

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Comparação de Características Operacionais
no Processo com Eletrodo Tubular utilizando
as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado
na Posição Vertical Descendente.**

Autor: Eduardo Miguel da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Itajubá, Dezembro de 2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Comparação de Características Operacionais
no Processo com Eletrodo Tubular utilizando
as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado
na Posição Vertical Descendente.**

Autor: Eduardo Miguel da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Dezembro de 2006.

MG – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Comparação de Características Operacionais
no Processo com Eletrodo Tubular utilizando
as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado
na Posição Vertical Descendente.**

Autor: **Eduardo Miguel da Silva**

Orientador: **Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira – CEFET-MG

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa, Presidente – IEM/UNIFEI

Dedicatória

*À minha esposa Érica Luciana,
Ao meu pai Joaquim Onofre da Silva
Aos meus irmãos, familiares, e amigos.
Em memória: Terezinha de Jesus da Silva (mãe)
José Onofre da Silva (irmão).*

Agradecimentos

- Primeiramente a *Deus*, pela força e perseverança;
- Aos meus pais, pelo incentivo na realização de mais uma etapa da vida acadêmica;
- A minha esposa *Érica Luciana Matias Silva*, pelo apoio e por tornar as dificuldades mais suaves, para atravessar o caminho;
- Ao professor *Sebastião Carlos da Costa*, pela valiosa competência, dedicação, paciência e amizade;
- Aos professores Genésio, Paulo Shigueme, Marco Sávio, Vânia Veloso e Frederico pelo apoio ao ingresso ao mestrado;
- Aos funcionários da oficina mecânica, pelo apoio e participação durante a fase de realização dos ensaios;
- Aos amigos *Marcos, Anderson, Clarissa, Enedina, Luciana, Lucilene, Alexandre, Alexandre Féo, Valquíria, Paulo, Vanderlei*, pelo permanente incentivo, colaboração, amizade, momentos de lazer e inesquecível convívio profissional;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

“Se os sonhos são pequenos, nossas possibilidades de sucesso também serão limitadas. Desistir dos sonhos é abrir mão da felicidade porque quem não persegue seus objetivos está condenado a fracassar 100% das vezes”.

Augusto Cury.

Resumo

SILVA, E. M. (2006), *Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular Utilizando as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente*, 90p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Este trabalho tem por finalidade fazer uma comparação entre os modos de transferências metálicas por curto-circuito e pulsado utilizando a soldagem com arame tubular sob proteção gasosa, eletrodo AWS E71T-1 na posição vertical descendente. Os testes foram realizados em juntas de topo, com chapas de aço ABNT-1045. As variáveis do processo analisadas foram a tensão, a velocidade de alimentação do arame e a indutância para o modo por curto-circuito; para o modo pulsado foram analisadas a corrente de pico, o tempo de pico, a corrente de base e o tempo de base. As características de estabilidade do arco conjuntamente com as características geométricas, econômicas e qualidade visual do cordão de solda foram analisadas como respostas para ambos os modos de transferências. Para tal finalidade utilizaram-se técnicas estatísticas como ferramentas de análise sendo numa primeira fase, empregado o planejamento fatorial completo para a seleção dos parâmetros mais influentes no modo de transferência por curto-circuito e, numa segunda fase, empregado o planejamento fatorial fracionário para o modo de transferência pulsado. Na terceira fase, foi feita a otimização desses parâmetros para a adequação do processo e uma comparação entre os dois modos de transferência, considerando a influência das características econômicas e propriedades mecânicas das juntas soldadas. Em função dos resultados obtidos, foram estabelecidos as melhores condições de ajustes das variáveis em cada modo de transferência. De forma geral percebeu-se que o modo pulsado apresentou-se superior ao modo por curto-circuito sob o ponto de vista econômico e propriedades mecânicas.

Palavras - Chaves: Soldagem, Eletrodo Tubular, Curto-Circuito, Corrente Pulsada.

Abstract

SILVA, E. M. (2006), *Comparison of operational characteristics in the Flux Cored Arc Welding process in the vertical- down welding position using a short circuit and pulsed arc metallic transfer mode.* 90 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

This work aims to compare the short circuit and pulsed arc metallic transfers mode in a vertical-down welding position using a gas shielded FCAW process and electrode type AWS E 71T-1. The tests were performed in a butt joint design using steel plate ABNT-1045. The process variables analyzed were voltage, wire feed speed and inductance level for the short circuit mode. To the pulsed arc the peak current, the peak time, the base current and the base time were the variables analyzed. The arc stability associated with the geometric, economic and visual quality of the bead were analyzed as the response for both transfer modes. In order to reach the purposes of the work, statistical techniques were used as analysis tools. In a first phase, a full factorial design to select the most significant parameters was used for the short circuit mode and a in a second phase a fractional factorial design was used for the pulsed mode. In a third phase, a general optimization of those parameters of the process was performed. The results allowed to establish the best adjust of the variables in each particular transfer mode. In general terms, this work allowed to conclude that the pulsed mode were superior to the short circuit mode regarding the economic characteristics and the mechanical properties of the welded joint in the vertical-down position.

Keywords: Welding, Flux Cored Arc Welding, Short-Circuit, Pulsed Current.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
Simbologia	viii
Letras Latinas	viii
Letras Gregas	x
Abreviaturas	x
Siglas	x
Capítulo 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 MOTIVAÇÃO E POSSÍVEIS CONTRIBUIÇÕES	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
Capítulo 2	6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR-FCAW	6
2.2 SOLDAGEM COM GÁS DE PROTEÇÃO (FCAW-G)	9
2.2.1 Proteção Gasosa	11
2.3 TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS	13
2.3.1 Transferência por Curto-Circuito	15
a) Estabilidade do Arco	17
2.3.2 Transferência por Arco Pulsado	20
a) Efeito dos Parâmetros de Pulsação no Processo FCAW	22

	ii
2.4	POSIÇÕES DE SOLDAGEM 23
2.5	CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS E GEOMÉTRICAS 25
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS 28
Capítulo 3 29
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 29
3.1	INTRODUÇÃO 29
3.2	FLUXOGRAMA DO TRABALHO 30
3.3	DESCRIÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS E MONTAGENS EXPERIMENTAIS 31
3.4	CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM 32
3.4.1	Arame Eletrodo e Material Base 32
3.4.2	Gás de Proteção 33
3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 33
3.5.1	Ajuste das Condições Experimentais 33
3.5.2	Escolha dos Fatores de Controle e Respostas 35
3.5.3	Definição dos Níveis dos Fatores de Controle 35
a)	Transferência por Curto-Circuito 36
b)	Transferência Pulsada 37
3.6	DELINEAMENTO DOS EXPERIMENTOS 40
3.7	DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS 42
3.7.1	Avaliação da Estabilidade do Arco Elétrico e Regularidade da Ocorrência de Curtos-Circuitos 42
3.7.2	Características Geométricas e Econômicas 43
3.8	ENSAIOS MECÂNICOS 44
Capítulo 4 46
RESULTADOS E DISCUSSÕES 46
4.1	INTRODUÇÃO 46
4.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS 47
4.2.1	Análise de Variância 48
(a)	Análise do Tempo Total de Curto-Circuito (T_c) 51
(b)	Análise do Desvio do Período de Duração do Curto-Circuito (sT) 52
(c)	Análise do Desvio do Tempo de Curto-Circuito ($sttc$) 53

4.2.3	Análise da Influência dos Parâmetros na Produtividade nos Modos por Curto-Circuito e Pulsado.....	55
(a)	Análise do Rendimento da Solda (R) e a Taxa de Deposição (TD).....	55
(b)	Análise da Área Total Adicionada	57
4.2.4	Análise da Influência dos Parâmetros no Aspecto Visual do Cordão.....	59
(a)	Análise da Qualidade do Cordão de Solda	59
4.3	CONDIÇÕES OTIMIZADAS.....	60
4.3.1	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO ARCO PARA AS CONDIÇÕES OTIMIZADAS	64
4.4	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS CUSTOS ASSOCIADOS AOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA	67
4.5	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	72
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
Capítulo 5	75
	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	75
5.1	CONCLUSÕES	75
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE – A	84
A.1-	TESTES EXPLORATÓRIOS	84
A.2-	OSCILOGRAMAS DOS TESTES-MODO CURTO- CIRCUITO	87

Lista de Figuras

Figura 2.1- Soldagem com arame tubular com proteção gasosa (Fonte: Cooper Ordóñez, 2004).....	7
Figura 2.2-Comparação entre (a) o arame sólido do processo MIG/MAG com (b) eletrodo tubular.....	8
Figura 2.3-Efeito do Gás de Proteção no Perfil do Cordão de Solda (Bracarense 2000).....	12
Figura 2.4- Efeito da tensão nos modos de transferências metálicas (Wang et al, 1995).	14
Figura 2.5-Modo de transferência por curto-circuito (Bracarense et al, 2004).	15
Figura 2.6-Ciclo completo da transferência por curto-circuito (Silva, 2005).	16
Figura 2.7- Índices derivativos de avaliação de transferência por curto-circuito:(a) corrente; b) tensão (Gomes et al, 2006).	18
Figura 2.8-Histograma do tempo de curto-circuito com proteção gasosa CO ₂ : (a) Ind. = 9; V=19Volts e (b) Ind. = 2; V=21Volts (Gomes et al, 2006).....	19
Figura 2.9-Efeitos principais e suas interações no tempo total de curto-circuito (Gomes et al, 2006).....	20
Figura 2.10-Modo de transferência pulsada (Modenesi, 2004).....	21
Figura 2.11-Balanço de forças na ponta do eletrodo. F_g = força de gravidade, F_{em} = Força eletromagnética, F_a = Força de arraste, F_γ = Força associada à tensão superficial, F_v = Força de reação (Modenesi, 2004).	24
Figura 3.1- Fluxograma do trabalho.	30
Figura 3.2 – Banco de ensaios – Laboratório de soldagem - UNIFEI.....	31
Figura 3.3 – Sistema de aquisição dos dados.	32
Figura 3.4 - Posicionamento da tocha.	33
Figura 3.5-Ajuste do bico de contato peça (Wainer, 1992).....	34

	v
Figura 3.6-Dimensões do Chanfro dos Corpos de Prova.	35
Figura 3.7-Oscilograma da tensão e corrente (gás= CO ₂ , V= 19 Volts, va=3m/min,Ind=2),(Software MIGMAG).	36
Figura 3.8-Características Geométricas do cordão.....	43
Figura 3.9-Dimensões dos Corpos de Prova – Junta Sobreposta.	44
Figura 3.10-Critério para retirada de Corpo de prova para o teste de cisalhamento-Código ASME IX.....	45
Figura 4.1-Efeito dos fatores no tempo total de curto para o modo de transferência por curto-circuito.....	52
Figura 4.2-Efeito da interação da V*va sobre o tempo total de curto-circuito.	52
Figura 4.3-Efeito dos fatores sobre o desvio do período (sT).	53
Figura 4.4-Influência da interação (V*va) sobre o desvio do período de curto (sT).	53
Figura 4.5-Efeito dos fatores sobre o desvio dos tempos de curto-circuito (stcc).....	54
Figura 4.6-Influência da interação va*Ind, sobre o desvio dos tempos de curto-circuito.....	55
Figura 4.8-Influência das interações sobre o rendimento (a) Ip*tp; (b) Ib*tb.....	56
Figura 4.9-Efeito dos fatores principais sobre a taxa de deposição (a) curto-circuito, (b)-pulsado.....	57
Figura 4.10-Influência da interação da Ip*Ib sobre a taxa de deposição.	57
Figura 4.11-Efeito dos fatores principais sobre a área total adicionada. (a) Curto-circuito, (b) Pulsado.	58
Figura 4.12 Influência das interações sobre a área total depositada: (a) Ip*Ib; (b) Ip*tp.	59
Figura 4.14-Influência da interação da Ip*tp sobre a qualidade.....	60
Figura 4.15-Níveis das respostas pretendidas para o modo curto-circuito.....	62
Figura 4.16-Níveis das respostas pretendidas para o modo pulsado.	62
Figura 4.17-Oscilograma de tensão e corrente, modo curto-circuito, V=20,5 Volts, va=3,5m/min, Indutância=5, (Software MIGMAG).	65
Figura 4.18- Oscilograma da tensão e corrente, modo pulsado, Ip= 300 A, tp=2ms, Ib=80 A, tb=4ms, (Software MIGMAG).....	65
Figura 4.19-Diagrama tensão e corrente (Software MIGMAG).	66
Figura 4.20-Histograma de duração de curto-circuito, V= 20,5 Volts, va=3,5m/min, Ind=5,5, (Software MIGMAG).	67
Figura 4.21-Simulação de Monte Carlo (a) curto-circuito; (b) pulsado.....	72

Figura A1-Oscilograma da tensão (24Volts) onde (a)=3m/min, e (b)= 4m/min para transferência curto-circuito (Gomes, 2006).....	88
Figura A2-Oscilograma da corrente e tensão V=22 Volts, va= 3m/min, Ind=9.	88
Figura A3-Diagrama da tensão e corrente=22 Volts, va=4m/min, Ind=9.....	89
Figura A4- Oscilograma da corrente e tensão V= 19 Volts, va= 4m/min, Ind=2.	89
Figura A5-Diagrama da corrente e tensão V=19 Volts, va=4m/min, Ind=2.....	90

Lista de Tabelas

Tabela 3.2-Condições finais para o modo de soldagem por curto-circuito	39
Tabela 3.3-Condições finais para o modo de soldagem pulsada	39
Tabela 3.4-Sequência dos experimentos para o modo Curto-Circuito.....	40
Tabela 3.5-Sequência de experimentos para o modo pulsado.....	41
Tabela 4.1-Sequência e resultados dos experimentos para o modo curto-circuito.....	47
Tabela 4.4-Resultado da análise de variância – Modo Pulsado.	49
Tabela 4.5-Diretrizes estabelecidas para as análises dos resultados	51
Tabela 4.5-Respostas obtidas utilizando o “Response Optimizer”.	62
Tabela 4.6-Comparação das respostas analisadas e resultados previstos.....	63
Tabela 4.8-Equações para determinação dos custos parciais SILVA et al (2000).....	68
Tabela 4.9-Valores adotados para as equações dos custos associados ao processo FCAW. ...	69
Tabela 4.10-Planilha de custos para os dois modos de transferência na condição otimizada..	70
Tabela 4.11-Resultados dos testes de cisalhamento.	73
Tabela A1-Resultados obtidos para a qualidade visual do cordão de solda.....	85
Tabela A4-Resultado obtido para a qualidade visual do cordão.	87

Simbologia

Letras Latinas

Ca	Ciclo ativo	%
CC ⁺	Corrente contínua, eletrodo positivo	-
d	Diâmetro do arame	mm
d _e	Diâmetro externo	mm
d _i	Diâmetro interno	mm
E	Módulo de elasticidade	kgf/mm ²
F	Carga máxima	kgf
F _a	Força de arraste	kgf
F _{em}	Força eletromagnética	kgf
F _g	Força gravitacional	kgf
F _γ	Força associada à tensão superficial	kgf
F _v	Força de reação	kgf
I _m	Corrente média	A
I _b	Corrente de base	A
I _p	Corrente de pico	A

		ix
I_p*tp	Interação da corrente de pico pelo tempo de pico	-
I_p*tb	Interação da corrente de pico pelo tempo de base	-
I_p*I_b	Interação da corrente de pico pela corrente de base	-
L	Comprimento do arame	mm
L.E	Limite de escoamento	N/mm ²
L.R	Limite de resistência	N/mm ²
m_f	Massa do corpo de prova após a soldagem	g
m_i	Massa inicial do corpo de prova	g
N	Número de testes	-
Q	Qualidade visual do cordão	-
Q_t	Calor transferido por efeito joule	kJ
R	Rendimento	%
R_e	Resistência elétrica	Ω
S_0	Área Transversal	mm ²
sttc	Desvio do tempo total de curto-circuito	ms
sT	Desvio do período de curto	ms
S_t	Área total do cordão	mm ²
S_r	Área de reforço	mm ²
S_p	Área de penetração	mm ²
t	Tempo de soldagem	s
tb	Tempo de base	ms
tp	Tempo de pico	ms
Tc	Tempo total de curto-circuito	ms
TD	Taxa de deposição	kg/h
TF	Taxa de fusão	kg/h
V	Tensão	Volts
$V*Ind$	Interação da tensão pela indutância	-
$V*va$	Interação da tensão pela velocidade de alimentação	-
va	Velocidade de alimentação do arame	m/min
$va*Ind$	Interação da velocidade de alimentação pela indutância	-
vs	Velocidade de soldagem	cm/min

Letras Gregas

α	Nível de significância;	%
β	Ângulo de inclinação da tocha	°
θ	Ângulo do chanfro;	°
μ	Média amostra;	-
ρ	Resistividade elétrica;	$\Omega.m$
ρ_a	Densidade linear do arame;	g/m
σ	Desvio padrão da média;	-
Δl	Alongamento;	mm
τ	Tensão de cisalhamento;	kgf/mm ²

Abreviaturas

CC	Curto-circuito.
C25	Mistura 75%Argônio+25% CO ₂ .
CO ₂	Dióxido de Carbono.
DBCP	Distância bico de contato peça.
Ind	Indutância.
Ind. _s	Indutância de subida
Ind. _d	Indutância de descida
IC	Intervalo de confiança.
PP	Pulsado.
MIG/MAG	Processo de soldagem MIG/MAG.
MIG	Metal Inerte Gás.
MAG	Metal Ativo Gás.
SMC	Simulação de Monte Carlo.
ZTA	Zona Termicamente Afetada.

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASME	American Society of Mechanical Engineers.
AWS	American Welding Society.
DOE	Design of Experiments.
FCAW	Flux Cored Arc Welding-Processo com eletrodo tubular.
GMAW	Gas Metal Arc Welding – Processo com proteção gasosa, arame sólido.
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Atualmente as indústrias se preocupam de forma insistente com a obtenção de procedimentos de soldagem que conjuguem a versatilidade, a produtividade e a qualidade e associado a custos baixos nas suas operações de forma a lhes garantir uma maior competitividade em um setor de concorrência acirrada. Entre as opções de execução de soldagens, o processo com arame tubular vem crescendo em utilização em função de algumas peculiaridades. Este processo possibilita a formação de cordão com alta qualidade e bom aspecto visual, podendo ser utilizado em todas as posições de soldagem através de ajustes adequados de seus parâmetros operacionais. O mesmo apresenta ainda uma alta produtividade, devido a sua elevada taxa de deposição e com um baixo índice de respingos, proporcionando alto rendimento de deposição (Lima & Ferraresi, 2006).

Vários aspectos associados ao estudo do eletrodo tubular têm sido publicados na literatura (Oliveira, 2002; Oliveira, 2005; Starling, 2006) e muitos destes estudos se referem ao comportamento e ajuste do processo frente aos diferentes modos de transferências metálicas e sua posterior adaptação às condições de soldagens de chapas finas e em todas as posições. Neste sentido o modo de transferência por curto-circuito e o modo pulsado de soldagem se mostram como os mais adequados em termos de aplicações.

A transferência por curto-circuito é caracterizada pelo toque periódico na poça de fusão de pequenas gotas de tamanho próximo ao do diâmetro do arame, destacadas no contato, em curto-circuito da gota com a peça. Isto acontece principalmente devido à diferença entre a velocidade de alimentação do arame eletrodo e a taxa de fusão do mesmo em regime de arco aberto sendo este tipo de transferência caracterizado pela baixa corrente e baixa tensão.

