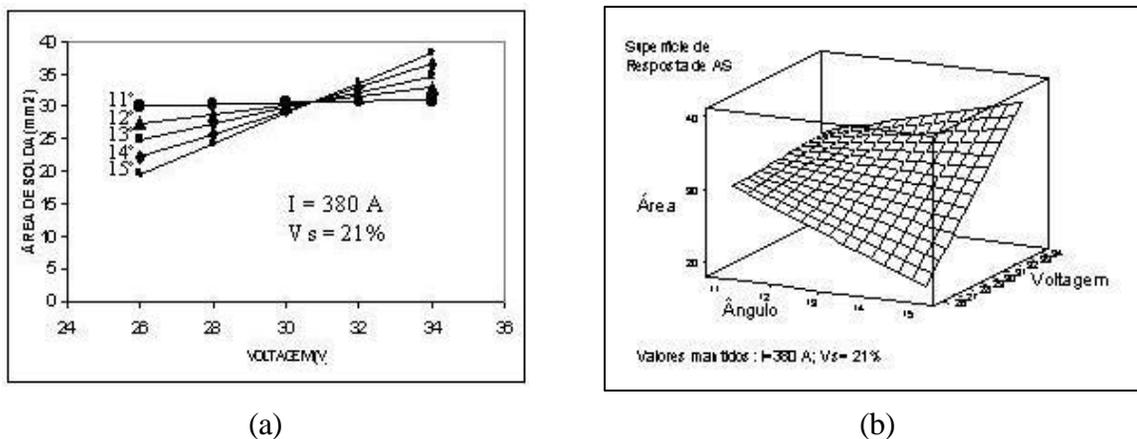
**Figura 5.13** – Efeito dos parâmetros na área de solda: (a) voltagem; (b) corrente; (c) velocidade de soldagem; (d) ângulo longitudinal.

Com relação à tensão do arco, **Figura 5.13(a)**, observa-se que o aumento da voltagem implica no aumento de AS, sendo este comportamento linear. Um comportamento similar ocorre com a intensidade de corrente, porém observa-se da **Figura 5.13(b)** que este incremento na área de solda é mais significativo que no caso da tensão.

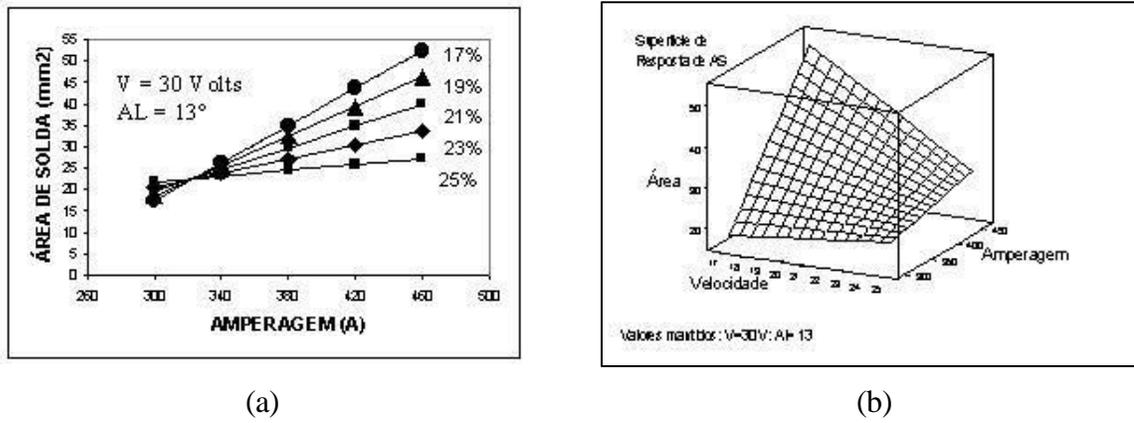
Para a velocidade de soldagem, **Figura 5.13(c)**, tem-se um comportamento diferenciado, pois o aumento desta implica na diminuição da área de solda, como também já era esperado. Para o ângulo longitudinal, **Figura 5.13(d)**, basicamente não se observa alteração na área de solda para qualquer ângulo testado.

Em relação às interações, observando a interação significativa da corrente com a velocidade de soldagem (**Figuras 5.14a e 5.14b**), verifica-se que fixando  $V_s$  no nível preconizado anteriormente de 21%, pode-se trabalhar com uma corrente média de 380 A, permitindo obter uma área de solda média que atenda aos objetivos fixados.

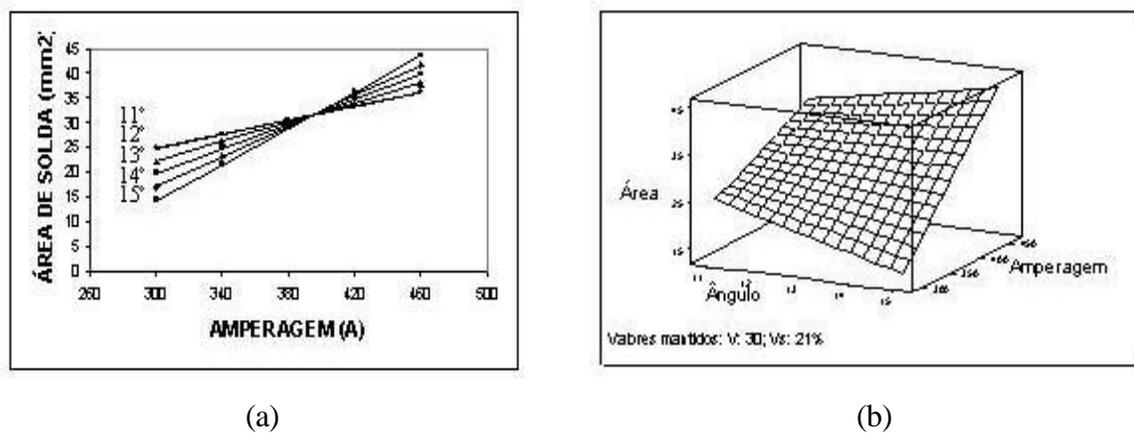
Com relação à interação da tensão com o ângulo da tocha (**Figuras 5.15a e 5.15b**) observa-se que tal interação não é tão significativa na área total da solda. Assim, a utilização de uma tensão em seu nível médio associado a uma inclinação da tocha em seu nível máximo (como preconizado nos itens anteriores) aparentemente conduz a uma condição adequada de área de solda. Entretanto, caso se queira reduzir a área, uma alternativa seria a diminuição da tensão de soldagem. A interação da corrente com a inclinação da tocha (**Figuras 5.16a e 5.16b**) confirma a pequena influência da inclinação da tocha na resposta em questão.