No modo de transferência pulsado, a corrente oscila entre dois níveis, um baixo, a corrente de base, e um alto, a corrente de pico, de modo que a corrente média resultante seja inferior a corrente de transição (corrente onde há mudança de transferência), impondo desta forma uma menor quantidade de energia ao processo. A dificuldade operacional desse tipo de transferência está no ajuste dos parâmetros de pulsação que conduza a uma soldagem com um nível de qualidade superior, sendo muitas vezes isto feito normalmente por tentativa e erro. Por isto apesar de muitas vantagens ainda é um processo pouco conhecido no Brasil, sendo seus limites operacionais ainda não muito bem definidos. Alguns estudos têm sido publicados na literatura a respeito do ajuste dos parâmetros com relação a uma maior estabilidade do processo.

No modo por curto-circuito, Gomes (2006) realizou estudos que permitiram um melhor ajuste dos parâmetros de soldagem de tal forma a gerar uma melhor regularidade da ocorrência dos curtos-circuitos com reflexos na qualidade final da solda.

No modo pulsado, Saito (2001) e Oliveira (2005) entre outros apresentam estudos da soldagem com arame tubular com proteção gasosa, procurando condições adequadas para soldagem na posição plana, estudando a influência dos parâmetros de pulso sobre as características da solda e culminando com a otimização dos resultados e minimizar a variabilidade dos mesmos.

Em função de algumas limitações dos trabalhos anteriores, esta dissertação visa ampliar as possibilidades de utilização do mesmo na análise da aplicabilidade da soldagem de chapas finas e fora da posição plana, mais especificamente na posição vertical descendente, através da utilização dos modos de transferência por curto-circuito e o modo pulsado de soldagem. Em princípio estes dois modos de transferência permitem a soldagem na posição vertical ascendente e descendente, apresentando a vantagem de permitir um aporte térmico muito reduzido quando comparado ao modo de transferência por spray. Além disso, pretende-se ainda investigar os limites adequados para cada modo de operação, bem como verificar a influência dos parâmetros sobre as características de interesse.

Para atingir estes objetivos foram utilizadas metodologias de análises baseadas em ferramentas estatísticas as quais permitem congregam análises e gerar também nos resultados uma previsão da variabilidade encontrada nos processos. Em função destes aspectos, foi realizada uma análise através do uso do Projeto e Análise de Experimentos (DOE-Design of Experiments), que é uma técnica baseada em conceitos estatísticos, e tem sido muito abordada, por permitir identificar o efeito de determinadas variáveis em uma superfície de contorno pré-estabelecida, utilizando um número reduzido de experimentos, para determinar a variabilidade de um processo de soldagem.

1.1 OBJETIVOS

Em face dos tópicos anteriormente mencionados e tendo-se em vista as condições de trabalho disponíveis, propõe-se como objetivo principal da presente dissertação, partindo-se de pesquisas anteriores desenvolvidas por Oliveira (2005) para o modo pulsado e Gomes (2006) para o modo por curto-circuito, fazer uma comparação das características econômicas e resistência ao cisalhamento entre os dois modos de transferência metálica (curto-circuito e pulsado) utilizando a soldagem com arame tubular sob proteção gasosa, eletrodo rutílico AWS E71T-1 na posição vertical descendente.

Paralelamente procurou-se adaptar as melhores condições operacionais de soldagem aplicadas ao processo com eletrodo tubular na posição vertical descendente. Para alcançar este objetivo principal, propõem-se como objetivos secundários os itens descritos a seguir:

- ✓ Estudar a influência dos parâmetros de soldagem sobre as características geométricas e econômicas e estabilidade do arco para o modo de transferência por curto-circuito na posição vertical descendente;
- ✓ Estudar a influência dos parâmetros de pulso sobre as características geométricas e econômicas para o modo de transferência pulsado na posição vertical descendente.
- ✓ Otimização das condições para cada modo de transferência utilizando técnicas estatísticas de Projeto e Análise de Experimentos (DOE) e posterior

comparativo entre os dois modos com relação aos aspectos econômicos e propriedades mecânicas dos cordões.

1.2 MOTIVAÇÃO E POSSÍVEIS CONTRIBUIÇÕES

A principal motivação para o presente trabalho foi a ampliação do conhecimento do processo de soldagem com eletrodo tubular no modo de transferência por curto-circuito e pulsado. Percebe-se que muitos trabalhos publicados a respeito do assunto se concentram basicamente na posição plana. Entretanto ao se adaptar o processo tubular para soldagens fora da posição plana, algumas dificuldades surgem em função da atuação das forças sobre a gota, provocando entre outros inconvenientes como o escorrimento, provocando a deformação do cordão (Oliveira, 2002; Lima & Ferraresi, 2006). Assim uma contribuição esperada do trabalho é fazer uma comparação da influência dos modos de transferências na qualidade, geometria do cordão de solda, custo de soldagem, proporcionando um maior domínio do processo FCAW (curto-circuito e pulsado) aplicado na soldagem vertical descendente. Com isso, pretende-se encontrar formas que garantam um intervalo de ocorrência de resultados adequados (próximos do ótimo) para os aspectos geométricos da soldagem FCAW nos dois modos de transferências.

Este trabalho visa também, aumentar as possibilidades da utilização do processo com eletrodo tubular, como um processo alternativo ao processo MIG/MAG para a soldagem de chapas finas e/ou em todas as posições de soldagem. Nota-se que o processo de soldagem com eletrodo tubular encontra-se em fase de expansão nas aplicações para a indústria nacional sendo observada pouca divulgação de trabalhos técnico/científicos do mesmo no Brasil. Assim ao estudar o processo com eletrodo tubular, este trabalho procura ampliar o conhecimento tecnológico do processo visando uma maior utilização do mesmo pelo setor produtivo nacional.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, que abordam os seguintes assuntos:

➤ Capítulo 1 - Introdução.

O presente capítulo aborda a relevância do tema escolhido, bem como os objetivos pretendidos, as contribuições, as limitações pela escolha do tema.

➤ Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.

Discorre-se neste capítulo sobre a revisão bibliográfica, que trata dos conceitos principais relativos ao trabalho. Faz-se inicialmente uma abordagem do processo com eletrodo tubular (FCAW) e, posteriormente, assuntos relacionados aos modos de transferências metálicas e suas influências no ajuste do processo.

➤ Capítulo 3 – Procedimento Experimental.

Neste capítulo é descrita a montagem experimental do trabalho, citando o banco de ensaios e equipamentos utilizados bem como os métodos de análises para a realização dos ensaios assim como os níveis usados para o experimento.

➤ Capítulo 4 – Resultados e Discussões.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos experimentos, além das discussões acerca destes. São apresentados, primeiramente, os resultados oriundos da transferência por curto-circuito, assim como os testes preliminares e o resultado da análise da influência dos fatores sobre as características econômicas e estabilidade do arco. Posteriormente, são apresentados os resultados oriundos da transferência pulsada, assim como os testes preliminares e o resultado da análise da influência dos fatores de pulso assim como suas interações sobre as características econômicas e estabilidade do arco, através do planejamento fatorial completo. Em função destas análises é feita uma otimização dos resultados e uma comparação entre os modos de transferências.

➤ Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.

É apresentado neste capítulo as conclusões do trabalho realizado e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A finalidade deste capítulo é descrever as informações técnicas que permitam um embasamento teórico dos aspectos relevantes da soldagem associada ao processo com eletrodo tubular, mais especificamente ao processo com eletrodo tubular tipo rutilico. Informações específicas aos modos de transferências metálicas serão apresentadas, com um enfoque especial dado aos modos de transferências metálicas por curto-circuito e pulsado, que são os objetivos centrais deste trabalho.

2.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR-FCAW

O processo Eletrodo Tubular é um processo de soldagem por fusão, cujo arco é estabelecido entre a peça e o eletrodo alimentado continuamente, sendo protegido pela ação de um gás externo (ou não) e pela decomposição do fluxo alojado no interior do arame. Este fluxo é composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, dentre as quais destacam-se a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal

de solda, a proteção do banho de fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória (Welding Handbook, 1991; Mota et al, 1998; Bracarense, 2000; Joaquim, 2001; Oliveira, 2002; Fortes 2004; Starling et al, 2005).

Existem basicamente duas variações para o processo eletrodo tubular. Na primeira variação - eletrodo tubular com proteção gasosa - as funções de proteção do arco e ionização da atmosfera são feitas por um gás que, dependendo de sua natureza química, pode ser inerte, ativo ou uma mistura destes. Na segunda variação - eletrodo autoprotégido - não exige proteção gasosa externa; os gases gerados pela decomposição do fluxo interno do eletrodo formam a atmosfera protetora para o arco e metal fundido (Bracarense 2000; Fortes 2004).

A Figura 2.1 mostra um esquema da soldagem com arame tubular com proteção gasosa onde o gás de proteção, CO_2 ou a mistura de Argônio e CO_2 é introduzido pela tocha. A utilização dos gases de proteção influencia no comportamento do processo, sendo que o gás CO_2 proporciona um arco mais intenso com maior penetração e um cordão mais convexo (um arco com pouco reforço). Em contrapartida, a mistura de CO_2 e Argônio é mais eficiente na função desoxidante, possibilitando um depósito com propriedades mecânicas mais apuradas. A mistura também oferece um arco mais suave, conveniente a soldagens fora de posição (Oliveira, 2002).

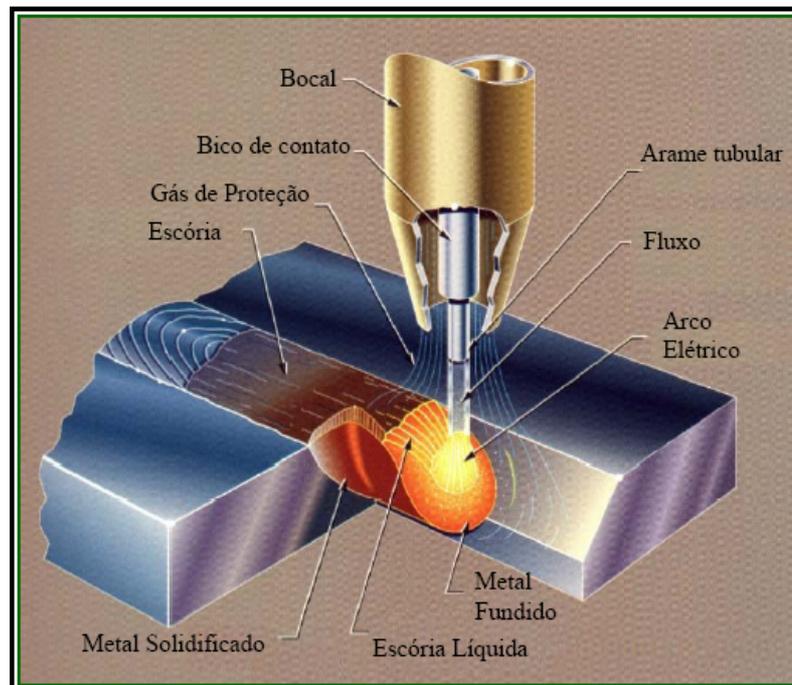


Figura 2.1- Soldagem com arame tubular com proteção gasosa (Fonte: Cooper Ordóñez, 2004).

Apesar da similaridade entre o processo eletrodo tubular com proteção gasosa e o processo com arame sólido -MIG/MAG - aquele apresenta vantagens e limitações em relação a este. Assim sendo, o processo com eletrodo tubular se destaca por gerar um metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual, além de soldar vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras, gerando uma alta taxa de deposição devido a maior densidade de corrente e, em consequência, maior produtividade. Possui ainda uma maior tolerância com relação à presença de contaminantes que podem originar trincas (Araújo, 2004).

Comparativamente ao arame sólido o eletrodo tubular é um processo mais complicado devido a interação fluxo/metal (Wang et al, 1995). Considerando que a área da seção transversal do eletrodo tubular é menor que a do arame sólido para um mesmo diâmetro, Figura 2.2, o eletrodo tubular apresenta maiores densidades de correntes (Siewert, 2002). Sendo assim a sua resistividade elétrica é maior e, consequentemente, maior calor é gerado por efeito Joule conforme se pode perceber pelas equações 2.1, 2.2 e 2.3 podendo-se obter taxas de fusão 30 a 35% superiores utilizando arames tubulares (Medeiros et al, 1989). Desta forma os parâmetros de soldagem são extremamente importantes no sentido de melhor adequar o processo principalmente no que se refere aos modos de transferências (Wang, et al, 1995) e seus reflexos na qualidade da solda.

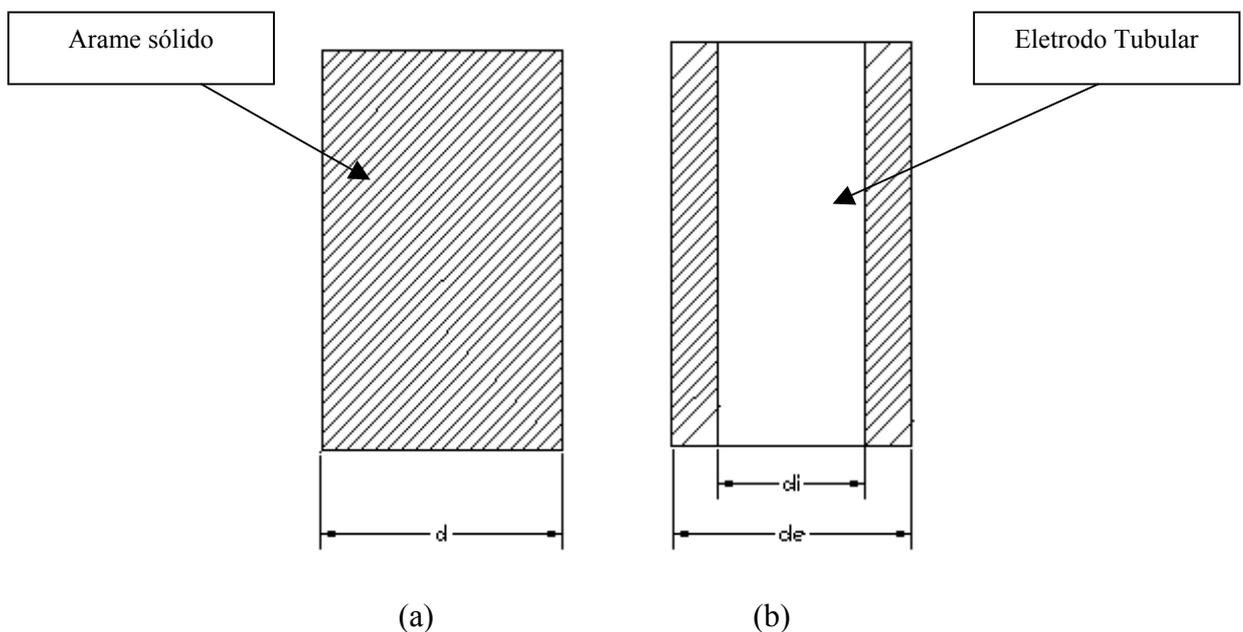


Figura 2.2-Comparação entre (a) o arame sólido do processo MIG/MAG com (b) eletrodo tubular.

$$Q_t = R_e I^2 t \quad (2.1)$$

Onde: Resistividade $R_e = \rho L / A$

$$\text{Arame s\u00f3lido} \quad R_e = \frac{\rho L}{\pi d^2 / 4} \quad (2.2)$$

$$\text{Eletrodo tubular} \quad R_e = \frac{\rho L}{\pi (d_e - d_i)^2 / 4} \quad (2.3)$$

Onde: Q_t = calor transferido por efeito joule, I = corrente m\u00e9dia, t = tempo, R_e = resist\u00eancia, ρ = resistividade el\u00e9trica do material, L = comprimento do eletrodo, d = di\u00e2metro do arame s\u00f3lido, d_e = di\u00e2metro externo, d_i = di\u00e2metro interno.

Em virtude dessas caracter\u00edsticas, o processo Eletrodo Tubular \u00e9 uma excelente op\u00e7\u00e3o quando o objetivo \u00e9 qualidade, produtividade e maiores recursos operacionais. Por outro lado, este processo limita-se por apresentar um maior custo do arame tubular na base de peso em rela\u00e7\u00e3o ao arame s\u00f3lido (Ara\u00fajo, 2004). Al\u00e9m disso, o processo exige a necessidade de remo\u00e7\u00e3o de esc\u00f3ria e apresenta a tend\u00eancia de gerar mais fumos do que o processo MIG/MAG ou arco submerso. Acrescentem-se ainda limita\u00e7\u00f5es recentes do uso deste processo na soldagem fora de posi\u00e7\u00e3o e a baixa resist\u00eancia ao impacto do cord\u00e3o de solda. Por\u00e9m a introdu\u00e7\u00e3o de novos consum\u00edveis, principalmente nos EUA, fez com que estas defici\u00eancias fossem diminuidas, aumentando ainda mais a sua aceitabilidade neste pa\u00eds e em outras partes do mundo (Oliveira, 2005).

2.2 SOLDAGEM COM G\u00c1S DE PROTE\u00c7\u00c3O (FCAW-G)

O processo de soldagem com g\u00e1s de prote\u00e7\u00e3o, foco principal deste trabalho \u00e9 amplamente utilizados na soldagem de a\u00e7os de baixo carbono e de baixa liga. Este processo existe em duas vers\u00f5es: com fluxo n\u00e3o met\u00e1lico e com fluxo met\u00e1lico.

Na soldagem com fluxo n\u00e3o met\u00e1lico (**flux cored wires**), os elementos do fluxo s\u00e3o formadores de esc\u00f3ria e estabilizadores do arco e contribuem para a redu\u00e7\u00e3o do n\u00famero de respingos e controle das caracter\u00edsticas de fus\u00e3o do eletrodo. A sua presen\u00e7a atuando durante a soldagem tanto nas caracter\u00edsticas do arco el\u00e9trico como no comportamento f\u00edsico da po\u00e7a

de fusão e metal depositado, vieram corrigir alguns defeitos do processo MIG, principalmente as colagens do eletrodo/peça (responsáveis pela impopularidade deste processo em construções de grandes responsabilidades), a falta de fusão e acabamento adequados (Gomes, 2006). Estes fluxos quanto a sua natureza podem ser rutilico, básico ou metálico.

A soldagem com **eletrodos rutilicos** proporciona um arco mais estável numa extensa gama de correntes, bom formato da gota e ainda pode ser utilizado para a soldagem em todas as posições (Widgery et al, 1998). A capacidade de soldar em todas as posições é conseguida através da composição da escória, que começa a se solidificar a temperaturas altas o bastante para promover o apoio à poça de fusão. Esses arames tubulares possuem ótimos recursos operacionais, com baixo nível de respingos, e suas propriedades mecânicas são boas e atendem ou excedem as especificações AWS. Outra característica importante é a fácil destacabilidade da escória, além de se poder trabalhar com todos os tipos de transferências metálicas.

Através do **rutilo** que é uma forma do dióxido de titânio, permitiu-se controlar o ponto de fusão e a viscosidade da escória, de tal modo que fosse possível fabricar eletrodos com escória consistente para a soldagem na posição vertical, ou escórias fluidas para a soldagem em altas velocidades na posição plana. O dióxido de titânio é um componente estável que contribui com pouco oxigênio para a solda, porém favorece a transferência globular devido à fluidez (Gomes, 2006).

Os eletrodos E71T-1 contêm ingredientes do fluxo que produzem uma escória de rápida solidificação, e a fluidez adequada da poça de fusão para a soldagem fora de posição. A tensão do arco e a corrente de soldagem podem ser altas, devido ao suporte dado pela escória, conseguindo assim altas taxas de deposição.

Soldagem com **eletrodos básicos** têm como resultado solda com excelente ductilidade e tenacidade. Seu modo de transferência é mais globular e sua soldabilidade não é tão boa, quando comparada com o eletrodo rutilico, gerando também uma quantidade maior de respingos e um cordão mais convexo (Gomes, 2006). São empregados quando propriedades mecânicas e baixo nível de depósito de hidrogênio são requeridos. Até mesmo, com diâmetros pequenos não são usados fora de posição, devido às baixas correntes de soldagem e ao modo de transferência globular que necessita do efeito da gravidade para completar sua transferência. A escória formada pelo eletrodo básico não dá o suporte à poça de fusão, conseguido com o eletrodo rutilico, relata French et al (1995).

Quando o fluxo é metálico (**metal cored wires**), de acordo com estudos de Bauné et al (2000), seus elementos têm a função de unir o metal de solda juntamente com os elementos contidos no interior do eletrodo, para aumentar a resistência do material depositado e também para desoxidá-lo. Quando aplicados em peças com boa qualidade de limpeza, produzem muito pouca escória vítrea, similar à dos arames sólidos (Araújo, 2004).

Esta descrição das características dos arames tubulares mostra que, enquanto o arame rutilico oferece alta facilidade de execução, podendo soldar em todas as posições, porém para a soldagem com baixa responsabilidade, o arame básico e o “metal cored” oferecem vantagens potenciais em termos de propriedades mecânicas, nível de hidrogênio difusível, taxa de deposição e eficiência.

2.2.1 Proteção Gasosa

O gás de proteção tem uma influência muito significativa em todo o desempenho da soldagem com eletrodo tubular. Sua função principal é proteger o metal fundido da oxidação, quando este é transferido do eletrodo para o metal base durante a soldagem. O gás promove também a estabilidade do arco e a uniformidade da transferência metálica, controlando o modo de transferência em conjunto com outros parâmetros. Tanto a abertura como a estabilidade do arco é influenciada pelo potencial de ionização dos gases de proteção usados no processo de soldagem. Ele afeta a eficiência, a qualidade, as propriedades da solda e determina a geometria como também a penetração do cordão de solda. O gás de proteção interage com o arame eletrodo na soldagem produzindo melhorias nas propriedades mecânicas do metal depositado, controlando a transferência eficiente dos componentes químicos do arame e alterando a microestrutura da solda. O gás de proteção pode também afetar o conteúdo residual de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio dissolvido no metal de solda (Lyttle, 1990).

O dióxido de carbono (CO₂) é muito usado para proteção durante a soldagem com arames tubulares. Duas vantagens deste gás são o baixo custo e alta penetração. A elevada condutividade térmica do CO₂ faz com que o núcleo de condução do arco tenha pequeno diâmetro, tornando o arco mais constricto, o que provoca uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, promovendo uma influência marcante na geometria do cordão, aumentando não somente a penetração, mas também o reforço e diminuindo a largura do cordão (Sales et

al, 1998). Por outro lado à ocorrência de um núcleo de condução do arco de pequeno diâmetro aumenta a perturbação da superfície da poça metálica fundida prejudicando a estabilidade do arco e gerando a formação excessiva de respingos (Dillenbeck, 1987; Baixo & Dutra, 1990).

Apesar de o processo de soldagem com arames sólidos, utilizando-se CO_2 puro como gás de proteção não permitir o alcance da transferência por spray, devido às características físicas do gás, um aspecto interessante a ser observado em soldagens com arame tubular, é que este processo, mesmo utilizando 100% de CO_2 como gás de proteção, permite que se alcance um modo de transferência próximo do tipo spray (Barhorst, 2000; Rodrigues, 2005).

O dióxido de carbono é relativamente inativo na temperatura ambiente. Quando ele é aquecido a altas temperaturas pelo arco elétrico, dissocia formando o monóxido de carbono (CO) e o oxigênio. O oxigênio proveniente desta dissociação irá reagir com os elementos do metal fundido oxidando-os. Assim, materiais desoxidantes são adicionados ao fluxo do eletrodo para compensar os efeitos oxidantes do CO_2 (Bracarense, 2000).

O uso da mistura de gases na soldagem com arames tubulares pode combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases. O aumento de gás inerte aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração será reduzida. O Argônio é capaz de proteger a poça de fusão em todas as temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidade suficiente resulta na diminuição da oxidação comparativamente a proteção com CO_2 (100%) (Bracarense, 2000). A Figura 2.4 apresenta um comparativo do efeito do gás de proteção no perfil do cordão de solda em soldagem com Eletrodo Tubular.

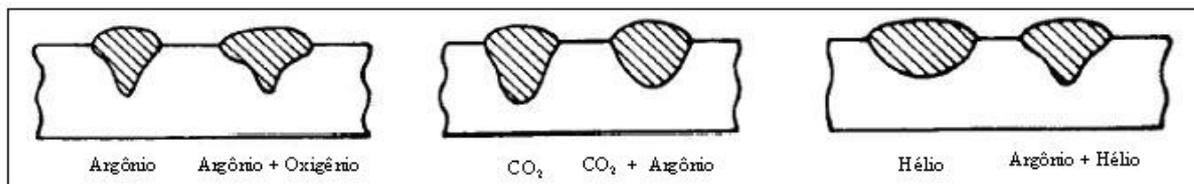


Figura 2.3-Efeito do Gás de Proteção no Perfil do Cordão de Solda (Bracarense 2000).

Alguns resultados da influência benéfica da mudança do gás CO_2 para uma mistura de Argônio e CO_2 são verificadas através da obtenção de melhor acabamento e perfil do cordão, minimização dos respingos e maiores velocidades de soldagem (Fortes 2004; Bracarense, 2000).

Atualmente, diversos tipos de mistura de gases estão disponíveis no mercado, sendo a mistura 75% de Argônio e 25% de CO₂ a mais utilizada. O metal de solda depositado com esta mistura tem alto limite de escoamento e resistência à tração, comparado com o metal depositado com 100% de proteção com CO₂ (Bracarense, 2000).

De uma forma geral o gás de proteção promove a influencia na estabilidade do arco, no modo e na uniformidade da transferência metálica em conjunto com vários outros parâmetros. Tais detalhes serão discutidos a seguir.

2.3 TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS

Nos processos GMAW e FCAW, a deposição do metal de solda é realizada via transferência de ‘gotas’ de metal através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência desta deposição caracterizam um determinado tipo de transferência metálica (Wang et al, 1995).

Atualmente, as características de transferência do metal de solda, são objetos de estudo nos processos utilizados para soldagem dos materiais, principalmente em relação a processos semi-automáticos, onde as variações ligadas ao processo de soldagem tais como o comprimento do arco elétrico (tensão) e a velocidade de alimentação do arame (responsáveis pela instabilidade do processo), influem na taxa de fusão e no modo de transferência do metal. O modo de transferência do metal no processo FCAW varia com o tipo de arame utilizado, proteção gasosa ou ausência desta, polaridade e intensidade da corrente (Joaquim, 2001).

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

No processo FCAW em função das interações fluxo/metal que ocorrem durante a soldagem existe dificuldade em classificar os modos de transferência do processo (Starling & Modenesi, 2006). Além disso, a área metálica da seção transversal do arame tubular sendo menor que a do arame sólido de mesmo diâmetro (conforme afirmado anteriormente) resultando em maiores densidades de corrente dificultam sobremaneira a determinação dos

modos de transferências (Lima & Ferraresi, 2006). Entretanto há uma predominância dos modos típicos de transferências dependendo das condições de soldagem, ou seja, curto-circuito, globular e spray, porém variável entre os tipos de arames tubulares. Wang et al (1995) utilizando o arame tubular rutilico (AWS E71T-1) com proteção 75%Ar + 25% CO₂ perceberam a ocorrência de todos os modos típicos de transferências e propuseram um mapeamento de predominância em função principalmente do ajuste de tensão, Figura 2.4. Percebe-se que com o aumento da tensão, as transferências por curtos circuitos aumentam seguidas por uma substancial queda. Norrish (1992) trabalhou no modo spray com eletrodos rutilicos e estabeleceu alguns princípios físicos da interação do fluxo no momento da transferência das gotas, o qual afirma que uma pequena quantidade se decompõe formando gases e a parte restante é transferida à poça de fusão produzindo a camada de escória protetora. Rodrigues (2005) estendeu os estudos do processo tubular aplicado em soldagens com o modo spray, desenvolvendo modelos matemáticos sobre a influência dos parâmetros nos aspectos geométricos e econômicos do cordão. Starling & Modenesi (2006) realizaram um amplo estudo baseado em observações por shadowgrafia (filmagem da solda com câmara de alta resolução) na caracterização dos modos de transferência presentes em soldagens com arames tubulares rutilicos, básicos e metal cored.

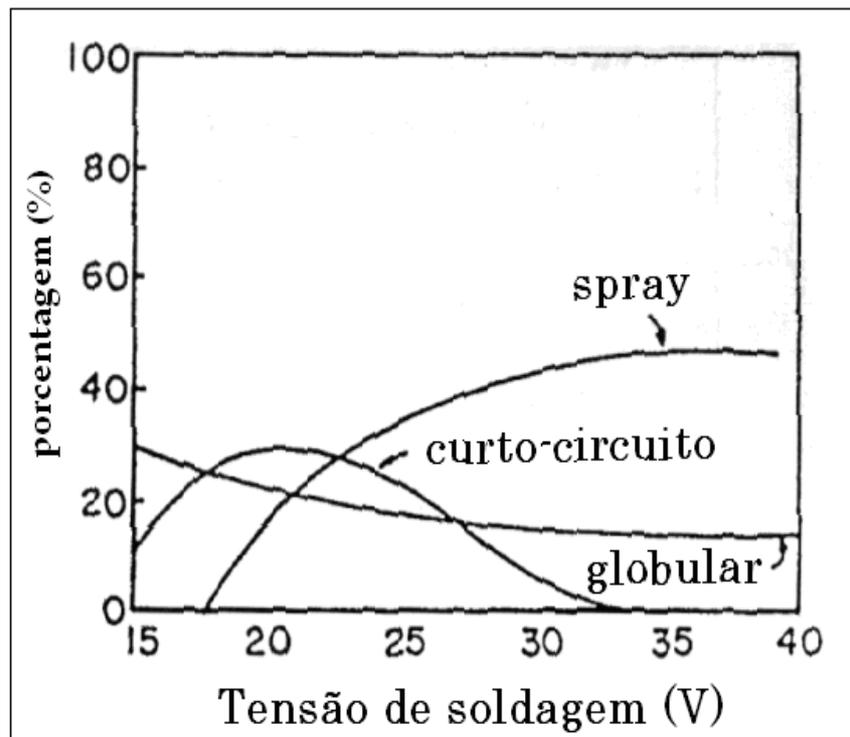


Figura 2.4- Efeito da tensão nos modos de transferências metálicas (Wang et al, 1995).

Dentre estes modos de transferência, o modo por curto-circuito tem sua importância principalmente quando se requer soldagens de chapas finas, ou ainda, quando se procura soldagens fora de posição. Tal modo, bem como sua caracterização na soldagem com eletrodo tubular será caracterizado a seguir.

2.3.1 Transferência por Curto-Circuito

A transferência por curto-circuito é caracterizada por pequenas gotas de tamanho próximo ao do diâmetro do arame, destacadas no contato, em curto-circuito, do arame com a peça, Figura 2.5. Caracterizada pela baixa corrente e baixa tensão, é uma transferência muito utilizada em chapas finas, soldas fora de posição ou na soldagem de passe de raiz em juntas tubulares. Usualmente é limitada para arames de até 1,2 mm de diâmetro. Para se obter uma transferência em curto-circuito estável e de forma controlável é necessário um controle mais preciso dos parâmetros (Bracarense et al, 2004).

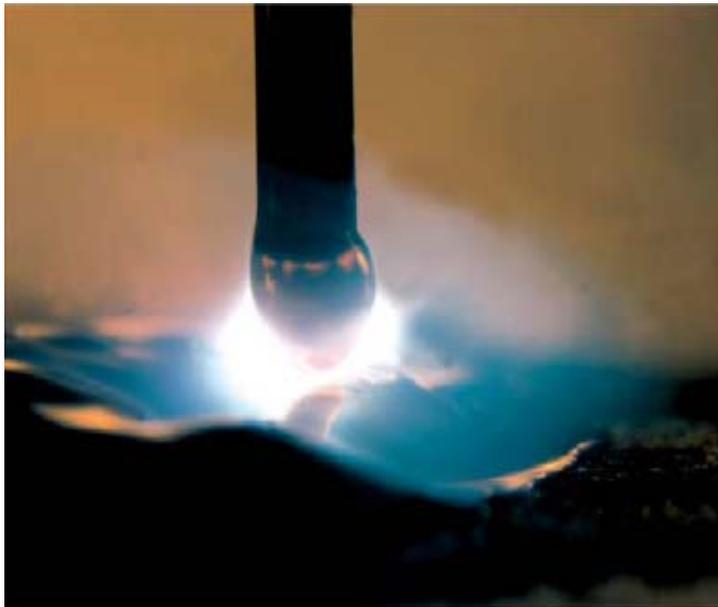


Figura 2.5-Modo de transferência por curto-circuito (Bracarense et al, 2004).

Dentre os modos de transferência, a por curto-circuito desperta grande interesse por suas particularidades no momento da transferência da gota. Assim no momento do curto-circuito a corrente aumenta rapidamente de valor e a tensão cai bruscamente, conforme se observa na Figura 2.6 (Silva, 2005).

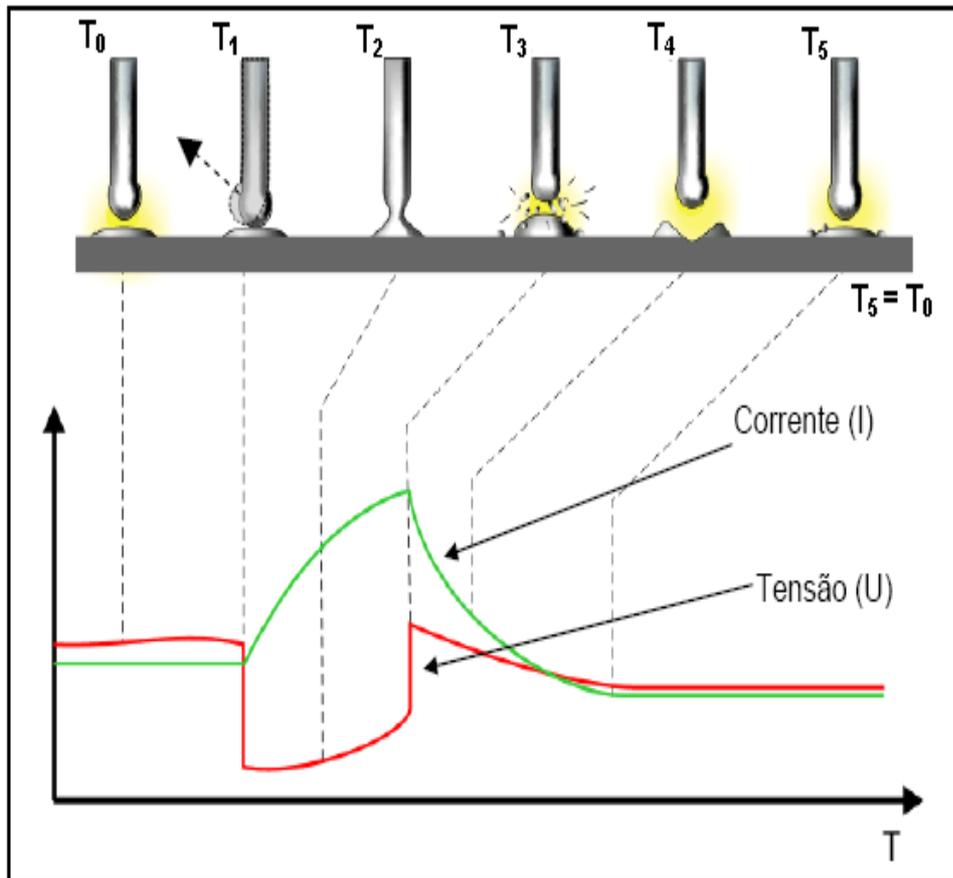


Figura 2.6-Ciclo completo da transferência por curto-circuito (Silva, 2005).

- T_0 é a fase de formação e crescimento da gota na ponta do arame eletrodo. À medida que a gota é formada, o comprimento do arco diminui, ocorrendo uma pequena queda de tensão.
- Em T_1 , a gota formada toca a poça de fusão, a tensão cai bruscamente e a corrente aumenta as taxas elevadas.
- Em T_2 , parte da gota já foi transferida para a poça de fusão e a ponte formada entre o eletrodo e a poça de fusão começa a se romper.
- Em T_3 ocorre o rompimento da ponte metálica e a tensão sobe caracterizando um pico de reignição. A corrente neste mesmo instante começa a cair para valores de regime.
- Em T_4 , a tensão e corrente já se estabilizaram para valores de regime e começa a formar uma nova gota na ponta do eletrodo.
- Em T_5 reinicia o ciclo de transferência metálica, ocorrendo o mesmo que em T_0 .

Percebe-se que na transferência por curto-circuito a taxa de variação da corrente deve ser alta o suficiente para causar a transferência da gota e baixa o suficiente para minimizar os respingos (Miranda, 1999). Para alterar a taxa de variação da corrente, as fontes de soldagem

do tipo tensão constante possuem o recurso de controle da indutância, sendo que esta altera a velocidade de resposta do circuito da soldagem, fazendo com que a corrente, modifique seu valor de forma controlada.

De forma geral os valores de corrente e tensão no modo por curto-circuito são limitados e as extinções freqüentes do arco. Desta forma o calor transferido é pequeno, indicando que este tipo de transferência é adequado para soldagem de chapas finas, ou ainda em todas as posições de soldagem (Miranda, 1999; Fortes, 2004; Gomes et al, 2006).

a) Estabilidade do Arco

Um arco estável é a chave principal para a realização de soldas com boa qualidade. A estabilidade é dependente das características do equipamento, das propriedades físicas e químicas do eletrodo da atmosfera ionizante e do material de base. Estes fatores interagem de forma complexa e, mesmo fixando a característica do equipamento, uma boa estabilidade só será alcançada, com base no conhecimento das propriedades do arco. O melhor ajuste das variáveis elétricas para a obtenção de uma boa estabilidade do arco não é fácil, e deve ser realizado com base nas necessidades de ionização do gás, nas dimensões do eletrodo, no tipo de metal de base e do eletrodo, na posição de soldagem e nas exigências de qualidade (Miranda, 1999).

A estabilidade do arco em transferência por curto-circuito é afetada pelas extinções do arco, um arco estável nesse caso é o que possui uma transferência periódica e cujo tempo de apagamento do mesmo seja o mínimo possível, isto pode ser resumido em um menor período de curto-circuito e menor tempo de transferência, com a transferência de gotas menores em uma maior freqüência e maior regularidade. Assim o modo de transferência por curto-circuito tem as suas particularidades que afetam sobremaneira o comportamento do arco desde a formação das gotas até a sua transferência definitiva, sendo as características dinâmicas da tensão e corrente durante a soldagem fator fundamental para o estabelecimento dos critérios de estabilidade. A Figura 2.7 mostra as ferramentas imprescindíveis para uma melhor observância do comportamento do arco e conseqüentemente, do conhecimento do processo (Gomes et al, 2006).