**Figura 5.14** – Efeito da interação  $V \times A_L$  nos parâmetros para a área de solda AS: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).



**Figura 5.15** – Efeito da interação I x Vs nos parâmetros para a área de solda AS: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).



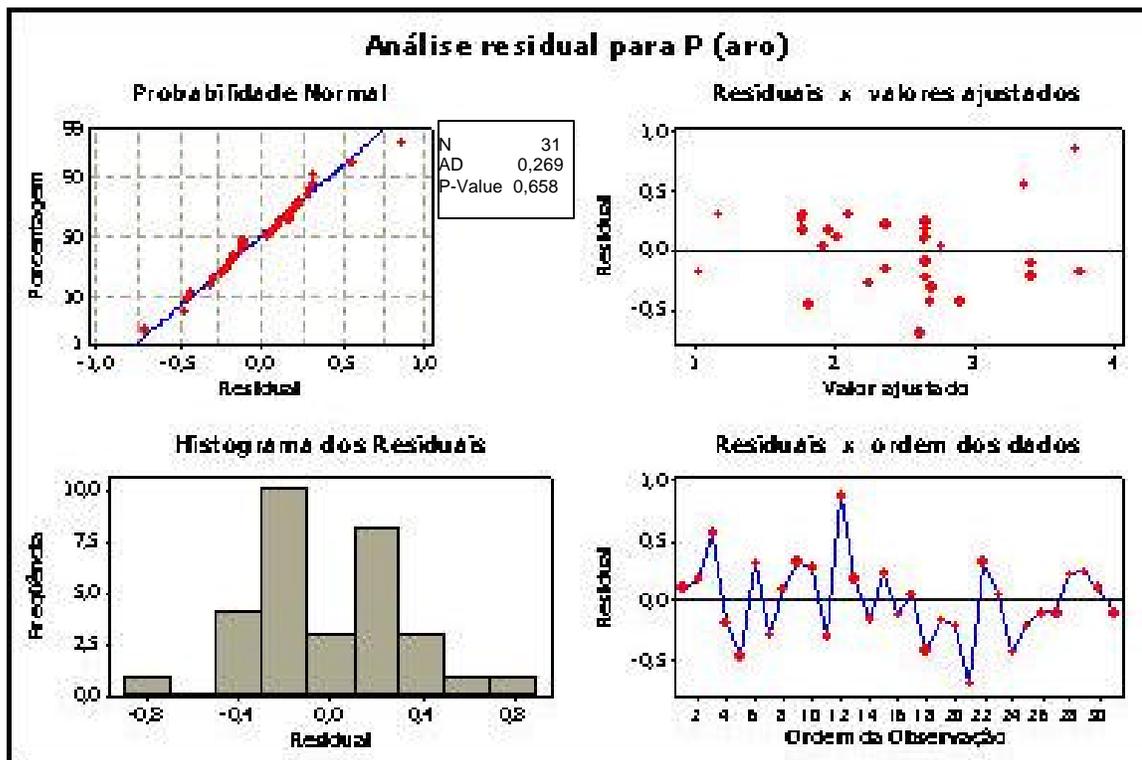
**Figura 5.16** – Efeito da interação I x AL nos parâmetros para a área de solda AS: (a) gráfico; Superfície de resposta (b).

Considerando todos estes aspectos, sugere-se para a obtenção de uma área de solda adequada média que possa atender aos requisitos da junta soldada e ainda os aspectos das respostas anteriores e econômicos do processo, que a seguinte combinação deva ser implementada:

I(0), V(0), vs (0), AL(+2) - Área média

### 5.3 ANÁLISE DE RESÍDUOS

Para se verificar se os erros do modelo são distribuídos de forma aproximadamente normal, com variância constante, realizou-se a análise dos resíduos. Com auxílio do MINITAB e utilizando o critério de Anderson-Darling (AD), onde para valores do p-value abaixo de 0,1 costuma-se rejeitar a hipótese de normalidade, foi verificada a normalidade na distribuição de resíduos de todas as respostas, com exceção do ângulo do pé de solda, onde foi obtido um valor de p-value de 0,053, porém sem grandes variações na distribuição. Assim, pode-se dizer que estes resultados demonstram ainda mais a confiabilidade dos modelos. As **Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21** mostram os gráficos da análise de resíduos para penetração no aro, penetração no disco, índice de convexidade, ângulo do pé de solda e área de solda, respectivamente.