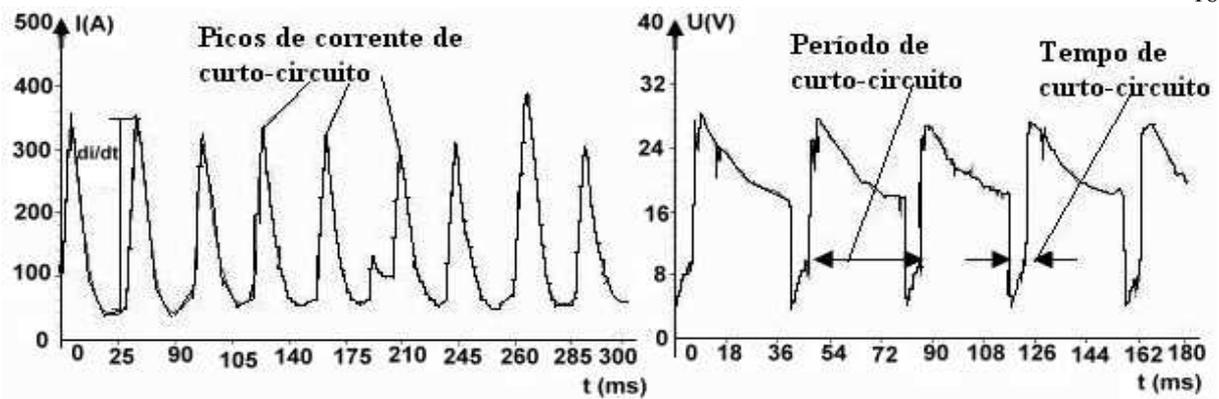


Figura 2.7- Índices derivativos de avaliação de transferência por curto-circuito:(a) corrente; b) tensão (Gomes et al, 2006).

Vários critérios para identificar a estabilidade do arco a partir do comportamento dinâmico da tensão têm sido descritos na literatura por vários autores (Shinoda, 1989; Baixo, 1990; Adolfson, 1999; Hermans, 1999; Gomes, 2006). De certa forma há concordância entre os autores de que condições ótimas de estabilidade correspondem aos seguintes aspectos observados:

- Uma taxa máxima de curtos-circuitos (Nc/s);
- Um mínimo desvio padrão na taxa de curtos-circuitos;
- Um mínimo de massa transferida por curto-circuito, ou seja, pequenas gotas;
- Uma mínima perda por respingos.

Além disso, regularidades na ocorrência de picos de corrente e do período de curtos-circuitos entre outros também podem ser indícios de uma estabilidade no momento da transferência. Desta forma a estabilidade do arco é altamente influenciada pela formação do curto-circuito e análises do comportamento do arco durante sua ocorrência permite um melhor controle dos parâmetros, de tal forma a manter uma transferência regular gerando melhor qualidade na solda e menor formação de respingos (Gomes et al, 2006).

A análise dos histogramas dos picos de corrente, dos tempos entre as transferências e dos tempos de curto circuito, para avaliar a estabilidade do arco mostra que a tensão (para uma dada velocidade de alimentação do eletrodo e velocidade de soldagem) e a indutância são as variáveis críticas para estabelecer uma condição adequada de soldagem conforme é mencionado na literatura (Miranda, 1999, Wang, 1995; Wu, 2004, Kobayashi, 2005).

Entre os parâmetros do processo, o nível de indutância tem influência marcante no comportamento do curto-circuito. Vários pesquisadores têm estudado a influência desse fator assim como o nível de regulagem na ocorrência dos curtos-circuitos (Miranda, 1999, Baixo & Dutra, 1990; Júnior, 2002) e perceberam que a gota pode ser transferida de uma forma muito

brusca caso nenhuma indutância esteja presente, durante a constrição do eletrodo (efeito “pinch”) no instante do curto-circuito (Baixo & Dutra, 1990). Desta forma a corrente sobe a uma taxa muito elevada, para um dado intervalo de tempo, provocando uma geração excessiva de respingos e instabilidade do arco. Gomes (2006) observou que no processo com eletrodo tubular com proteção de CO₂ no modo de transferência por curto-circuito, a utilização de alta indutância além de resultar na diminuição de ocorrência de respingos, provocou em contrapartida o aumento dos curtos de pequena duração (curtos-circuitos aleatórios), resultando na queda da regularidade de ocorrência de curtos-circuitos, Figura 2.8. Tal resultado foi similar ao observado por Baixo & Dutra (1990) em soldagem MIG/MAG. Por outro lado Gomes (2005) observou que a utilização do eletrodo tubular, porém com mistura C25, a utilização da indutância em seu nível máximo diminuiu sensivelmente a ocorrência de curtos de pequena duração.

É essencial salientar ainda que outros fatores podem interagir com a indutância trazendo influências significativas no comportamento da soldagem.

Gomes et al, (2006), perceberam que a interação entre a tensão e a indutância no desvio do tempo de curto-circuito foi mais significativa que seus efeitos isolados, observando um efeito nítido de aumento da regularidade de ocorrência de curtos-circuitos para valores limites de tensão de 23 Volts. Por outro lado a diminuição do nível de indutância resultou em uma melhor regularidade do tempo de curto-circuito. Assim observou-se que para o nível mínimo de tensão (19Volts) e indutância no nível médio (5) a estabilidade melhorou sensivelmente.

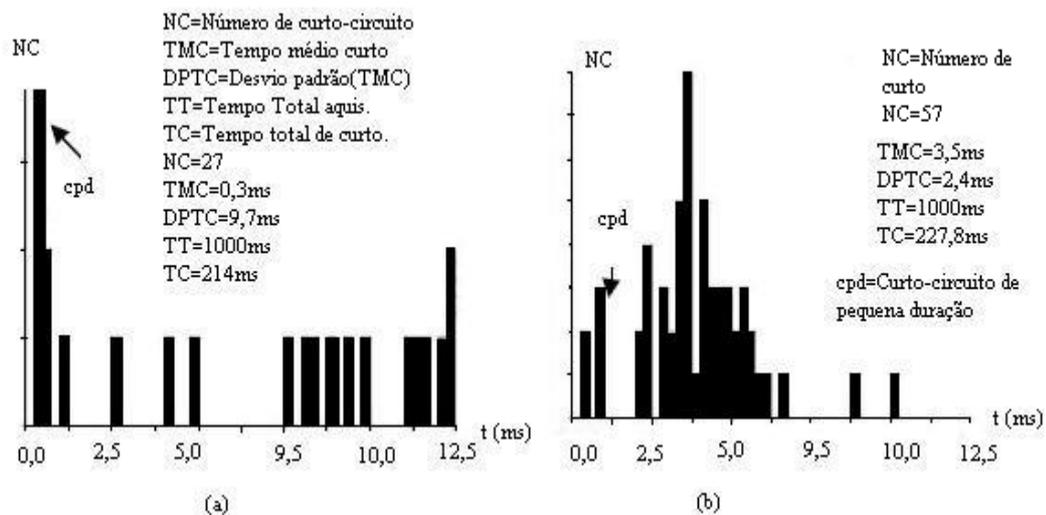


Figura 2.8-Histograma do tempo de curto-circuito com proteção gasosa CO₂: (a) Ind. = 9; V=19Volts e (b) Ind. = 2; V=21Volts (Gomes et al, 2006).

Gomes (2006) utilizou dois tipos de gases em sua pesquisa usando a transferência por curto-circuito e percebeu que a utilização do gás CO_2 e sua interação com a indutância aumentaram a ocorrência de curtos-circuitos conforme se observa na Figura 2.9. Concluiu-se que para maximizar o tempo total de curto, utilizando CO_2 é necessário utilizar indutância no nível 2 ou 5, porém percebeu que a indutância no seu nível 5 permitiu um melhor aproveitamento do processo em função da menor formação de respingos quando comparado com o seu nível máximo de indutância. Por outro lado, ao utilizar a mistura C25, observou que ajustando a indutância no nível máximo permitiu maximizar o tempo total de curto, Figura 2.9.

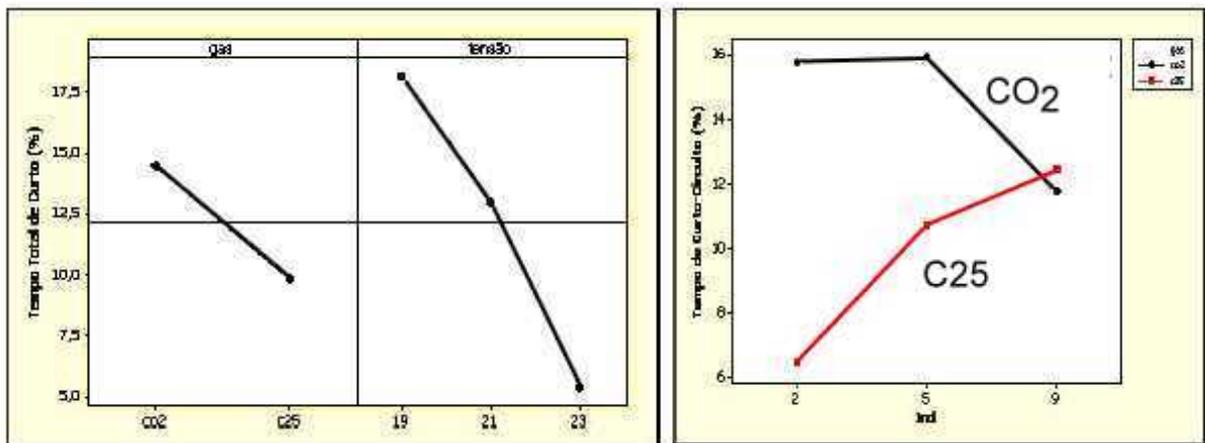


Figura 2.9-Efeitos principais e suas interações no tempo total de curto-circuito (Gomes et al, 2006).

2.3.2 Transferência por Arco Pulsado

Este modo de transferência foi desenvolvido primordialmente para não haver contato físico entre o eletrodo e a peça. Na prática é muito difícil de evitar totalmente o contato físico (curto-circuito). Este fato deve-se basicamente a forma de onda de corrente imposta de tal forma a não haver variações durante a soldagem, como ocorre com o modo convencional usando o controle da tensão (Júnior 2002).

A utilização do modo de transferência por spray em função dos altos níveis de energia gerados na solda cria limitações na sua utilização na deposição do metal de solda fora de posição e em chapas finas. Estas limitações levaram a investigação científica do desenvolvimento de métodos de soldagem alternativos e mais eficientes para o controle dos

parâmetros de soldagem (Braga et al, 1998). O modo pulsado foi idealizado para suprir estas deficiências do modo spray se tornando possível a partir da concepção das fontes eletrônicas para a soldagem a arco voltaico (Nascimento et al, 2003), sendo que através da utilização de pulsos intermitentes da corrente é possível gerar níveis de corrente média (I_m) abaixo da corrente de transição para 'spray', conforme ilustra a Figura 2.10 (Scotti, 1991, apud Pereira, 1995). O uso da corrente pulsada permite se obter convenientes características de transferência metálica, enquanto se mantém o calor de aporte em níveis apropriados para todas as posições de soldagem.

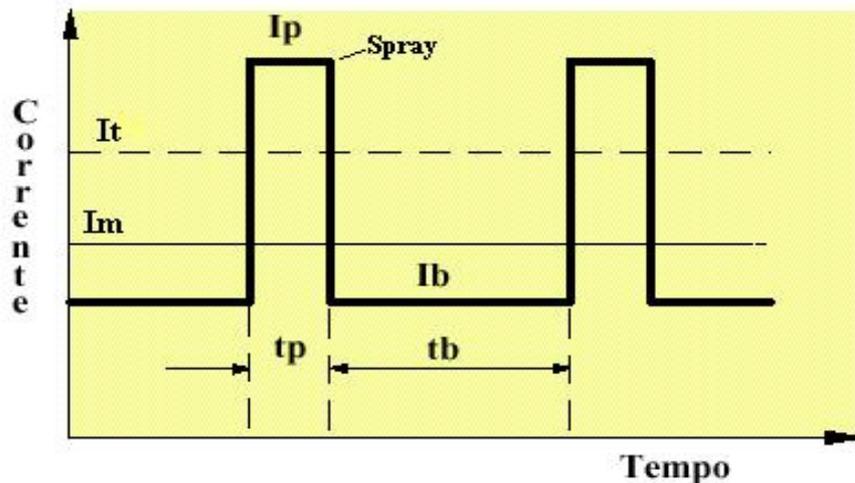


Figura 2.10-Modo de transferência pulsada (Modenesi, 2004).

Durante o pulso ou tempo de pico (t_p), a corrente (I_p) é suficientemente alta para provocar destacamento da gota devido ao efeito eletromagnético, tal como na transferência por 'spray', esta gota se destaca com um diâmetro preferencialmente próximo ao diâmetro do arame eletrodo, caracterizando, geralmente, um arco suave e estável (Subramaniam et al, 1998). Durante o período de base (t_b), a corrente (I_b), este é suficiente para manter o arco e conservar o efeito de aquecimento sob controle, normalmente a corrente de base é utilizada na faixa de 50 a 80 A (Norrish, 1995; Pereira, 1995). A regulação destes parâmetros de pulso tem efeitos marcantes na estabilidade do arco, na qualidade da solda, na aparência e geometria do cordão, sendo necessário que os mesmos sejam bem regulados de forma a se obter as melhores características na soldagem (Palani & Murugan, 2006). Sob este aspecto, Palani & Murugan (2006) afirmam que apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado, a complexa natureza desse processo e o alto grau de habilidade exigida por parte dos soldadores na correta seleção dos parâmetros operacionais, têm limitado, de maneira

significativa sua aceitação pelas indústrias de soldagem. Uma das maiores dificuldades da utilização eficaz do processo se refere a estabilidade do arco. A transferência metálica que proporciona as melhores características de estabilidade é a que destaca uma gota por pulso - UGPP-sendo a mesma influenciada preferencialmente pelos parâmetros de pulso em conjunção com a velocidade de alimentação do arame eletrodo (v_a) e a distância bico de contato peça (DBCP) (Miranda, 2003).

A grande vantagem na utilização do modo pulsado é que, devido a menor energia fornecida ao processo, é possível executar soldas em peças de pequenas espessuras e fora da posição plana utilizando-se o modo de transferência por spray para baixos valores de corrente média e, conseqüentemente, baixo aporte térmico, podendo minimizar problemas de deformação e distorção em chapas, principalmente às de pequena espessura. É possível com este tipo de transferência controlar o tamanho da gota destacada durante cada pulso e a freqüência de destacamento, desde que o tempo do pulso, amplitude e freqüência sejam independentemente variados (Norrish & Richardson, 1998). Enquanto a corrente média se situa dentro da faixa normalmente associada à transferência globular a corrente de pico ultrapassa a faixa de transição, transferindo-se assim pequenas gotas com baixa entrega térmica (Medeiros et al, 1989).

a) Efeito dos Parâmetros de Pulsação no Processo FCAW

Uma das características do modo pulsado de soldagem é o aumento no número das variáveis de soldagem em relação ao processo convencional. Desta forma, os parâmetros a serem ajustados antes da operação e monitorados durante a soldagem são a corrente de pulso (I_p), tempo de pulso (t_p), corrente de base (I_b), tempo de base (t_b). Desses parâmetros básicos podem gerar outros parâmetros derivados como a freqüência de pulso(f), a corrente média (I_m) e o ciclo ativo (CA) que é conhecido como “Load Duty Cycle”, parâmetro este útil na determinação de uma faixa ótima de regulagem de freqüência a uma taxa de deposição constante (Kim & Eagar, 1993).

Várias pesquisas têm sido publicadas na literatura com o intuito de estabelecer condições de pulso aplicáveis à soldagem dos arames tubulares com arco pulsado, muitas das quais se concentrando no estabelecimento da influência dos parâmetros de pulsação na geometria e qualidade do cordão de solda (Amin, 1983; Alcan, 1992; Saito, 2001; Oliveira, 2005).

Allum (1985) sugere a utilização de arco pulsado com eletrodos tubulares para proporcionar menores aportes térmicos, conjuntamente com uma melhor formação e destacamento das gotas de metal fundido, promove melhorias nas propriedades mecânicas da junta através do controle das taxas de resfriamento e reações químicas, proporcionadas pelo fluxo dos eletrodos.

Saito (2001) trabalhou com eletrodo tubular pulsado com dois tipos de gases de proteção, ou seja, uma mistura gasosa Ar+25% CO₂ e CO₂ puro observou que com a mistura gasosa foram obtidos maiores valores de rendimento de deposição e largura do cordão. Tais tendências também foram observadas por Sales et al (2001) e Oliveira (2005). Com a utilização de CO₂ puro, o mesmo autor obteve maiores valores de taxa de deposição, largura do cordão, penetração da solda, altura do reforço, áreas de reforço e diluição.

Oliveira (2005) fez uma investigação dos parâmetros de pulso em soldagem com eletrodo tubular com proteção gasosa (Ar+25% CO₂) e observou que a frequência de pulsação é um fator significativo na penetração, sendo que o seu aumento provoca uma redução na penetração, provavelmente pelo menor comprimento livre do eletrodo (DBCP) fazendo com que a energia gerada pelo efeito joule também seja menor como observado por Houdcroft & John (1988).

Alcan (1992) destaca que a obtenção do tipo de transferência ideal depende da escolha correta dos parâmetros de pulso. Relata também que a relação entre a velocidade de alimentação do arame (v_a), conseqüentemente (I_m), e a frequência é proporcional ao volume de gota destacada por pulso. Assim a observação e controle dos parâmetros de pulsação são fundamentais para ter uma solda de boa qualidade e um arco mais estável.

Muitos dos estudos destacados anteriormente se concentraram na utilização do processo na posição plana. Muito embora tais condições teoricamente permitem uma utilização em todas as posições, tal fato exige alguns ajustes posteriores, principalmente pela atuação das forças sobre a formação da gota, como será discutido a seguir.

2.4 POSIÇÕES DE SOLDAGEM

A técnica de execução em cada uma das posições é um assunto pouco documentado na literatura. Todavia, a posição plana é a mais favorável dentre as usualmente empregadas,

permitindo a execução de soldas eficientes em tempo curto, devido à facilidade de controle da poça fundida. Oliveira (2002) afirma que as outras posições têm como principal inconveniente à dificuldade de conter o material fundido no local de soldagem. Sua fluidez leva ao escorrimento e a queda, provocando a deformação do cordão, o excesso de respingos, as mordeduras, etc.

A Figura 2.11 mostra o balanço das principais forças que atuam na ponta do eletrodo e contribui para a transferência de metal, sendo as mesmas oriundas da gravidade, da tensão superficial, da força eletromagnética, da força de arraste pela passagem de gases e da força de reação a jato dos vapores ou ao jato de plasma. Assim a gota na ponta do eletrodo se destacará quando o balanço das forças atuando nesta passar a apresentar uma resultante que a afaste do eletrodo (Modenesi, 2004).

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad (2.4)$$

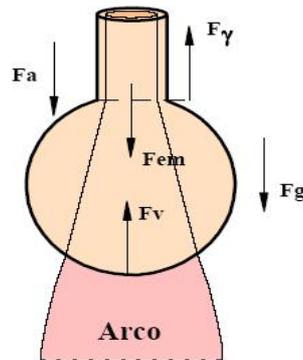


Figura 2.11-Balanço de forças na ponta do eletrodo. F_g = força de gravidade, F_{em} = Força eletromagnética, F_a = Força de arraste, F_γ = Força associada à tensão superficial, F_v = Força de reação (Modenesi, 2004).

Scotti & Dutra (1993) fizeram um estudo da soldagem vertical ascendente empregando o processo MIG/MAG pulsado utilizando misturas de Argônio com CO_2 e O_2 , observaram que independente do gás, nota-se um fenômeno de “auto-crescimento” do arco responsável pelos defeitos do cordão. Essas irregularidades do cordão podem ser evitadas pelo uso de um comprimento do arco pequeno, mantido pelo uso de um controle externo no alimentador do arame. Acrescentaram ainda ser necessário também um controle sobre os ajustes das variáveis para proporcionar um arco inicial de tamanho apropriado.

Scotti & Dutra (1993) destacam também que o processo MIG/MAG, apesar de sua notável participação no mercado, a maior aplicação se dá de forma semi-automática. Nesta condição o soldador utiliza a sua habilidade para controlar a poça, através do devido

movimento e posicionamento da tocha. Tentativas de automatizar o processo têm demonstrado sérias dificuldades, mesmo utilizando o uso de corrente pulsada.

Oliveira (2002), trabalhando com o arame tubular AWS E 71T-1, no modo convencional procurou estabelecer as melhores combinações de parâmetros em todas as posições de soldagem, na tentativa de conseguir bons resultados, observou que a soldagem na posição vertical descendente foi dificultada com a utilização do referido arame. Segundo o mesmo autor, um dos problemas relacionados com a soldagem vertical está no escorrimento do metal fundido e, conseqüentemente, na perda de volume da poça de fusão. Sendo assim o autor sugere que o desenvolvimento de consumíveis com uma maior viscosidade da escória, a qual recobriria o material fundido, poderia fazer com que a mesma tenha maior dificuldade para escorrer, formando uma barreira na face externa inferior da poça descendente. A velocidade de resfriamento da escória, por sua vez, se for maior, permitirá que esta escória se solidifique mais rapidamente, auxiliando a contenção mecânica da poça de fusão, precipitando a solidificação do material fundido e retirando-lhe calor.

Assim neste trabalho, ao se propor o estudo do processo tubular pulsado na posição vertical descendente espera-se a obtenção de maiores informações que venham permitir um ajuste mais adequado do mesmo.

2.5 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS E GEOMÉTRICAS

Nos processos de soldagem, freqüentemente necessita-se avaliar algumas características de desempenho objetivando a análise do comportamento produtivo, sendo estas retratadas como a taxa de deposição, a taxa de fusão e o rendimento, entre outras.

A taxa de deposição é a quantidade de metal (em massa ou peso) depositado por unidade de tempo. A taxa de deposição depende de variáveis de soldagem, tais como, diâmetro do eletrodo, composição química, extensão do eletrodo e corrente de soldagem (Fortes 2004; Joaquim, 2001; Miranda, 1999). A taxa de fusão é a quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo. Os fatores principais que governam a taxa de fusão são o tipo e estabilidade da transferência metálica, e ainda as características do fluxo que podem conter elementos de adição. Valores muito baixos de tensão podem provocar interrupções no arco ocasionando falhas na transferência do metal de adição, assim como o tipo de gás de proteção

utilizado no processo ocasiona instabilidades na transferência podendo provocar uma grande formação de salpicos (Oliveira, 2005).

O rendimento é uma característica importante na análise de um processo de soldagem, pois influencia diretamente no aporte de calor e nos custos de soldagem. Os fatores que levam ao decréscimo no rendimento são normalmente as perdas por formação de respingos (Saito, 2001).

Para uma utilização econômica mais efetiva do processo FCAW, normalmente se torna imperativo o estabelecimento de condições de soldagem que garantam taxas de deposição superiores às obtidas pelo processo com arame sólido, visto que o custo do arame tubular normalmente é superior ao sólido. Isto se torna ainda mais crítico considerando a formação de escória no processo. Sob este aspecto Machado (1995) sugere que no processo FCAW, a eficiência aliada com a taxa de deposição e a massa do metal de solda a ser depositado pode ser alterada e melhor estabelecida, a fim de aumentar a produtividade.

Rodgers & Lochhead (1989) estudaram o uso dos arames tubulares com proteção gasosa e transferência metálica por curto-circuito em indústrias “offshore” fazendo um comparativo entre as taxas de deposição típicas relativamente a outros processos de soldagem. Tais resultados são mostrados na Tabela 2.1. Os autores comentam que o processo FCAW no modo de transferência curto-circuito se mostrou satisfatório, a operabilidade e a estabilidade do arco foram grandes e nenhuma evidencia foi achada de alguma tendência para fusão incompleta e descontinuidades. Nota-se ainda que o modo pulsado apresentou taxas de deposição nitidamente superiores às do modo por curto-circuito.

Com relação às características geométricas observa-se que o processo FCAW se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual. A qualidade da solda produzida por este processo depende do tipo de metal base, do projeto da junta e do procedimento de soldagem. Entretanto, a ocorrência de descontinuidades está diretamente relacionada a procedimentos e práticas inadequadas (Bracarense 2000). Vários autores desenvolveram estudos neste sentido e estabeleceram condições de ajuste dos parâmetros que permitem conduzir a um melhor perfil do cordão, tanto no modo pulsado (Oliveira, 2002; Oliveira, 2005; Saito, 2001) quanto no modo por curto-circuito (Gomes, 2005).

Tabela 2.1 - Taxas típicas de deposição de processos usados na indústria “offshore”
(Rodgers & Lochhead, 1989).

Processo de soldagem	Proteção gasosa (75%Ar+25%CO ₂)	Taxa de Deposição (kg/h)
FCAW curto-circuito	Com proteção	2,1 - 2,4
FCAW pulsado	Com proteção	5,4
SMAW-7018G	-	1,2 – 1,8
FCAW autoprottegido NR203 Ni-C	Sem proteção	1,5 – 2,0

Reforçando a importância do tópico, Baixo & Dutra (1990) lembram que na utilização do modo por curto-circuito, apesar dos valores de tensão e corrente média manterem-se inalterados com a mudança na dinâmica da fonte, a geometria do cordão de solda não segue o mesmo comportamento e isto deve ser levado em consideração na seleção de variáveis de soldagem.

A geometria do cordão de solda afeta diretamente as propriedades mecânicas da junta. Estas propriedades mecânicas constituem uma das características mais importantes dos metais em suas várias aplicações na engenharia, visto que, o projeto e a execução de estruturas metálicas são baseados no comportamento destas propriedades.

Segundo Souza, (1982) a determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização da matéria, embora existam os ensaios chamados de não destrutivos, utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como para detectar falha interna do mesmo. Na categoria de ensaios destrutivos, estão classificados os ensaios de tração, cisalhamento, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. Grande número de trabalhos tem sido realizado há varias décadas para a compreensão e caracterização das diversas formas de fissuração que podem ocorrer em uma solda. A tendência de uma trinca se formar em um dado componente soldado é um complexo que depende de inúmeros fatores, vários deles difíceis de caracterização como consequência um grande número de ensaios de soldabilidade tem sido desenvolvido por diferentes autores (Modenesi et al, 2001).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica aqui apresentada abordou vários aspectos da soldagem com Eletrodo Tubular. Sendo assim todas as informações aqui reunidas tiveram como meta fornecer informações sobre o assunto. Nota-se que apesar da soldagem com o processo Eletrodo Tubular ter ganhado popularidade entre os fabricantes nos últimos anos, as fontes de pesquisas sobre o assunto ainda são poucas. Sendo assim ao elaborar esta revisão bibliográfica procurou reunir o máximo de informações possível como forma de contribuir para o objetivo principal deste, que é ampliar o conhecimento sobre a soldagem com Eletrodo Tubular por Curto-Circuito e Pulsado e, ainda estabelecer uma base de conhecimento na aplicabilidade de ambos os modos na soldagem fora de posição e, mais especificamente, na posição vertical descendente. Cabe também ressaltar o aspecto produtivo em ambas as condições, onde muitas vezes questões de implicações de caráter econômico sempre surgem ao se optar pela utilização de um dos dois modos de soldagem. Este será foco do procedimento experimental a ser analisado.

Capítulo 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

Todo o procedimento de montagem da bancada experimental, a descrição dos equipamentos, dos acessórios, dos materiais de consumo empregados, dos testes preliminares realizados para definição dos parâmetros avaliados no ensaio final utilizando os modos de transferência (curto-circuito e pulsado) são detalhados neste capítulo. Para a concretização dos objetivos do trabalho, utilizaram-se alguns parâmetros supostamente definidos para a posição plana em trabalhos anteriores (Gomes, 2006; Oliveira, 2005). Sendo assim uma série de testes preliminares foram realizados, para melhor adequar as variáveis (e os seus respectivos níveis) aos modos de transferências metálica por curto-circuito e pulsada na posição vertical descendente. Em seguida o software MINITAB foi utilizado para se obter o delineamento dos experimentos pelo método fatorial completo para o modo de transferência por curto-circuito e o método fatorial fracionário para o modo pulsado. Após análise dos resultados foi realizada uma otimização para cada modo de transferência estabelecendo as

melhores condições de soldagem para cada caso. Finalmente estas condições foram reproduzidas na parte prática através de uma nova configuração de junta e realizadas análises comparativas relativas aos aspectos econômicos e de propriedades mecânicas para os dois modos de transferências.

A seguir todos os detalhamentos do trabalho como fluxograma, procedimento experimental e testes serão descritos.

3.2 FLUXOGRAMA DO TRABALHO

Para a melhor compreensão do trabalho foi elaborado um fluxograma conforme a Figura 3.1.

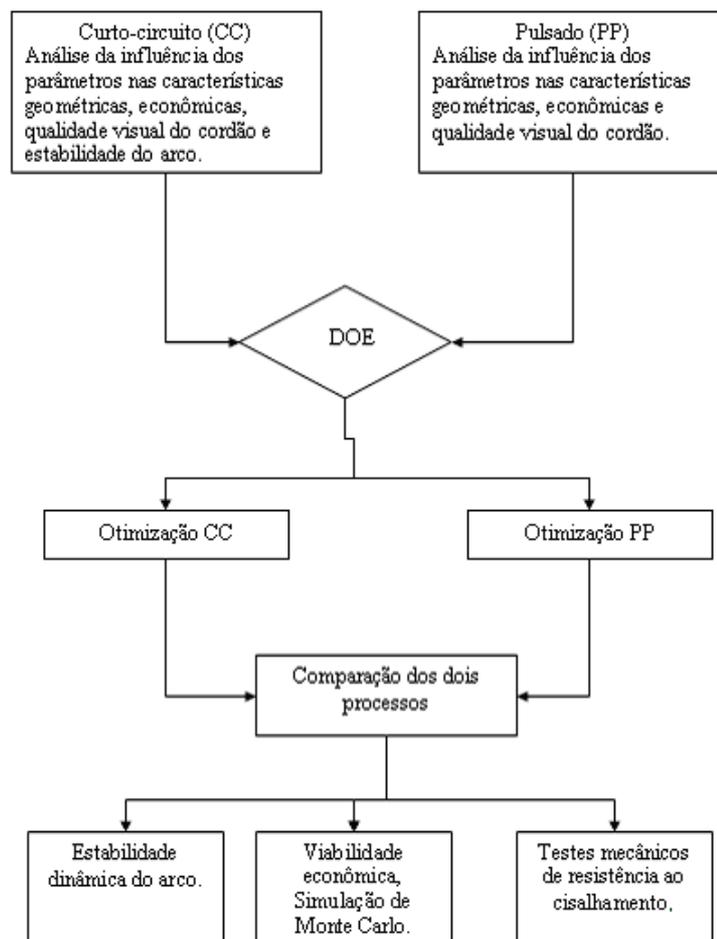


Figura 3.1 - Fluxograma do trabalho.

3.3 DESCRIÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS E MONTAGENS EXPERIMENTAIS

Todas as seqüências de testes foram realizadas utilizando o banco de ensaios do Laboratório de Soldagem da UNIFEI, cujo detalhamento é mostrado na Figura 3.1.

A fonte de soldagem utilizada foi uma fonte multiprocesso Inversal 300, com comando digital e funcionamento ajustado conforme o tipo de transferência a ser utilizado. A tocha de soldagem (1), que guia o eletrodo consumível e conduz a corrente elétrica e o gás de proteção para a área de trabalho foi acoplado a um dispositivo de controle de velocidade de movimentação na posição vertical (2), onde foi possível ajustar a velocidade de soldagem nos níveis desejados através da utilização de um comando manual (3). De frente a tocha foi adaptado um sistema para fixação dos corpos de prova (4), acoplado a um suporte para permitir a proteção da raiz da solda através da inserção de um gás inerte (Argônio). O comprimento do arame consumido em cada teste, bem como o tempo de soldagem, foi avaliado com o auxílio de um tacômetro acoplado a um medidor de velocidade do arame – MVA-1 (5). A vazão do gás de proteção, mantida constante durante a realização da soldagem, foi registrada no medidor de vazão (6). Para todos os testes utilizou-se um sistema de aquisição de dados (10), denominado OSCILOS4, para determinação das características dinâmicas de tensão, corrente e alimentação do arame com tempo de aquisição de 5 segundos (Figura 3.2). O tempo total de soldagem foi medido com um cronômetro.

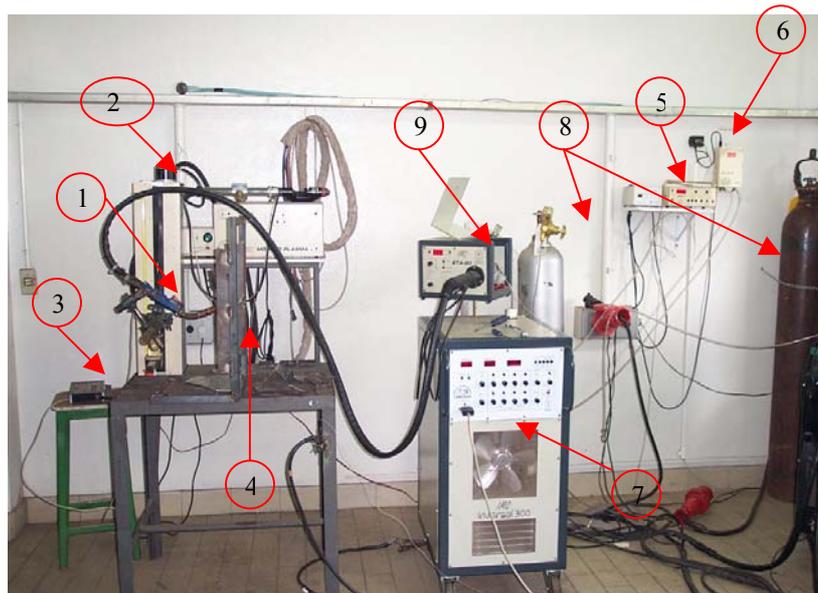


Figura 3.2 – Banco de ensaios – Laboratório de soldagem - UNIFEI.

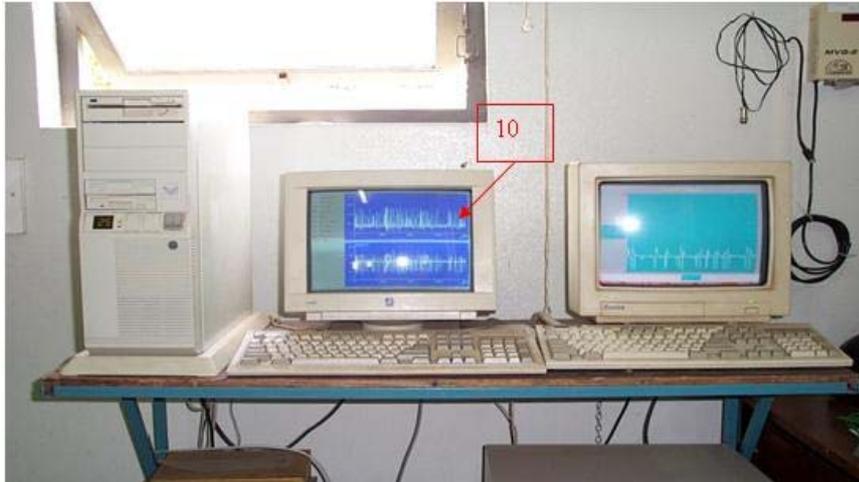


Figura 3.3 – Sistema de aquisição dos dados.

3.4 CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM

3.4.1 Arame Eletrodo e Material Base

Para a realização dos testes foi utilizado, neste trabalho, o arame tubular com proteção gasosa AWS E71T-1 (rutílico) com 1,2 mm de diâmetro, fabricado pela Hyndai. A composição química e propriedades mecânicas deste arame eletrodo (fornecidas pelo fabricante) são mostradas na Tabela 3.1. Como material base foi utilizada chapa de aço ABNT 1045 preparados nas dimensões de 100x 60x 6,35 mm, com chanfro em V.

Tabela 3.1-Composição química e propriedades mecânicas.

DADOS TÉCNICOS				
Composição Química %				
C – 0,03	Si – 0,55	Mn – 1,45	P – 0,013	S – 0,01
Propriedades Mecânicas				
L. R. (N/mm ²)	L. E. (N/mm ²)	Alongamento [%]	Charpy-V [J] 18° C	
580	525	29	72-104	

3.4.2 Gás de Proteção

Para o tipo de arame utilizado neste trabalho dois tipos de gases são recomendados pelo fabricante: dióxido de carbono (CO_2) e a mistura Argônio + 25% CO_2 (C25). Para a realização dos testes no modo de transferência por curto-circuito foi utilizado o gás CO_2 por ser um gás economicamente mais barato e por apresentar uma maior penetração conforme observado por Gomes (2005). No modo de transferência pulsada, foi utilizada a mistura C25 por melhor se adequar as condições de soldagem conforme observado por Oliveira (2005).

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.5.1 Ajuste das Condições Experimentais

Para o desenvolvimento do trabalho alguns ajustes foram feitos, com o objetivo de preparação da bancada e garantir a repetibilidade das condições de um ensaio para outro, além de permitir o adequado ajuste nas variáveis do processo.

Na 1ª etapa, procurou-se adequar a tocha para fazer a soldagem na posição vertical descendente. O ajuste da tocha de soldagem foi feito de acordo com o sugerido pela literatura (Wainer, 1992; Fortes, 2004), posicionando-a 15° positivo (soldar puxando) em relação ao plano perpendicular à superfície do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 3.4.

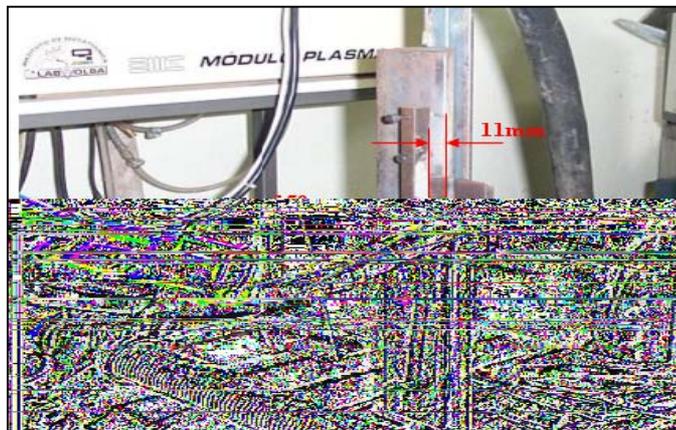


Figura 3.4 - Posicionamento da tocha.