**Figura 5.17** – Análise de resíduos para a penetração no aro.

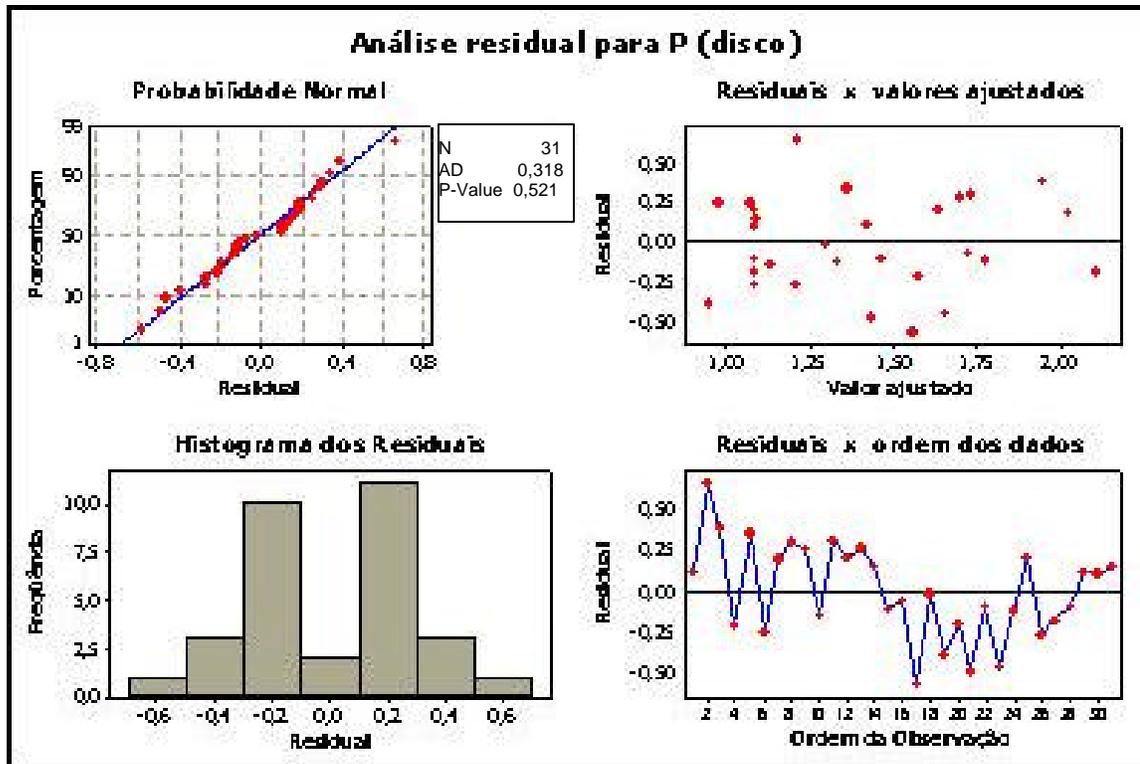


Figura 5.18 – Análise de resíduos para a penetração no disco.