Na 2ª etapa, foi feito o ajuste da distância bico de contato peça (DBCP), pois em função deste ajuste em relação à tocha de soldagem, alguns modos de transferências são favorecidos, conforme mostrado na Figura 3.5 (Wainer, 1992). Esta distância do bico de contato a peça (DBCP) foi fixada em 16 mm, em função de análises feitas por Gomes (2006) e Oliveira (2005). No modo de transferência por curto-circuito o bico de contato foi ajustado numa posição de faceamento com a tocha de soldagem (DBCP=11mm), ao passo que com o modo pulsado, houve um recuo do bico de contato de 5 mm em relação a tocha de soldagem. Estes ajustes foram feitos com o auxílio de um goniômetro e um paquímetro.

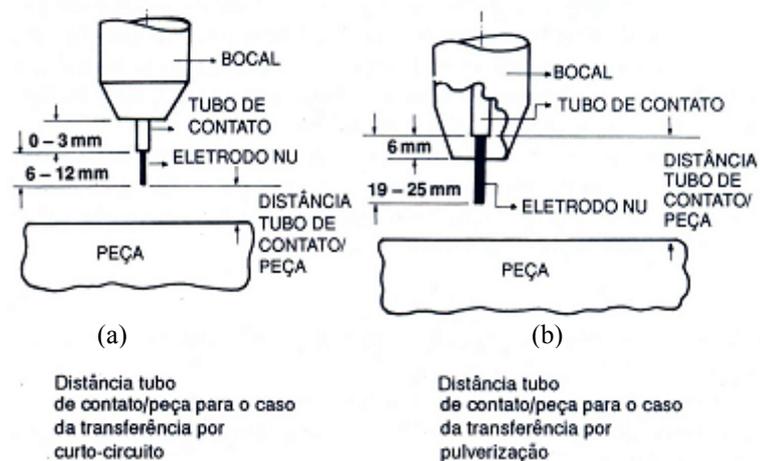


Figura 3.5-Ajuste do bico de contato peça (Wainer, 1992).

Na 3ª etapa, foi ajustado o chanfro do corpo de prova no intuito de chegar aos melhores resultados. Inicialmente foram realizados testes com juntas de topo utilizando um chanfro de 45°, um nariz de 2 mm e folga de 1mm. Os resultados não foram muito adequados devidos principalmente à falta de fusão e a falta de penetração nestes testes. Em seguida testaram-se juntas de topo com chanfro de 60°, nariz de 1 mm e folga de 1mm. Percebeu-se uma melhoria nos resultados, porém não o suficiente, pois observou-se defeitos na raiz da solda, como porosidades, falta de fusão. Assim foram realizados novos testes nas juntas de topo com um chanfro de 60°, com a mesma abertura de nariz 1 mm e folga de 1mm, porém com proteção de argônio por baixo do chanfro para proteger a região soldada do ar atmosférico para evitar a ocorrência de defeitos na raiz da solda, manteve a vazão do gás em 3l/min. Assim observaram-se melhoras significativas na solda, sendo este chanfro escolhido conforme a Figura 3.6.

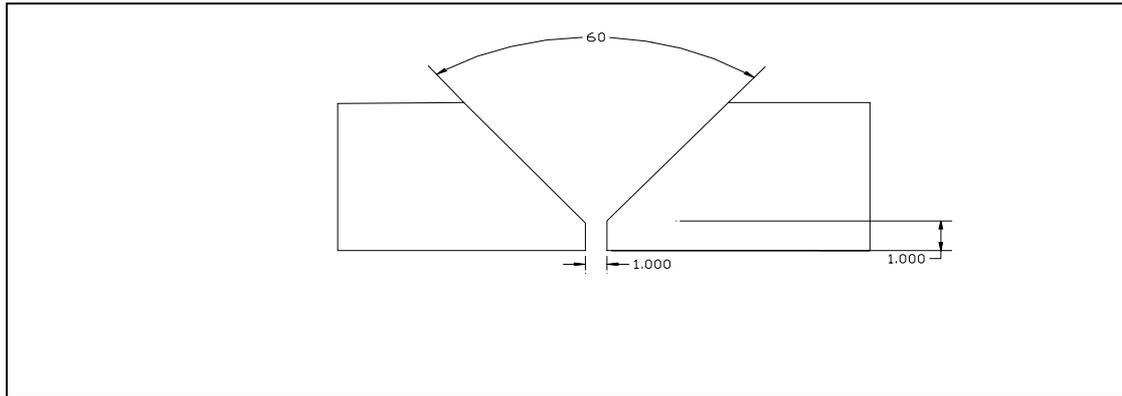


Figura 3.6-Dimensões do Chanfro dos Corpos de Prova.

3.5.2 Escolha dos Fatores de Controle e Respostas

Como afirmado anteriormente, a escolha dos fatores de controle e respostas a serem analisados recaiu na avaliação prévia dos trabalhos desenvolvidos por Gomes (2006) para o modo de transferência por curto-circuito e no trabalho de Oliveira (2005) para o modo pulsado. Para a transferência por curto-circuito em princípio se destacam a tensão, a velocidade de alimentação do arame e a indutância, ao passo que para o modo pulsado se destaca os parâmetros de pulso corrente de pico, tempo de pico, corrente de base e tempo de base. Baseado nestes estudos definiu-se para o presente trabalho a utilização do planejamento fatorial completo para o modo de transferência por curto-circuito e do planejamento fatorial fracionado para o modo pulsado, ambos os projetos com a utilização dos parâmetros regulados em dois níveis. Em função de ambos os trabalhos terem sido desenvolvidos para a posição plana, novos ajustes se fizeram necessários para adaptá-los a soldagem vertical descendente como será descrito a seguir.

3.5.3 Definição dos Níveis dos Fatores de Controle

Como são dois os modos de transferência a serem estudados, houve a necessidade de ajustes dos níveis dos fatores de controle para cada caso. Em função da dificuldade em se determinar os níveis dos fatores de controle para o estudo pretendido, uma série de testes preliminares foram desenvolvidos a partir de informações coletadas na literatura. A seguir as várias etapas destes testes serão descritas bem como as análises geradas pelas observações dos resultados obtidos para cada modo de transferência.

a) Transferência por Curto-Circuito

Para a definição dos parâmetros de controle e respectivos níveis de ajustes, foram utilizadas como ponto de partida as informações contidas no trabalho de Gomes (2006). Em função de este trabalho contemplar a posição de soldagem plana, alguns ajustes se fizeram necessários para sua adaptação na soldagem vertical descendente.

- Na 1ª etapa, procurou-se inicialmente estabelecer os níveis mínimo e máximo de tensão que conduzissem a uma boa formação de curtos-circuitos. Conforme afirmações de Gomes (2006), em seu trabalho, porém na posição plana, os valores de tensões entre 19 e 23 Volts, permitiram as melhores condições de ocorrência de curtos-circuitos. Desta forma ao se testar o nível de tensão de 18 Volts e velocidade de alimentação em 4m/min, para o arame AWS E71T-1, 1,2mm de diâmetro, percebeu-se poucas ocorrência de curtos associados a uma maior irregularidade de transferência. Para tensões de 19Volts, houve uma melhora significativa na ocorrência de curtos, sendo então fixado este valor como nível mínimo, a Figura 3.7 mostra o oscilograma da corrente e tensão a qual confirma a ocorrência de curtos. Com tensão maior que 23 Volts e velocidades de alimentação de 4m/min não houve ocorrência de transferência metálica no modo curto-circuito.

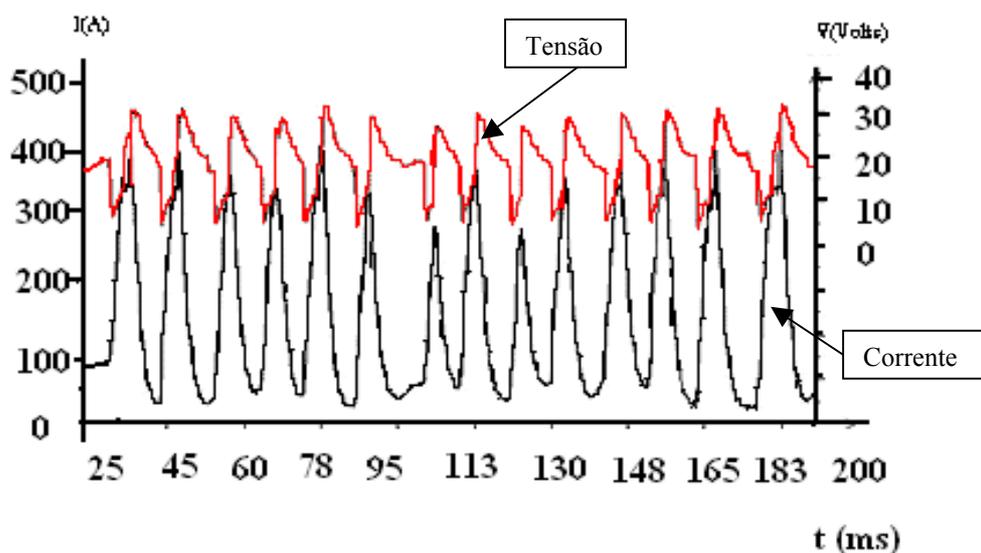


Figura 3.7-Oscilograma da tensão e corrente (gás= CO₂, V= 19 Volts, va=3m/min,Ind= 2),(Software MIGMAG).

- Na 2^a etapa, procurou-se definir o tipo de gás para a transferência por curto-circuito conforme observado por Gomes (2006) e definido no capítulo 2, assim utilizou o gás CO₂.
- Na 3^a etapa, procurou determinar os níveis mínimos e máximos para a velocidade de alimentação do arame, que levavam a uma transferência estável por curto-circuito. Percebeu-se que velocidades abaixo de 3m/min, não conseguiam grandes sucessos com a soldagem e que velocidades acima de 5m/min o arco se desestabilizava. Sendo assim foram fixados os valores de velocidades em 3m/min e 4m/min.
- Para a 4^a etapa, procurou se adequar os valores da velocidade de soldagem. Sendo assim foram realizados alguns testes exploratórios variando a velocidade em 25, 30 e 35 cm/min. Percebeu-se que com a velocidade de 25 cm/min, o material fundido escorria e o arco desestabilizava o mesmo ocorrendo com a velocidade de 30 cm/min. Aumentando a velocidade de soldagem para 35 cm/min, o arco estabilizou, assim foi possível realizar o teste. Fixando a velocidade de soldagem em 35cm/min para o modo por curto-circuito.
- Para a 5^a etapa, procurou-se definir os níveis de regulagem da indutância de (0 a 10). Baseou-se nos trabalhos de Miranda (1998), Kobayashi (2005) e Gomes (2006) optou-se por ajustar os níveis de indutância em 2 e 9, os quais permitem uma análise mais abrangente da influência desta importante característica no modo de transferência por curto-circuito.

b) Transferência Pulsada

Para a definição dos parâmetros de controle e respectivos níveis de ajustes, foram utilizadas, como ponto de partida, as informações contidas no trabalho de Oliveira (2005). Para este modo de soldagem, optou-se por trabalhar com a imposição de corrente, sendo necessários os ajustes dos parâmetros de pulso (I_p , I_b , t_p e t_b). Além disso, procurou-se garantir que todas as soldagens fossem executadas com um nível de tensão fixa, sendo a

alimentação do arame auto-ajustada. Em função do trabalho desenvolvido por Oliveira (2005) contemplar a posição de soldagem plana, alguns ajustes se fizeram necessários para sua adaptação na soldagem vertical descendente. Desta forma, para o ajuste dos parâmetros, as seguintes etapas foram desenvolvidas.

- Para a 1^a etapa, procurou-se definir o nível de tensão a ser utilizado. Após realizar os testes preliminares variando a tensão em 23 e 25 Volt, percebeu-se que com a tensão de 25 Volts o arco se desestabilizava, ao passo que com a tensão em 23 Volts houve uma melhor condição de soldagem no que concerne a estabilidade do arco e o aspecto do cordão.
- Para a 2^a etapa ajustou-se a velocidade de soldagem. Para isto realizaram-se testes exploratórios variando a velocidade em 30, 35, 45 e 50 cm/min. Percebeu-se que a utilização de velocidades inferiores a 40 cm/min acontecia o escorrimento de material e velocidades acima de 45 cm/min não havia uma boa deposição de material. Desta forma optou-se então em trabalhar com a velocidade de soldagem em 45 cm/min.
- Na 3^a etapa definiu-se o tipo de gás. Baseado no trabalho de Oliveira (2005) a mistura C25 foi utilizada por se conseguir melhores resultados comparativamente ao CO₂.
- Para a 4^a etapa, procurou-se estabelecer os parâmetros de pulso, sendo que esta escolha recaiu para as condições utilizadas por Oliveira (2005), ou seja, $I_p=280$ A, $I_b=100$ A, $CA=40\%$, $v_a=6$ m/min. Onde CA= Ciclo ativo.

Concluídos as etapas dos testes exploratórios, as Tabelas 3.2 e 3.3 resumem todos os fatores de controle e seus níveis empregados no ensaio final nos modos de soldagem por curto-circuito e pulsados respectivamente.

Tabela 3.2-Condições finais para o modo de soldagem por curto-circuito.

Fatores Fixos			
Ângulo da tocha: 15° positivo		DBCP: 11mm	
Tipo de Gás: CO ₂		Vazão de Gás : 14 l/min	
Polaridade CC ⁺			
Velocidade de Soldagem: 35 cm/min.			
Fatores de análise (Variáveis)			
		Valor Mínimo (-)	Valor Máximo (+)
Tensão(V)	Volts	19	22
Velocidade de Alimentação (va)	m/min	3	4
Indutância (Ind)		2	9

Tabela 3.3-Condições finais para o modo de soldagem pulsada.

Fatores Fixos			
Ângulo da tocha: 15° positivo		DBCP: 11mm	
Tipo de Gás: C25 (75% Ar +25% CO ₂)		Recuo do bico : 5mm	
Vazão de Gás: 14 l/min		Tensão: 23 Volts	
Velocidade de Soldagem: 45 cm/min		Polaridade CC ⁺	
Fatores de análise (Variáveis)			
		Valor Mínimo (-)	Valor Máximo (+)
Corrente de pico (Ip)	A	300	350
Tempo de pico (tp)	ms	2	3
Corrente de base (Ib)	A	50	80
Tempo de base (tb)	ms	4	8

3.6 DELINEAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros nas respostas selecionadas foi utilizada a técnica estatística do Projeto e Análise de Experimentos (DOE). Para o modo por curto-circuito foi utilizado o projeto fatorial completo (2^3) com quatro pontos centrais e uma replicação, totalizando vinte experimentos. Para o modo pulsado utilizou-se o projeto fatorial fracionário (2^{4-1}) com dois pontos centrais e uma replicação, gerando dezoito experimentos. As Tabelas 3.4 e 3.5 apresentam o delineamento dos experimentos gerados pelo software comercial MINITAB-14.

Tabela 3.4-Sequência dos experimentos para o modo Curto-Circuito.

Testes	V	va	Ind.
-	(Volts)	(m/min)	-
01	19	3	2
02	22	3	2
03	19	4	2
04	22	4	2
05	19	3	9
06	22	3	9
07	19	4	9
08	22	4	9
09	19	3	2
10	22	3	2
11	19	4	2
12	22	4	2
13	19	3	9
14	22	3	9
15	19	4	9
16	22	4	9
17	20,5	3,5	5,5
18	20,5	3,5	5,5
19	20,5	3,5	5,5
20	20,5	3,5	5,5

Tabela 3.5-Sequência de experimentos para o modo pulsado.

Testes	Ip	tp	Ib	tb
-	(A)	(ms)	(A)	(ms)
01	300	2	50	4
02	350	2	50	8
03	300	3	50	8
04	350	3	50	4
05	300	2	80	8
06	350	2	80	4
07	300	3	80	4
08	350	3	80	8
09	300	2	50	4
10	350	2	50	8
11	300	3	50	8
12	350	3	50	4
13	300	2	80	8
14	350	2	80	4
15	300	3	80	4
16	350	3	80	8
17	325	2,5	65	6
18	325	2,5	65	6

Durante execução dos experimentos, os dados relativos à soldagem foram aqisitados para que posteriormente fossem avaliados. Desta forma utilizou-se o software de aquisição OSCILOS 4, com tempo de aquisição de 5 segundos, para caracterização do comportamento dinâmico da tensão e corrente. Posteriormente estes dados foram processados através de um software específico (MIGMAG) para que os dados relativos ao comportamento do arco (ocorrência de curtos-circuitos, taxa de variação de corrente, picos de correntes, histogramas, entre outros) pudessem ser avaliados.

Após a realização dos testes foram avaliadas as respostas. Posteriormente procurou-se, para cada modo de transferência a condição otimizada, utilizou a ferramenta “Response Optimizer” e a partir destas condições foram novamente realizados testes para, inicialmente,

confirmar os resultados previstos e, posteriormente, comparar sob o ponto de vista econômico e de propriedades mecânicas geradas.

3.7 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS

Em função do objetivo do trabalho nesta primeira fase ser de encontrar condições que permitam auferir a maior estabilidade nos diferentes modos de transferências e considerando que cada modo de transferência tem suas particularidades, as respostas analisadas neste trabalho durante esta fase foram diferentes para cada modo. Considerando o modo de transferência por curto-circuito, as respostas para o presente trabalho foram definidas como sendo aquelas características associadas ao comportamento do arco como a estabilidade e regularidade de ocorrência de curtos-circuitos, bem como as associadas às características geométricas e econômicas dos cordões. No modo pulsado as respostas para avaliar o processo foram àquelas associadas aos aspectos geométricos e econômicos do cordão.

3.7.1 Avaliação da Estabilidade do Arco Elétrico e Regularidade da Ocorrência de Curtos-Circuitos

Em função dos dados aqisitados pelo software Oscilos 4 e, posteriormente processados pelo software MIGMAG determinou-se para cada ensaio os índices relativos à estabilidade do arco elétrico e a regularidade de ocorrência de curtos-circuitos, conforme análise utilizada por Gomes (2006). Estes índices foram os seguintes:

- Tempo de curto-circuito- tcc (ms) e seu desvio padrão - $stcc$ (ms)
- Período médio de curto-circuito - T (ms) e seu desvio padrão - sT (ms)
- Tempo total de curto (Tc); foi determinado conforme a equação.

$$Tc = \frac{\sum tcc}{TT} \times 100(\%) \quad (3.1)$$

Onde tcc = tempo de curto-circuito,

TT = Tempo total de curto.

Basicamente as análises das respostas se concentraram no desvio padrão das respostas, já que este índice representa a dispersão em relação ao valor médio. Desta forma a minimização destes índices (desvio padrão) permite em tese obter a melhor condição de estabilidade de curto-circuito conforme afirmado por Baixo & Dutra (1990) associado a um maior tempo total de curto (Adolfson, 1999).