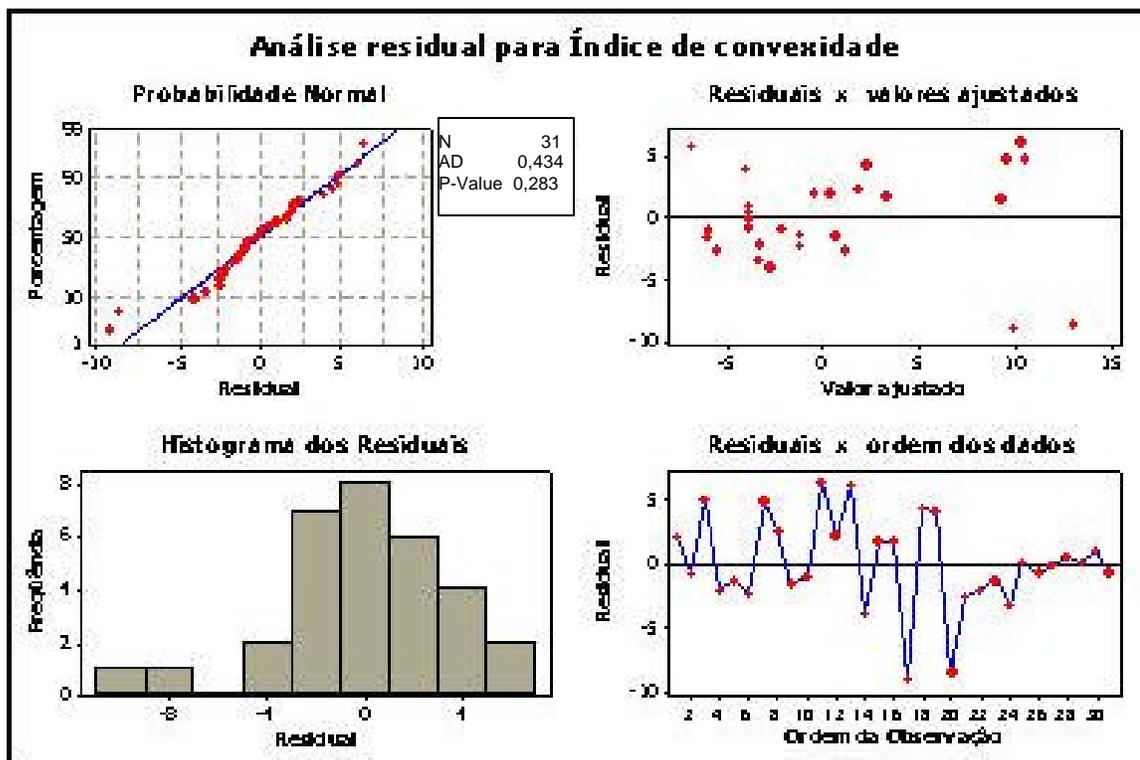


Figura 5.19 – Análise de resíduos para o índice de convexidade

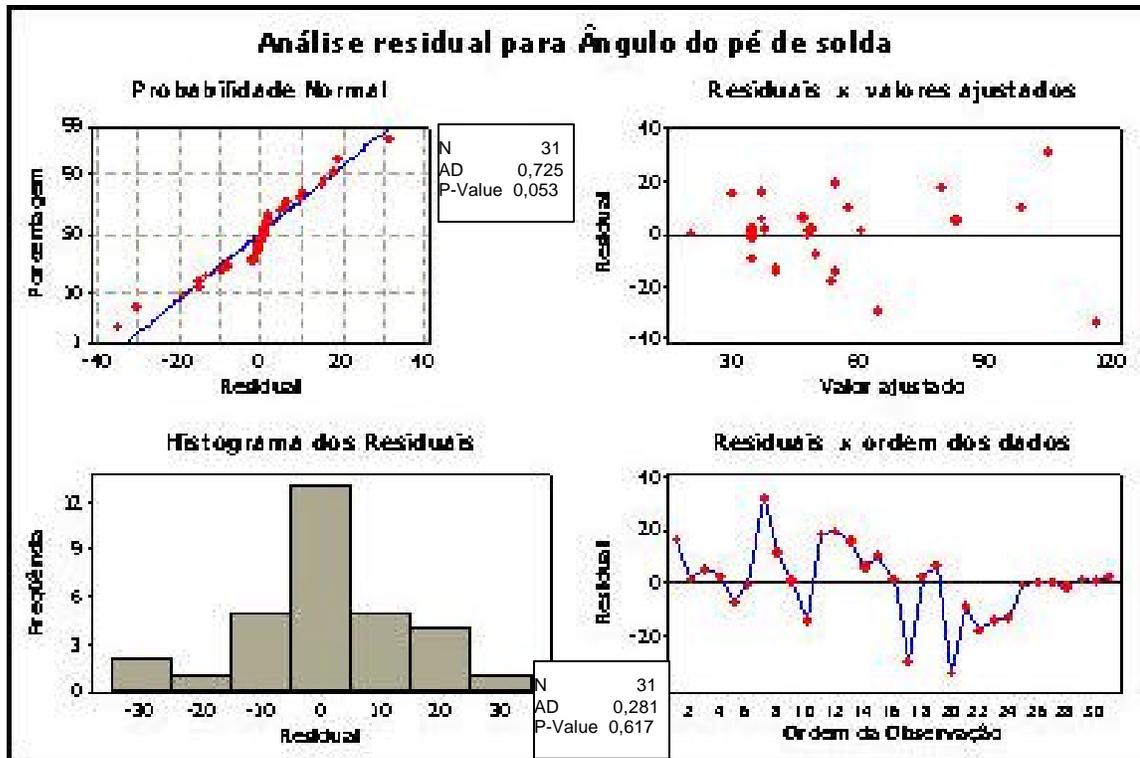


Figura 5.20 – Análise de resíduos para o ângulo do pé de solda

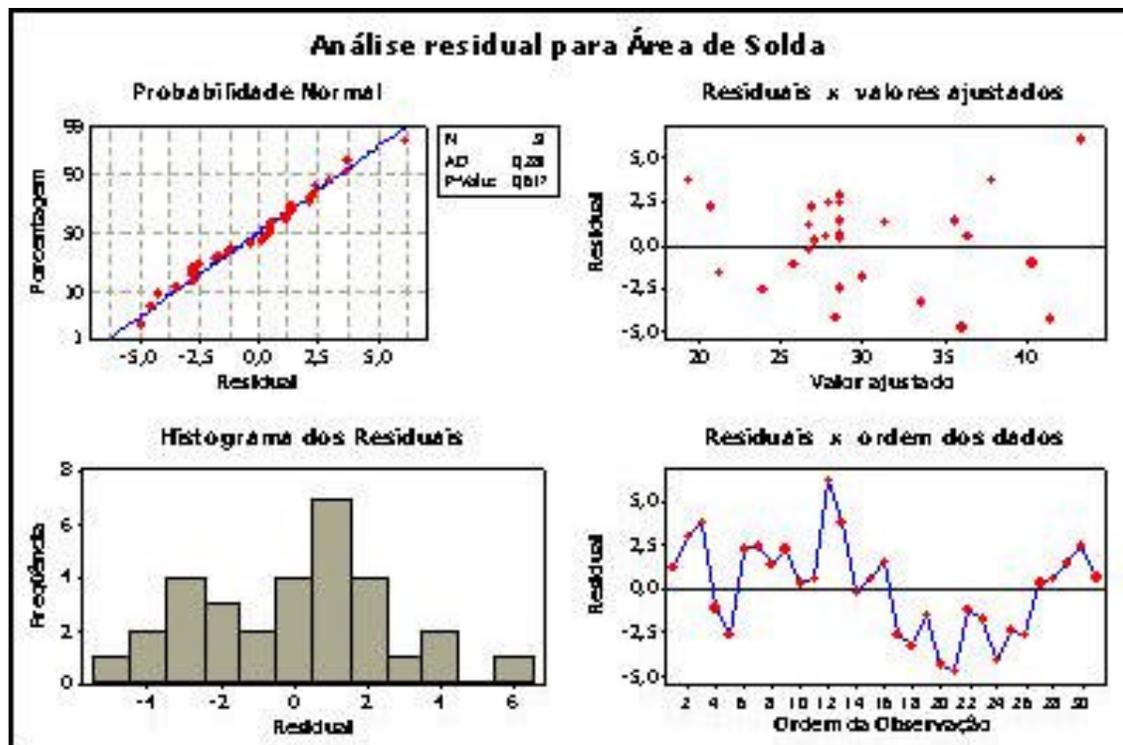


Figura 5.21 – Análise de resíduos para a área de solda

## 5.4 OTIMIZAÇÃO GERAL DO PROCESSO

Conforme verificado na Seção 4.3 do Capítulo 4, existem faixas de especificações para as características do cordão de solda. Assim, pode-se obter a melhor configuração das especificações, buscando-se:

- Garantia das especificações ou respostas;
- Maior velocidade de solda, para se obter um ciclo menor, conseqüentemente maior produtividade.

Conforme já descrito anteriormente, trabalhou-se nas seguintes faixas de velocidade de soldagem: 17%, 19%, 21%, 23% e 25%. Para cada uma destas faixas, pode ser calculada uma velocidade linear de soldagem (m/min), através da fórmula da Seção 4.6 do Capítulo 4. O ciclo (em segundos) para cada faixa de velocidade, bem como a circunferência da junta de solda, podem ser vistos na **Tabela 5.12**.

FAIXA DE VELOCIDADE (%)	CICLO (s)	CICLO (min)	f (ciclos/min)	CIRCUNFERÊNCIA (m)
17	130	2,17	0,46	1,683
19	120	2,00	0,50	
21	110	1,83	0,55	
23	100	1,67	0,60	
25	90	1,50	0,67	

**Tabela 5.12** – Tempos de ciclo para cada faixa de velocidade e circunferência do cordão.

Assim, a partir da fórmula  $v = \omega \times R$  (em m/min), obtém-se os valores para cada faixa de velocidade, que podem ser observados na **Tabela 5.13**.

FAIXA DE VELOCIDADE (%)	$\omega = 1 / f$ (min)	RAIO (m)	VELOCIDADE LINEAR (m / min)
17	2,17	0,2679	0,402
19	2,00		0,446
21	1,83		0,491
23	1,67		0,536
25	1,50		0,580

**Tabela 5.13** – Velocidade linear de soldagem (m / min) para as faixas de velocidade.

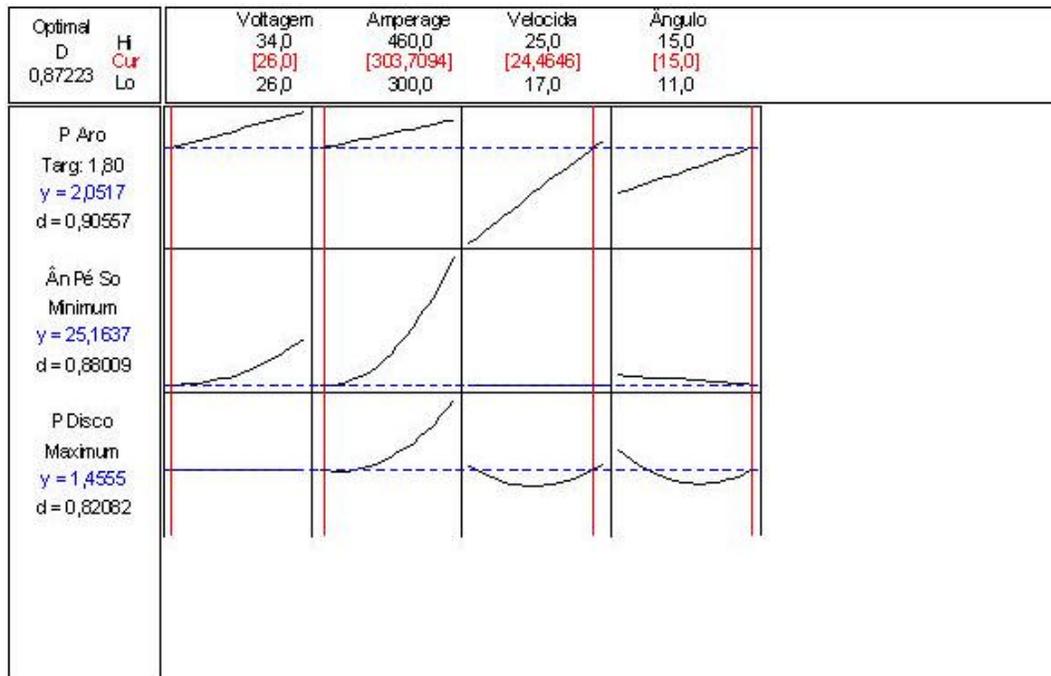
O processo atual trabalha com faixas de velocidade entre 17% e 21%. O objetivo é buscar faixas de velocidade acima de 23%, ou seja, por volta de 0,536 a 0,580 m / min. Com isto, pode-se ganhar um tempo de ciclo de até 40 s por roda, o que permitiria um aumento de produção de aproximadamente 40%. Por ser uma operação restritiva, ou seja, um gargalo de produção, trata-se de um ganho considerável para o processo como um todo.

Basicamente, pode-se trabalhar com três respostas que são os pontos fundamentais do cordão de solda, no que diz respeito à resistência do cordão: Penetração no Aro ( $P_a$ ), Penetração no Disco ( $P_d$ ) e Ângulo do Pé de Solda ( $A_{ps}$ ). A **Tabela 5.14** mostra os alvos e as faixas de variações desejadas para cada resposta, baseando-se nas especificações do cordão, buscando uma velocidade de soldagem superior a 23%.

RESPOSTA	LIMITE INFERIOR	ALVO	LIMITE SUPERIOR
$P_a$ (mm)	1,40	1,80	2,20
$P_d$ (mm)	1,40	1,80	2,20
$A_{ps}$ (°)	20	23	26

**Tabela 5.14** – Faixas desejadas para as respostas do cordão de solda.

Através do MINITAB, foi possível otimizar estas respostas, baseando-se nas faixas pré-especificadas. A **Figura 5.22** mostra os resultados obtidos através da simulação, onde se obteve um valor de desejabilidade bastante satisfatório: 87,2%.



**Figura 5.22** - Otimização das respostas  $P_a$ ,  $P_d$  e  $A_{ps}$  para faixas preestabelecidas.

Desta forma, pode-se verificar os valores de cada parâmetro para as respostas desejadas. A **Tabela 5.15** indica quais as faixas de trabalho indicadas para as respostas desejadas.

PARÂMETRO	FAIXA DE TRABALHO
Voltagem (V)	26 V
Amperagem (I)	300 A
Velocidade de Soldagem ( $V_s$ )	25 % (0,580 m / min)
Ângulo Longitudinal ( $A_L$ )	15°

**Tabela 5.15** – Faixas de trabalho para as respostas desejadas no cordão de solda.

## 5.5 CONFIRMAÇÃO DAS RESPOSTAS E TESTES DE DURABILIDADE

De posse dos resultados obtidos na Seção 5.2, partiu-se para a soldagem de uma nova roda, de mesma especificação da utilizada nos experimentos, para a confirmação dos resultados esperados. Esta roda foi escolhida de maneira aleatória durante a produção de um lote e também soldada sem controles especiais, justamente para testar o modelo. Assim, foram utilizados os seguintes parâmetros de soldagem:

- Voltagem (V): 26 V
- Amperagem (I): 300 A
- Velocidade de Soldagem ( $V_s$ ): 25 %
- Ângulo Longitudinal ( $A_L$ ): 15°

Os resultados macrográficos de uma secção escolhida de maneira aleatória do cordão de solda podem ser observados na **Tabela 5.16**.

CARACTERÍSTICA	PREVISÃO	OBTIDO	ERRO	ERRO PADRÃO
Penetração no Aro	2,11 mm	2,50 mm	0,39 mm	0,415 mm
Penetração no Disco	1,47 mm	1,15 mm	0,32 mm	0,345 mm
Ângulo do Pé de Solda	25,7°	24,4°	0,7°	18,97°

**Tabela 5.16** – Resultados obtidos na soldagem otimizada.

Observa-se que os valores encontrados estão bastante próximos aos valores previstos, inclusive com os erros mais baixos que os erros padrão estabelecidos pelo modelo matemático. Outro ponto importante é que a roda foi escolhida de maneira aleatória e soldada apenas com o controle das variáveis  $V$ ,  $I$ ,  $V_s$  e  $A_L$ .

Para aprovação da junta soldada, houve a necessidade de submeter as rodas em testes especiais de durabilidade. Assim, foram testadas duas peças, de acordo com as normas SAE J267 e NBR 6751, que prevêm basicamente dois tipos de teste: fadiga do disco e compressão do aro. O teste de fadiga consiste basicamente na aplicação de uma força intermitente pré-calculada, aplicada através de dois cilindros a  $90^\circ$ , que através de uma função senoidal defasada implicam em um momento circular. Já para o teste de compressão é aplicada uma força constante na roda, que gira também em uma velocidade constante. Para ambos os testes, há a necessidade de equipamentos especiais. No teste de fadiga, foi utilizada uma Máquina de testes SCHENCK-PEGASUS, com capacidade máxima de teste de 70 kN.m e frequência máxima de teste de 30 Hz. Para o teste de compressão, utilizou-se uma máquina de testes MAXION, com capacidade de carga máxima de 12 toneladas. Estas máquinas podem ser vistas através das **Figuras 5.23 e 5.24** a seguir.