3.7.2 Características Geométricas e Econômicas

Para determinar as características geométricas e econômicas dos ensaios inicialmente todos os corpos de prova foram pesados antes da soldagem. Após a soldagem houve a remoção da escória e respingos e pesagem novamente. Em seguir foi avaliada a qualidade visual do cordão, atribuindo notas de 0 a 10, considerando para isto critérios relativos a aparência do cordão, regularidade e formato do cordão. Logo após os corpos de prova foram seccionados, lixados e polidos e atacados com nital 4%. Posteriormente através de um projetor de perfil com aumento de 20x, foram fotografados (digital) e transferidos para o Autocad (versão 2004). Através da utilização de funções adequadas foi possível calcular a área total adicionada do cordão de solda (S_t), bem como as penetrações geradas, conforme mostra o esquema da Figura 3.8. A partir destes dados determinaram-se as características econômicas do cordão conforme as equações abaixo.

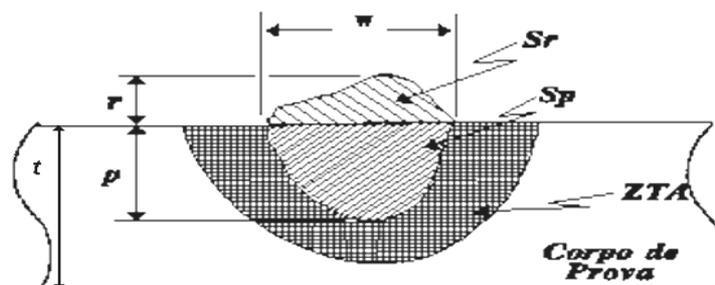


Figura 3.8- Características Geométricas do cordão.

➤ Características Geométricas;

- Área total adicionada;

$$S_t = S_r + S_p (\text{mm}^2) \quad (3.2)$$

➤ Características Econômicas;

- Taxa de Deposição;

$$TD = 3,6 * \frac{(m_f - m_i)}{t} \text{ (kg/h)} \quad (3.3)$$

Onde, m_f – massa do corpo de prova após soldagem (g);

m_i – massa do corpo de prova antes da soldagem (g);

t – tempo de soldagem (s)

- Taxa de Fusão;

$$TF = \frac{3,6 * \rho a. * L}{t} \text{ (kg/h)} \quad (3.4)$$

Onde, ρa – densidade linear do arame (7,25 g/m);

L – comprimento do arame (mm).

- Rendimento;

$$R = \frac{TD}{TF} * 100 \text{ (\%)} \quad (3.5)$$

3.8 ENSAIOS MECÂNICOS

Nesta parte do trabalho, através das condições otimizadas para cada modo de transferência, foram realizadas as soldagens em chapas sobrepostas, cujas dimensões estão mostradas na Figura 3.9, para posteriores execuções dos testes de cisalhamento dos corpos de prova produzidos nas condições estabelecidas pela Tabela 3.6.

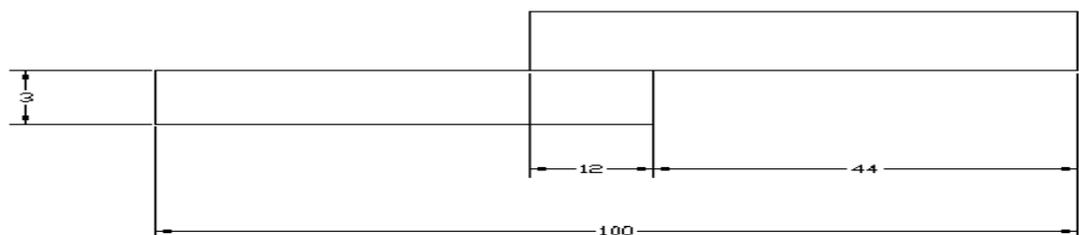


Figura 3.9-Dimensões dos Corpos de Prova – Junta Sobreposta.

Tabela 3.6-Condições otimizadas dos testes para ensaios de cisalhamento.

Testes	V	va	Ind	Ip	tp	Ib	tb	Modo
-	Volts	m/min	-	A	ms	A	ms	-
1	20,5	3,5	5,5	-	-	-	-	CC
2	-	-	-	300	2	80	4	PP

Após a soldagem os corpos de prova foram cortados conforme o código ASME IX, mostrado na Figura 3.10 abaixo e posteriormente, foram levados ao laboratório de ensaios destrutivos da UNIFEI, onde os mesmos foram cisalhados, na máquina de tração até a ruptura.

A resistência ao cisalhamento foi calculada dividindo-se a carga de ruptura pela área da menor seção transversal do corpo de prova, medida antes de aplicar a carga, conforme as equações 3.6, já o alongamento foi calculado conforme a equação (3.7).

$$\tau = \frac{F}{S_t} \quad (3.6)$$

$$\Delta l = \frac{\sigma l_0}{E} \quad (3.7)$$

Onde: τ = tensão cisalhante, kgf/mm²;

E = módulo de elasticidade do aço= 2,1 x 10⁴kgf/mm²;

Δl = alongamento, mm;

l_0 = comprimento inicial, mm;

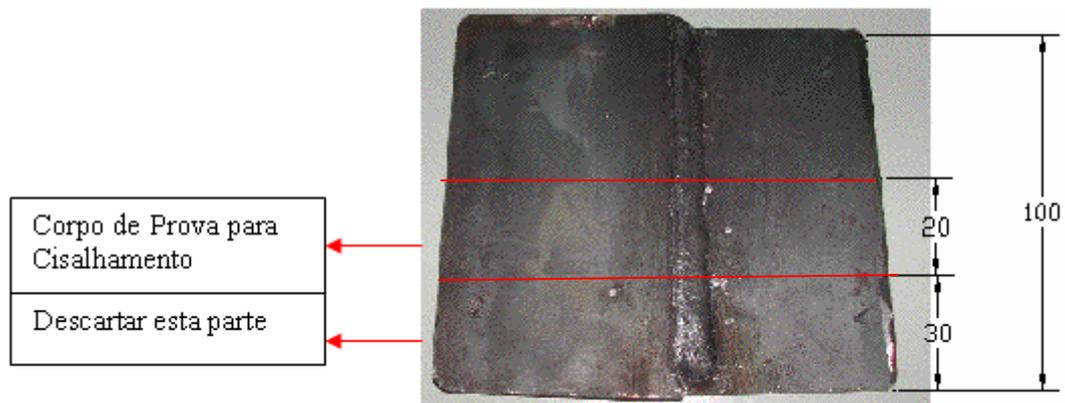


Figura 3.10-Critério para retirada de Corpo de prova para o teste de cisalhamento-Código ASME IX.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão exibidas e discutidas as respostas obtidas a partir dos ensaios realizados. A análise dos resultados será abordada em três agrupamentos de resultados, sendo este capítulo dividido em três partes. Na primeira parte, foram analisados os resultados sobre a influência dos parâmetros de soldagem no processo Eletrodo Tubular aplicado à posição vertical descendente, utilizando o modo de transferência por curto-circuito e na segunda parte, os resultados do modo pulsado nas mesmas condições. Feitas as análises, as condições otimizadas para cada modo foram estabelecidas. A partir destas condições foi analisado o aspecto econômico associado às soldagens, nos dois modos de transferências. Em seguida através da utilização da Simulação de Monte Carlo foi estabelecida a variabilidade do custo para os dois modos de transferência. Finalmente na terceira parte são discutidos os resultados obtidos para os testes mecânicos em amostras produzidas com os dois modos de

transferências, objetivando observar a resistência mecânica dos cordões de soldas obtidos sob diferentes condições de soldagem.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os valores das respostas medidas e calculadas estão apresentados na Tabela 4.1 para o modo de transferência por curto-circuito e na Tabela 4.2 para o modo pulsado.

Tabela 4.1-Sequência e resultados dos experimentos para o modo curto-circuito.

Fatores				Respostas					
Testes	V	va	Ind	S _t	TD	Q	Tc	sT	sttc
-	Volts	m/min	-	mm ²	kg/h	-	%	ms	ms
1	19,0	3,0	2,0	7,96	1,11	3,0	12,60	20,9	2,50
2	22,0	3,0	2,0	12,68	1,03	3,0	3,26	77,9	1,90
3	19,0	4,0	2,0	15,99	1,57	4,0	23,96	8,9	2,20
4	22,0	4,0	2,0	18,67	1,48	4,0	6,42	26,4	1,70
5	19,0	3,0	9,0	11,65	1,13	3,3	13,10	34,9	3,40
6	22,0	3,0	9,0	12,27	1,10	4,7	4,02	65,8	4,10
7	19,0	4,0	9,0	14,53	1,62	4,3	22,40	18,1	8,60
8	22,0	4,0	9,0	16,78	1,56	3,7	11,52	26,4	5,60
9	19,0	3,0	2,0	9,62	1,08	4,7	13,92	18,6	2,60
10	22,0	3,0	2,0	8,56	1,12	4,3	3,82	75	1,70
11	19,0	4,0	2,0	12,19	1,50	4,0	24,00	71	2,70
12	22,0	4,0	2,0	13,87	1,37	4,3	5,62	22,42	1,40
13	19,0	3,0	9,0	10,19	1,17	4,3	9,50	43,7	5,40
14	22,0	3,0	9,0	11,24	1,11	6,7	4,00	68,6	4,20
15	19,0	4,0	9,0	12,89	1,58	5,3	24,90	16,3	8,80
16	22,0	4,0	9,0	12,91	1,46	6,7	7,74	38,4	3,30
17	20,5	3,5	5,5	13,35	1,38	5,7	10,12	28,95	4,70
18	20,5	3,5	5,5	14,17	1,32	5,7	10,56	38,6	4,10
19	20,5	3,5	5,5	12,36	1,11	5,4	12,94	40,6	5,10
20	20,5	3,5	5,5	10,10	1,03	6,0	8,38	41,6	3,80

Lembrando que: S_t = Área total adicionada; TD= Taxa de deposição; Tc= Tempo total de curto-circuito; sT=Desvio do período de curto;sttc=Desvio do tempo total de curto-circuito; rendimento.

Tabela 4.2-Sequência e resultados dos experimentos para o modo pulsado.

Fatores					Respostas			
Testes	Ip	tp	Ib	tb	S_t	TD	Q	R
-	A	ms	A	ms	mm ^s	kg/h	-	%
1	300	2	50	4	22,6	0,9	6	54,6
2	350	2	50	8	0	1,0	2	72,5
3	300	3	50	8	5,4	1,1	3	66,6
4	350	3	50	4	9,7	2,8	8	97,0
5	300	2	80	8	13,2	1,7	5,5	98,3
6	350	2	80	4	13,5	1,5	9	61,9
7	300	3	80	4	17,3	2,6	9	95,9
8	350	3	80	8	16,3	1,4	8	78,2
9	300	2	50	4	16,6	1,5	5	77,5
10	350	2	50	8	0	1,1	2	65,8
11	300	3	50	8	12,8	1,7	2	88,7
12	350	3	50	4	12,9	3,0	9	98,8
13	300	2	80	8	12,6	1,7	5	98,3
14	350	2	80	4	21,5	1,3	9	52,2
15	300	3	80	4	14,3	2,2	9	82,8
16	350	3	80	8	20,4	1,8	9	79,6
17	325	2,5	65	6	15,4	2,0	6	95,1
18	325	2,5	65	6	12,1	2,1	7	99,2

4.2.1 Análise de Variância

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores empregados sobre as respostas observadas, estas foram submetidas à análise de variância - ANOVA. Neste trabalho, considerou como critério de análise que um determinado fator de controle afetou

estatisticamente uma resposta, quando o nível α obtido for inferior a 5%, ou seja, uma confiabilidade estatística de 95%.

As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram, respectivamente, os valores do nível α para as respostas referentes aos parâmetros estudados e interações entre parâmetros para os modos de transferência por curto-circuito e pulsado. Os números em negrito, nestas tabelas, indicam que os valores médios das respostas foram afetados estatisticamente pelos fatores de controle com 95% de confiabilidade.

Tabela 4.3-Resultado da análise de variância – Modo por Curto-Circuito.

Fatores	Respostas					
-	S_t	TD	Q	Tc	sT	sttc
V	0,162	0,800	0,106	0,000	0,000	0,005
va	0,001	0,000	0,281	0,000	0,000	0,035
Ind	0,722	0,267	0,021	0,577	0,020	0,000
V*va	0,874	1,000	0,868	0,000	0,016	0,039
V*Ind	0,620	0,383	0,096	0,064	0,494	0,137
va*Ind	0,231	0,899	0,700	0,153	0,942	0,017

Tabela 4.4-Resultado da análise de variância – Modo Pulsado.

Fatores	Respostas			
-	S_t	TD	Q	R
Ip	0,160	0,631	0,042	0,134
tp	0,514	0,000	0,042	0,013
Ib	0,005	0,303	0,000	0,477
tb	0,006	0,002	0,000	0,452
Ip*tp	0,016	0,048	0,042	0,022
Ip*Ib	0,005	0,001	1,000	0,002
Ip*tb	0,670	0,048	1,000	0,147

Da Tabela 4.3, verifica-se que no modo de transferência por curto-circuito, à área total adicionada (S_t) foi influenciada pela velocidade de alimentação (va), ou seja, quanto maior a velocidade de alimentação do arame, maior será a energia imposta, conseqüentemente maior a área adicionada. A qualidade visual do cordão de solda (Q) foi influenciada pela indutância,

ou seja, quanto maior a indutância menor a quantidade de respingos, conseqüentemente um cordão de melhor qualidade visual. A taxa de deposição (TD) foi influenciada pela velocidade de alimentação (v_a), devido a maior quantidade de calor imposta, mais material será depositado. Com relação às respostas associadas ao comportamento do arco observa-se que o tempo total de curto (T_c) foi influenciado, em ordem de significância, pela tensão (V), velocidade de alimentação (v_a) e interação da tensão pela velocidade de alimentação ($V*v_a$), ou seja, quanto maior a tensão, maior o comprimento livre do arame, mais difícil a estabilidade do arco. O desvio do tempo total de curto (sttc) foi influenciado, em ordem de significância, pela indutância (Ind), tensão (V), interação da velocidade de alimentação com a indutância (v_a*Ind), velocidade de alimentação (v_a), e por último pela interação da tensão com a velocidade de alimentação ($V*v_a$). Quanto maior a indutância menor o número de respingos, porém o arco se torna menos estável. Com relação ao desvio do período do tempo de curto (sT), pela ordem de significância os fatores mais influentes foram a tensão (V) e a velocidade de alimentação (v_a) que tem a mesma significância, seguida pela indutância e por último pela interação da tensão e velocidade de alimentação ($V*v_a$).

Analisando a Tabela 4.4 verifica-se que no modo de transferência pulsado a qualidade do cordão foi influenciada, em ordem de significância, pela corrente de base (I_b), pelo tempo de base (t_b), que apresentam a mesma influência, seguido pela corrente de pico (I_p), pelo tempo de pico (t_p), pela interação da corrente de pico pelo tempo de pico (I_p*t_p) que apresentam a mesma influência. O rendimento foi influenciado primeiramente pela interação da corrente de pico com a corrente de base (I_p*I_b), seguido pelo tempo de pico (t_p) e pela interação (I_p*t_p), que são responsáveis pelo destacamento da gota. A taxa de deposição (TD) é influenciada, em ordem de significância, pelo tempo de pico (t_p) seguido pela interação da corrente de pico e a corrente de base (I_p*I_b), pelo tempo de base (t_b) e pelas interações da corrente de pico pelo tempo de pico (I_p*t_p) e da corrente de pico pelo tempo de base (I_p*t_b) que têm a mesma influência. A área total (S_i) foi influenciada, em ordem de significância, primeiramente pela corrente de base (I_b) e pela interação da corrente de pico pela corrente de base (I_p*I_b) que apresentam a mesma influência, seguido pelo tempo de base (t_b), e pela interação da corrente de pico pelo tempo de pico (I_p*t_p). Assim quanto maior a corrente de pico, maior será energia, conseqüentemente maior será área adicionada, ou seja, mais produtivo será o processo de soldagem.

Tabela 4.5-Diretrizes estabelecidas para as análises dos resultados

Condições Analisadas	Respostas	Condição desejável	Consequência
Estabilidade do Arco	Tempo total de curto-circuito -Tc	Maior Melhor	Aumenta o rendimento da soldagem e a estabilidade do arco.
	Desvio do período de curto-circuito-sT	Menor Melhor	Melhora a estabilidade nas transferências.
	Desvio do tempo total de curto-circuito -sttc	Menor Melhor	Permite melhor estabilidade na ocorrência de curto-circuito.
Geométricas	Área total adicionada -S _t	Maior Melhor	Aumenta a produtividade.
Econômicas	Rendimento-R	Maior Melhor	Aumenta a produtividade.
	Taxa de deposição - TD	Maior Melhor	Aumenta a produtividade.
Visual	Qualidade - Q	Maior Melhor	Boa aparência no cordão de solda.

A Tabela 4.5 mostra as diretrizes estabelecidas para analisar os resultados de cada experimento para os dois modos de transferência por curto-circuito e pulsado. Definido a condição analisada para cada modo de transferência metálica, assim como as respostas pretendidas, e conhecendo as condições desejáveis e suas consequências, pode se com isto conhecer cada vez mais o processo de soldagem.

4.2.2 Modo por Curto-Circuito - Análise da Influência dos Parâmetros na Estabilidade do Arco

(a) Análise do Tempo Total de Curto-Circuito (Tc)

O tempo total de curto-circuito é uma resposta muito importante para o processo, ou seja, se o tempo total de curto-circuito for maior, ele aumenta o rendimento do processo, ou seja, mais material é transferido para a peça, além de melhorar a estabilidade do arco (Adolfson, 1999). Desta forma o objetivo principal é maximizar o tempo total de curto-circuito.

A Figura 4.1 apresenta o gráfico dos efeitos principais dos fatores no tempo total de curto-circuito. Observando esta figura nota-se que a condição de maximização do tempo total de curto-circuito pode ser obtida utilizando-se uma tensão no seu valor mínimo (19V), associado a uma velocidade de alimentação no seu valor máximo (4m/min). Apesar da indutância não ser significativa na resposta, foi mantida no seu valor mínimo (2), pois

aparentemente melhorou a estabilidade do arco. Tais resultados são confirmados pela análise da interação significativa da tensão e velocidade de alimentação, Figura 4.2.

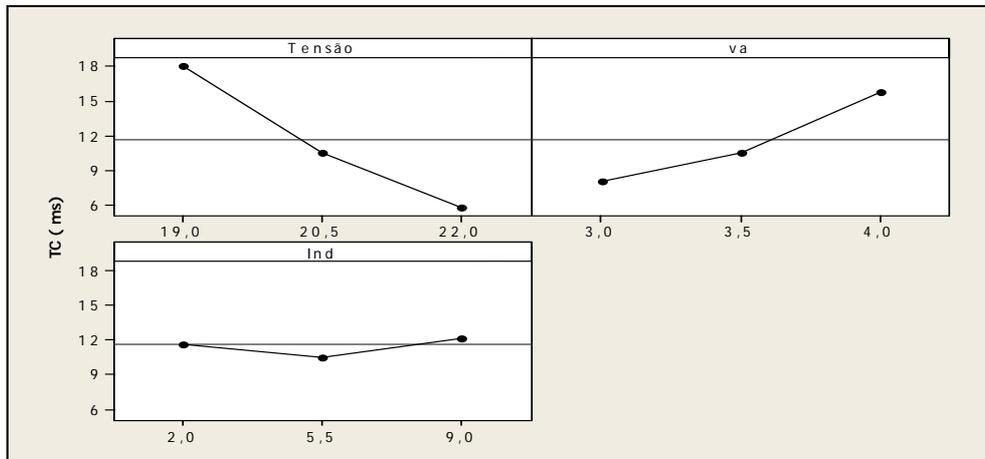


Figura 4.1-Efeito dos fatores no tempo total de curto para o modo de transferência por curto-circuito.