**Figura 5.23** – Máquina de testes de fadiga do disco SCHENCK-PEGASUS.



**Figura 5.24** – Máquina de testes de compressão MAXION.

Para determinação das cargas de trabalho, foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$M = (L) [\mu (slr)+d](S), \text{ para o teste de fadiga}$$

$$R = (S) L, \text{ para o teste de compressão,}$$

onde:

M = Momento de teste (kN.m);

L = Carga máxima de trabalho da roda (kgf);

$\mu$  = Coeficiente de atrito entre pneu e estrada;

slr = Raio estático de carga máximo (m);

d = off-set da roda (m);

S = Fator de aceleração.

De posse destes dados, é possível calcular as cargas de testes. A **Tabela 5.17** apresenta todos os valores para os cálculos, bem como a fonte de informação para tais.

PARÂMETRO	VALOR	TESTE	FONTE
L	3550 kgf	Fadiga / Compressão	Fabricante da roda
$\mu$	0,7	Fadiga	Norma SAE J267 / NBR 6751
slr	0,576 m	Fadiga	Norma ALAPA
d	0,170 m	Fadiga	Fabricante da roda
S	1,1 (para 60.000 ciclos de teste)	Fadiga	Norma SAE J267 / NBR 6751
S	1,6 (para 1.000.000 ciclos de teste)	Compressão	Norma SAE J267 / NBR 6751

**Tabela 5.17** – Parâmetros para o cálculo dos testes de fadiga e compressão.

A partir daí, é possível determinar todos os parâmetros de teste. O resumo dos dois testes pode ser visto através da **Tabela 5.18**.

TESTE	CARGA	CRITÉRIO DE APROVAÇÃO
Fadiga	22,37 kN.m	60.000 ciclos no mínimo de teste sem a presença de trincas
Compressão	5680 kgf	1.000.000 ciclos no mínimo de teste sem a presença de trincas

**Tabela 5.18** – Parâmetros dos testes de fadiga e compressão.

Os resultados obtidos podem ser verificados na **Tabela 5.19**. Verifica-se que os mesmos são bastante satisfatórios, o que aprova a nova junta de solda. A **Figura 5.25** mostra a macrografia de uma das secções da roda testada.

TESTE	CARGA	RESULTADO
Fadiga	22,37 kN.m	300.000 ciclos sem a presença de trincas
Compressão	5680 kgf	1.030.000 ciclos sem a presença de trincas

**Tabela 5.19** – Resultados dos testes de fadiga e compressão.



**Figura 5.25** – Macrografia da roda otimizada.

## 5.6 ANÁLISE COMPARATIVA E ECONÔMICA

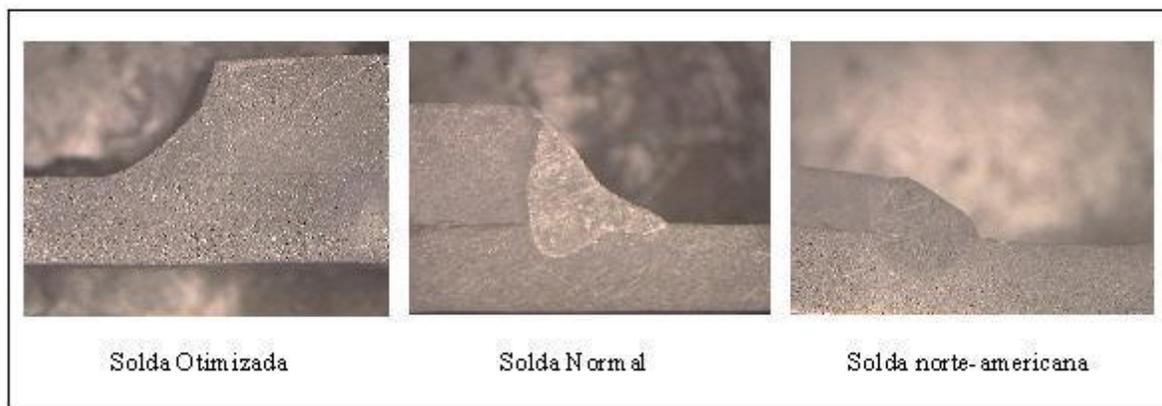
Finalmente, através da obtenção da solda otimizada, pode-se proceder às seguintes análises, focando o lado técnico e econômico:

- Comparação da solda otimizada com a solda atualmente utilizada;
- Comparação da solda utilizada com a solda de rodas produzidas no mercado norte-americano, que pode ser considerado benchmarking mundial.

Basicamente, como há interesse em uma diminuição de custo, são levados em consideração dois parâmetros principais:

- Tempo de ciclo: já verificado anteriormente (relacionado à velocidade de soldagem);
- Quantidade de arame de solda por roda: relacionada à área de soldagem. Quanto maior a área da secção de solda, maior a quantidade de arame.

Para fins ilustrativos, a **Figura 5.26** mostra as três macrografias de solda das rodas: otimizada, normal (escolhida aleatoriamente da produção), norte-americana. A **Tabela 5.20** identifica as principais características técnicas, para as análises comparativas.



**Figura 5.26** – macrografia das soldas: otimizada, normal e norte-americana.

SOLDA	Pa (mm)	Pd (mm)	Aps ( ° )	Área (mm <sup>2</sup> )
Otimizada	2,50	1,15	23,7	25,68
Normal	2,36	1,53	41,6	41,58
Norte-americana	2,32	2,55	58,5	28,75

**Tabela 5.20** – Resultados das soldas otimizada, normal e norte-americana.

Em termos técnicos, percebe-se que pode haver um ganho significativo na redução da área de solda. Logicamente, este ganho deve ser feito gradativamente, sempre respeitando as variações do processo e o paradigma atual do mercado brasileiro, que, diferentemente do mercado norte-americano, entende que a resistência da solda está ligada à sua quantidade.

Atualmente, dados da empresa indicam que a quantidade média de arame consumido por roda é de 400 g (valor para rodas de diâmetro 22.5'', que corresponde à grande parcela da produção atual de rodas sem câmara, podendo servir de base de cálculo, já que valores de diâmetro inferiores e superiores resultam, na média, neste diâmetro). O valor médio de mercado por quilo de arame de solda é de R\$ 3,30, e a produção média mensal considerada é de 65.000 rodas/mês. Assim, tem-se o custo médio de arame por roda multiplicando-se o peso pelo custo do quilo, obtendo-se R\$ 1,32 / roda. A **Tabela 5.21** apresenta o ganho econômico possível através de redução de área de solda, em relação à solda otimizada, que pode ser obtido baseando-se na solda normal de produção (aleatória) e da área média de solda

(30 mm<sup>2</sup>), que foi calculada através dos valores obtidos nas 31 corridas do experimento, que pode ser verificada na **Tabela 5.1** desta seção.

SOLDA	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	% REDUÇÃO	GANHO POR RODA (R\$)	ECONOMIA MÊS (R\$)	ECONOMIA ANO (R\$)
Normal	41,58	38,2	0,51	32.776,00	393.307,00
Média	30,00	14,4	0,19	12.355,00	148.262,00

**Tabela 5.21** – Análise econômica para solda normal e solda média.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES

### 6.1 – CONCLUSÕES GERAIS

Considerando os objetivos deste trabalho de otimização de um processo de solda automático MIG/MAG aplicado à confecção de rodas em um setor automotivo, os resultados obtidos nesta dissertação mostram que:

- (1) A aplicação baseada na Metodologia de Superfície de Respostas (MSR) mostrou-se eficaz no modelamento das respostas do processo em função dos parâmetros de estudo, apresentando resultados bastante confiáveis;
- (2) O modelamento matemático gerado para as principais respostas do processo permitem um melhor controle do processo, bem como a obtenção de melhorias do mesmo, com bastante eficácia quando se fizerem necessárias;
- (3) Os parâmetros previamente selecionados mostraram-se, na maioria dos casos, significativos ao processo, o que indica que o estudo inicial de escolha dos mesmos, bem como as faixas de trabalho, também foram eficazes;
- (4) Em relação à otimização do processo, verifica-se que podem ser combinados ganhos de produtividade com as especificações técnicas determinadas neste trabalho, frente às atualmente utilizadas. Pode-se obter aproximadamente 25% de ganho no tempo de ciclo de soldagem (para uma operação que muitas vezes torna-se gargalo de produção, dependendo da complexidade da solda e do diâmetro da roda) e um ganho considerável através da redução da área da solda, que influencia diretamente na quantidade consumida de arame;

- (5) Apesar do ganho do arame de solda ter um valor individual absoluto baixo, se considerarmos o custo total da roda quando multiplicado pela produção mensal média de 65.000 unidades, torna-se bastante significativo. Estes ganhos podem ser obtidos trabalhando-se com parâmetros de soldagem que implicam em respostas aceitáveis de penetrações (aro e disco) e ângulo do pé de solda.

## **6.2 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Observa-se que o assunto abordado no trabalho tem um conteúdo bastante abrangente, podendo ser explorado de diversas formas. Algumas vertentes podem ser abordadas em trabalhos futuros, tais como:

- Verificação do processo MIG/MAG, com variação de outros parâmetros, considerados constantes neste experimento;
- Estudo para verificação do acabamento superficial da solda, como respingos e qualidade do cordão;
- Extrapolação do modelo matemático para outros processo similares, para efeitos comparativos;
- Análise do processo utilizando outras técnicas do processo e análise de experimentos, para comparação dos resultados obtidos;
- Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) do experimento, pontos não abordados neste trabalho.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOLFSSON, S.: *On-line quality monitoring in short-circuits Gas Metal Arc Welding*. Welding Journal, pp. 59s-73s, February, 1999.

ALAPA – Associação Latino Americana de Pneus e Aros: *Manual de Normas Técnicas*. 2003.

ALBIN, D.: *The use of statistical experimental design for PCB process optimization*. Circuit World 27/4, pp. 12-15, 2001.

ANTONY, J.: *Improving the manufacturing process quality and capability using experimental design: a case study*. International Journal of Production Research, pp. 2607-2618, Volume 38, No. 12, 2000.

ANTONY, J.: *Some key things industrial engineers should know about experimental design*. Logistics Information Management, pp. 386-392, Number 6, 1998.

ANTONY, J.; KAYE, M.; FRANGOU, A.: *A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques*. The TQM Magazine, pp. 169-176, Volume 10 – Number 3, 1998.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S.: *Statistics for experimenters*. New Jersey. Wiley Interscience, 1978.

CÂMARA, M.A.O.: *Delineamento de um experimento fatorial fracionário na otimização de um processo de gaseificação. Um estudo de caso*. Dissertação de Mestrado. EFEI, 1998.

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

COMPANHIA SIDERÚRGICA BELGO MINEIRA: *Soldagem MIG/MAG*. Informações do Fabricante. 1996.

DARWISH, S.M. & AL-DEKHAL, S.D.: *Statistical models for spot welding of commercial aluminum sheet*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 29, no. 10, pp. 1589-1610, 1999.

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

DILLENBECK, V. R. & CASTAGNO, L.: *The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel*. Welding Journal, pp.45-49, September, 1987.

ESSERS, W.G. & VAN GOMPEL, R.M.: *Arc control with pulsed GMAW welding*. Welding Journal, pp.26-32, June, 1984.

ETRTO – The European Tyre and Rim Technical Organisation: *Standards Manual*. 2003.

EUWA – ES 3.11: *Test requirements for truck steel wheels*. 1993.

FBTS – Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem: *Inspetor de Soldagem – Volume , 2ª Edição*. 1984.

GALDÁMEZ, E.V.C.: *Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos*. Dissertação de Mestrado. USP – São Carlos, 2002.

GIDDINGS, A.P.; BAILEY, T.G.; MOORE, J.T.: *Optimality analysis of facility location problems using response surface methodology*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, pp. 38-52, Volume 31, No. 1, 2001.

GOODMAN, J. & WYLD, D.C.: *The hunt for the Red X: a case study in the use of Shainin design of experiment (doe) in an industrial honing operation*. Management Research News, pp. 1-17, Volume 24, No 8/9, 2001.

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

GUHA, B. & BALASUBRAMANIAN, V.: *Fatigue life prediction of shielded metal arc welding cruciform joints containing LOP defects by a mathematical model*. Journal of Pressure Vessels and Pipes, vol. 76, no. 5, pp. 283-290, 1999.

GUNARAJ, V. & MURUGAN, N.: *Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process – Part 1*. Welding Research Supplement, pp. 286-294, October 2000.

GUNARAJ, V. & MURUGAN, N.: *Prediction and comparison of the area of the heat-affected zone for the bead-on-plate and bead-on-joint in submerged arc welding of pipes*. Journal of Materials Processing Technology, no. 95, pp. 246-261, 1999

GUPTA, O.P. & DORN, L.: *An experimental study of resistance spot welding in 1 mm thick sheet of low carbon steel*. Journal of Engineering Manufacture, vol. 210, pp. 341-347, 1996

INGLE, S. & ROE, W.: *Six sigma black belt implementation*. The TQM Magazine, pp. 273-280, Volume 13, Number 4, 2001.

ISO/TS 16949: *Quality Management Systems* – 1999.

- JIS-D-4103: *Automobile parts – Disc wheels performance requirements and marking*. 1998.
- KONDA, R.; RAJURKAR, K.P.; BISHU, R.R; GUHA, A.; PARSON, M.: *Design of experiments to study and optimize process performance*. International Journal of Quality & Reliability Management, pp. 56-71, Volume 16, No. 1, 1999.
- LOWERY, J.: *Gases de proteção para soldagem ao arco*. Soldas e Eletrodos, pp.9-17, dezembro, 1977.
- LYTTLE, K.A.: *GMAW- A versatile process on the move*. Welding Journal, pp.15-23, March, 1983.
- MONT'ALVÃO, C.A.: *Determinação dos fatores significativos do processo de corte por plasma a ar comprimido através da utilização do projeto e análise de experimentos*. Dissertação de Mestrado. EFEI, 1998.
- MONTGOMERY, D.C.: *Design and analysis of experiments*. New York. John Wiley & Sons, 1991.
- MONTGOMERY, D.C.& RUNGER, G.C: *Estatística aplicada e probabilidade para Engenheiros*. Rio de Janeiro. LTC, 2003.
- MURUGAN, N. & PARMAR, R.S.: *Effect of MIG parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel*. Journal of Materials Processing Technology, no. 41, pp. 381-398, 1994.
- NAKANO, D.N. & FLEURY, A.C.C.: *Métodos de pesquisa na engenharia de produção*. Universidade de São Paulo, 1996.
- NBR 6751: *Rodas para caminhões – verificação da durabilidade e resistência*. 1997.
- NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S; BRUNS, R.E.: *Planejamento e otimização de experimentos*. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- NETO, J.C.P.A. & GUIMARÃES, A.S.: *Efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado*. Soldagem & Inspeção – Suplemento Técnico, pp. 9-16, 2000.
- NETO, P.L.C.: *Estatística*. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1992.
- NIXON, J.H.& NORRISH, J.: *Determination of pulsed MIG process parameters*. Synergic MIG Supplement, Welding & Metal Fabrication, 1992.
- PHILLIPS, A.L.: *Welding Handbook*, section 2, fifth edition, 1968.

RAMIREZ, J.; GUTIERREZ, H.; GSCHAEDLER, A.: *Optimization of astaxanthin production by phaffia rhodozyma through factorial design and response surface methodology*. Journal of Biotechnology 88, pp. 259-268, 2001.

RIBEIRO, L.G.: *Efeito dos parâmetros de pulso no processo MIG sobre a qualidade e produtividade do cordão de solda*. Dissertação de Mestrado. EFEI, 2002.

ROWLANDS, H. & ANTONY, J.: *Application of design of experiments to a spot welding process*. Assembly Automation, vol. 23, no. 3, pp. 273-279, 2003.

QS-9000: *Quality System Requirements* – Third Edition, 1998.

SAE J 267: *Wheels / Rims – Trucks performance requirements and test procedures*. 1999.

SAE J 403: *Chemical composition of SAE carbon steels*. 2001.

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

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

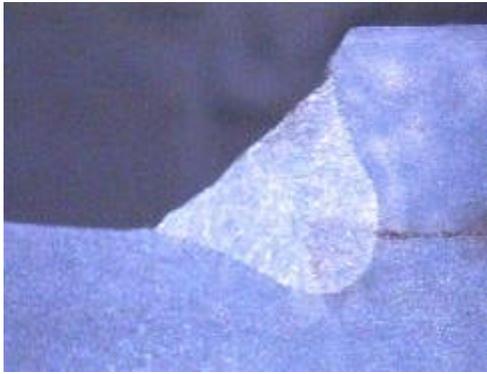
TRA – The Tire and Rim Association: *Year Book*. 2003.

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

# **ANEXOS**

# **ANEXO A**

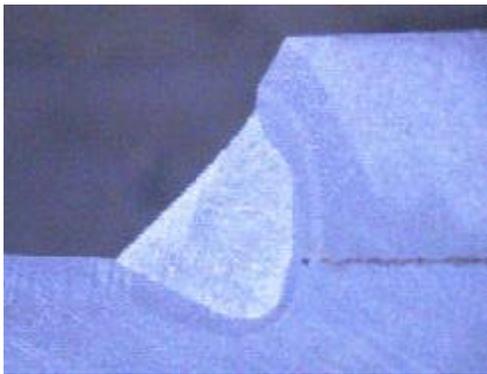
Algumas macrografias do experimento



Macrografia da corrida nº 01



Macrografia da corrida nº 04



Macrografia da corrida nº 05



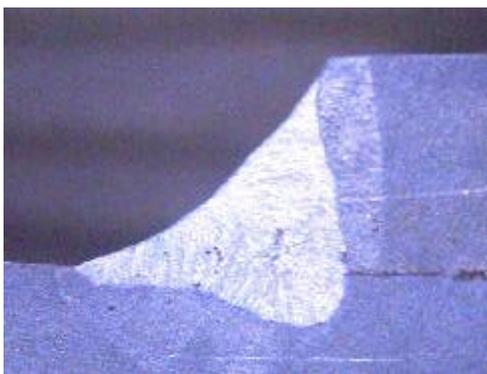
Macrografia da corrida nº 08



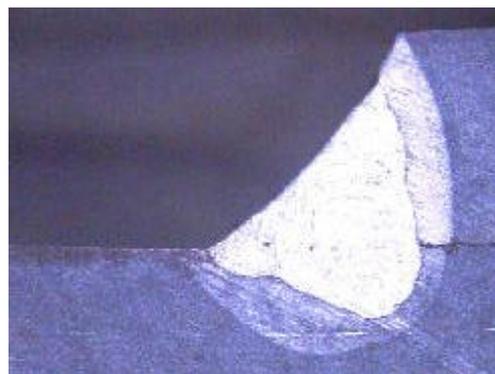
Macrografia da corrida nº 11



Macrografia da corrida nº 15



Macrografia da corrida nº 21



Macrografia da corrida nº 25