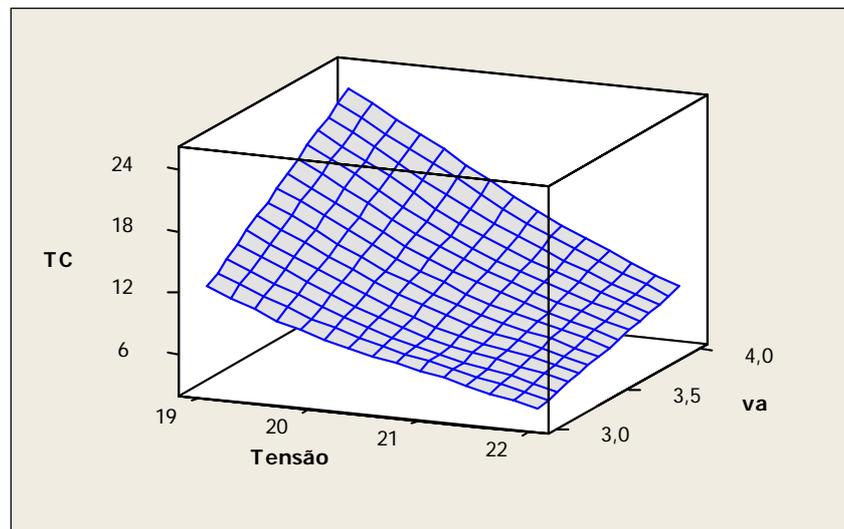


Figura 4.2-Efeito da interação da V*va sobre o tempo total de curto-circuito.

(b) Análise do Desvio do Período de Duração do Curto-Circuito (sT)

O desvio do período de transferência está relacionado diretamente com a regularidade do processo e, portanto, com a uniformidade de deposição (Baixo & Dutra, 1990). Desta forma um mínimo desvio do período de duração conduz a uma melhor estabilidade da solda e, provavelmente uma menor formação de salpicos resultando em qualidades superiores da solda. Analisando os efeitos principais dos fatores, Figura 4.3, a utilização da tensão no seu valor mínimo (19 V), associado a uma velocidade de alimentação no seu valor máximo (4m/min) e indutância no seu valor mínimo melhoram a regularidade do período de curto-

circuito. A interação significativa da tensão com a velocidade de alimentação do arame, Figura 4.4 confirma estes resultados.

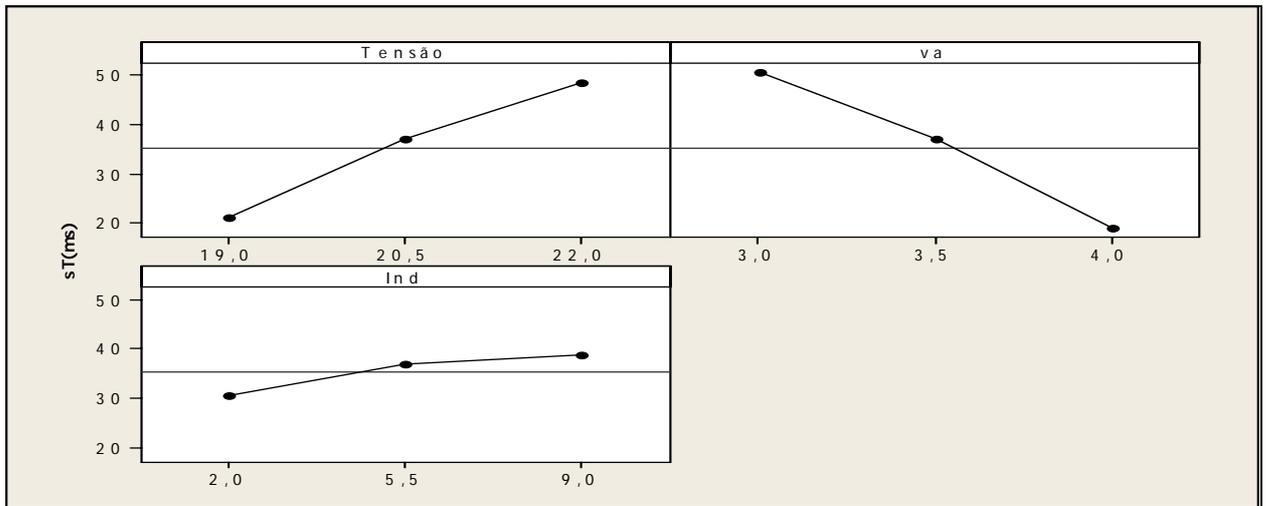


Figura 4.3-Efeito dos fatores sobre o desvio do período (sT).

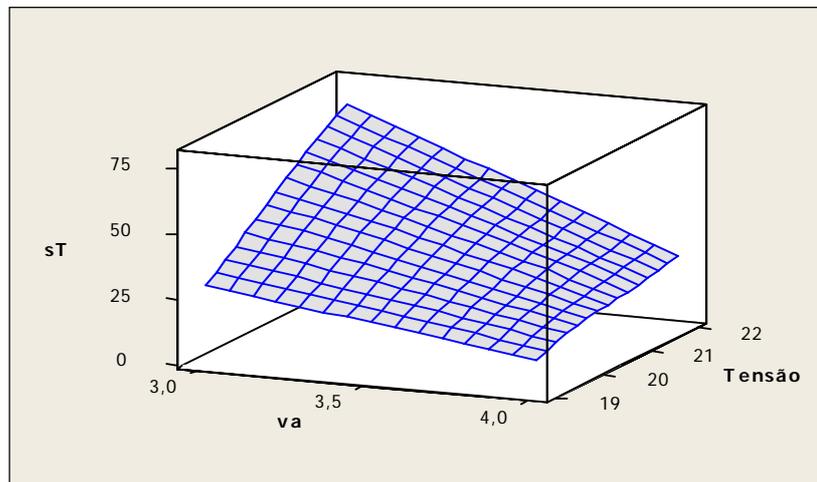


Figura 4.4-Influência da interação (V*va) sobre o desvio do período de curto (sT).

(c) Análise do Desvio do Tempo de Curto-Circuito (sttc)

O desvio do tempo de curto-circuito é uma resposta muito importante para o processo, já que permite detectar irregularidades nos ciclos de transferência (Baixo e Dutra, 1990). Desta forma, maiores desvios do tempo de curto-circuito implicam alterações bruscas da corrente de curto provocando produção de salpicos.

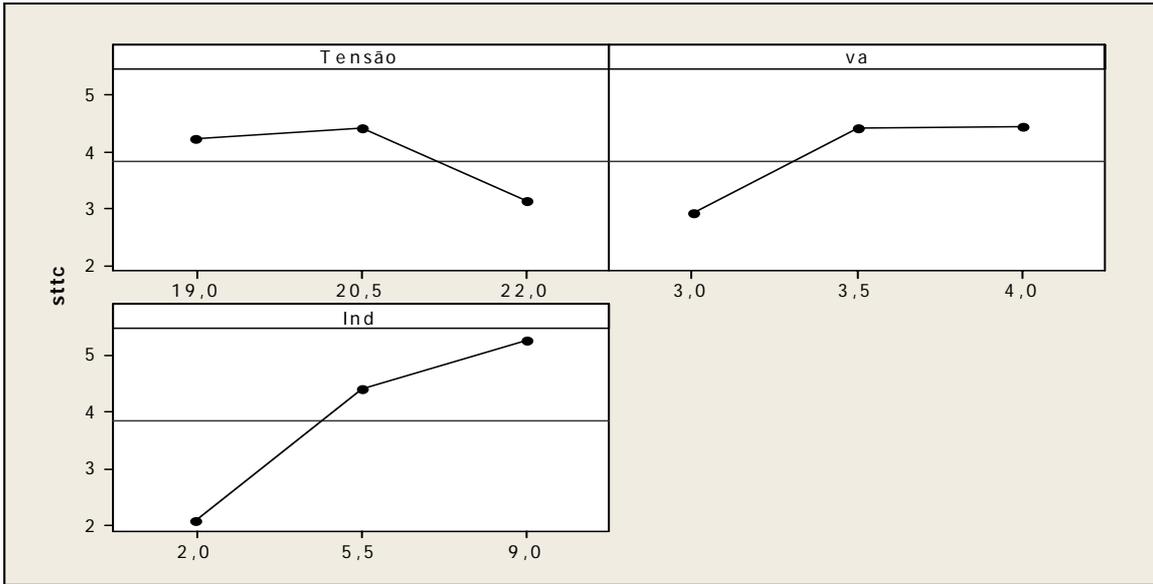


Figura 4.5-Efeito dos fatores sobre o desvio dos tempos de curto-circuito (sttc).

Considerando a ordem de significância dos fatores conjuntamente com seus efeitos principais, observa-se que a utilização de uma indutância em seu nível inferior associado a tensão em seu nível máximo (22V) conduziram a minimização desta resposta, conforme mostrado na Figura 4.5. Ao se considerar a interação significativa da indutância com a velocidade de alimentação do arame, Figura 4.6, percebe-se que ao utilizar a indutância no seu nível mínimo a minimização do desvio do tempo de curto pode ser obtido com a minimização da velocidade de alimentação do arame (3 m/min). O efeito principal de va e da interação V*va não foi considerado em função de seus efeitos serem significativamente inferiores aos anteriores.

Considerando todos os aspectos anteriormente analisados, quer seja através da influência dos efeitos principais dos fatores ou de suas interações, provavelmente a condição que conduz a uma melhor estabilização do arco é alcançada com uma tensão e indutância mantida em seus níveis mínimos (-), associado a uma velocidade de alimentação no seu valor máximo (+). Assim uma baixa tensão associada a uma baixa indutância conduz a uma boa estabilidade do arco, e quanto maior a velocidade de alimentação maior será a energia, mais produtivo será o processo. A melhor condição de estabilização ao arco no modo pulsado é alcançada quando se tem a condição de uma gota por pulso, de certa forma foi tentado, porém sem um aparato mais específico (como filmagem de alta resolução), não foi possível determinar com precisão.

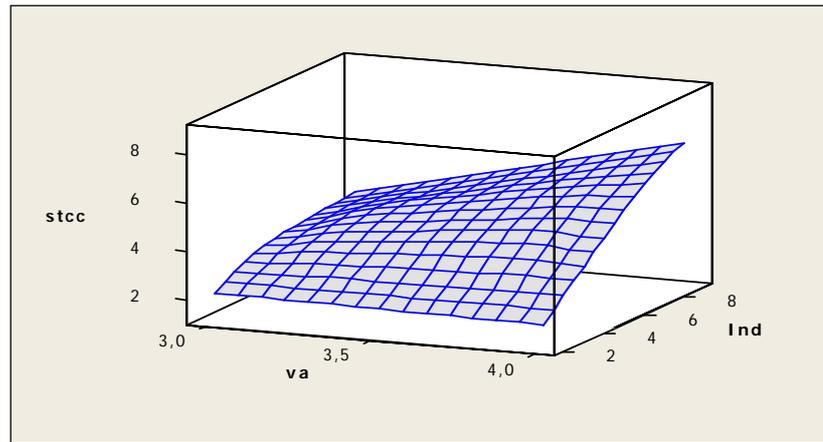


Figura 4.6-Influência da interação $va*Ind$, sobre o desvio dos tempos de curto-circuito.

4.2.3 Análise da Influência dos Parâmetros na Produtividade nos Modos por Curto-Circuito e Pulsado

(a) Análise do Rendimento da Solda (R) e a Taxa de Deposição (TD)

O rendimento e a taxa de deposição são características importantes para avaliar o desempenho de um processo de soldagem, pois os mesmos influenciam diretamente na produtividade da soldagem. As perdas decorrentes da formação de respingos ou escórias são os fatores que, geralmente, levam o rendimento e a taxa de deposição ao decréscimo. Observando os efeitos principais e de interação, quando soldado no modo pulsado, representados nas Figuras 4.7, 4.8 (a) e (b), nota-se nitidamente que a maximização de rendimento é obtida para valores intermediários de todos os fatores, ou seja, nas condições de soldagem com os pontos centrais.

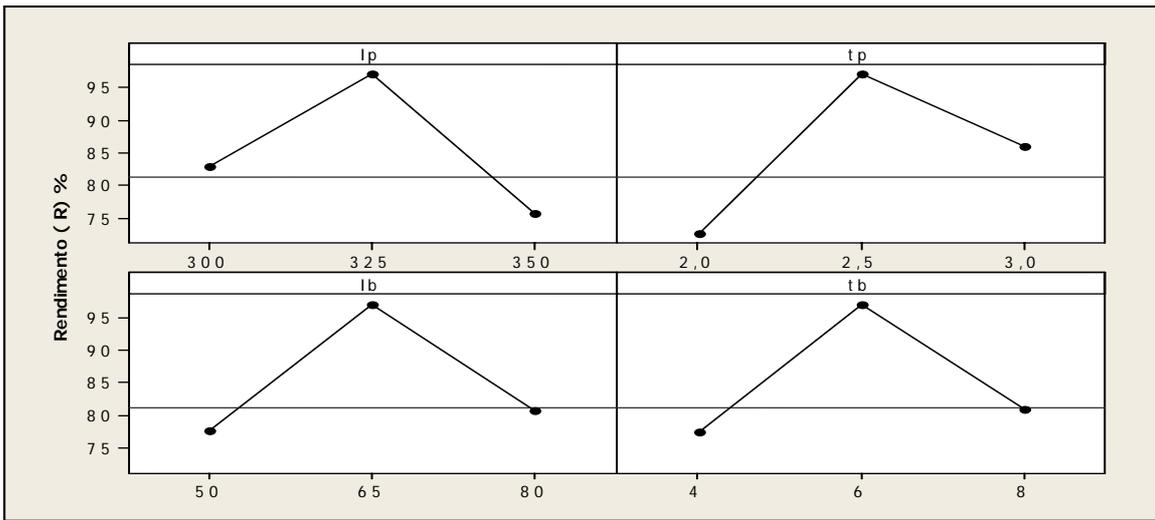
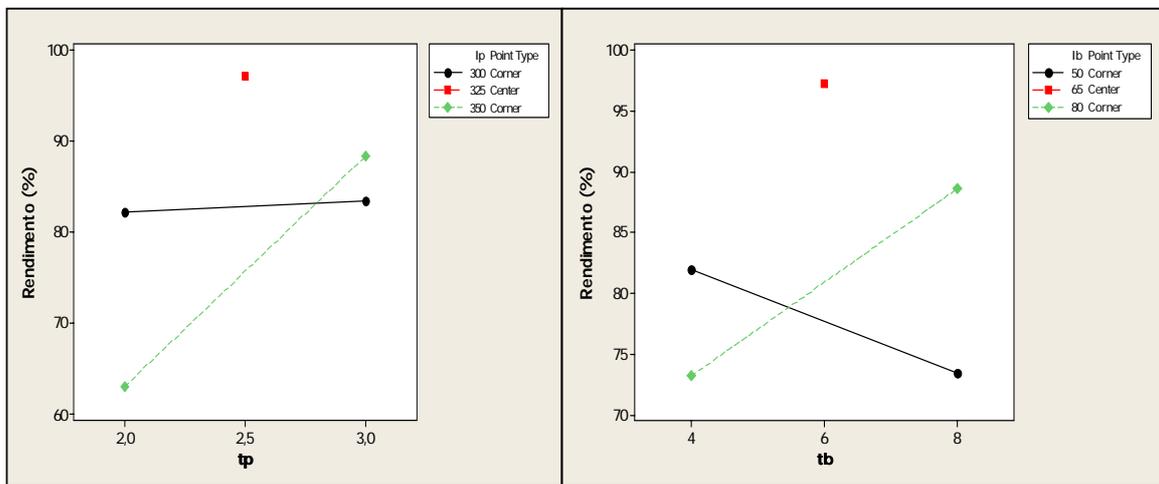


Figura 4.7-Efeito dos fatores sobre o rendimento da solda no modo pulsado.



(a)

(b)

Figura 4.8-Influência das interações sobre o rendimento (a) Ip*tp; (b) Ib*tb.

A Figura 4.9 (a) mostra os efeitos principais dos fatores sobre a taxa de deposição no modo por curto-circuito. Como apenas a velocidade de alimentação do arame se mostrou significativa, a sua utilização no máximo (4 m/min) conduziu a uma maximização da taxa de deposição, como era de se esperar. Os outros fatores não foram significativos no processo.

Com relação ao modo pulsado, os fatores tempos de pico e base e a interação Ip*Ib se mostraram como sendo os mais significativos na taxa de deposição. Considerando os efeitos principais dos fatores, Figura 4.9(b) percebe-se que a maximização da taxa de deposição pode ser obtida para tempo de pico regulado em 2,5 ms ou 3 ms, pois não houve muita diferença na taxa de deposição para os dois tempos utilizados. Aliás, observa-se na mesma figura que as melhores condições de deposição ocorrem para valores intermediários dos fatores, resultado

similar observado para o rendimento do processo. Tais resultados são confirmados pela análise da interação $I_p \cdot I_b$ mostrado na Figura 4.10.

Comparando os resultados obtidos nos dois modos de soldagem, ficam evidentes na Figura 4.9 que as taxas de deposições obtidas no modo pulsado se mostraram superiores às do modo por curto-circuito, provavelmente explicada pela maior energia transferida em função da maior corrente média utilizada no modo pulsado.

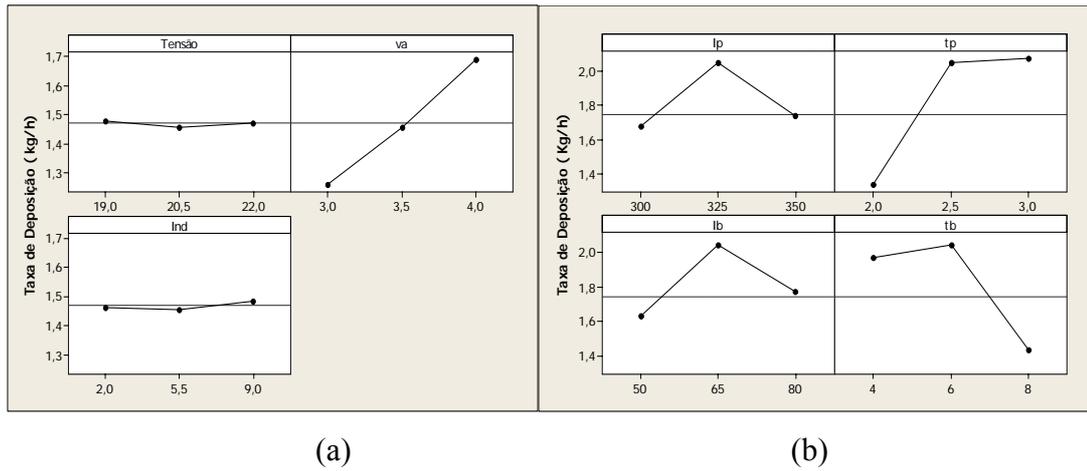


Figura 4.9-Efeito dos fatores principais sobre a taxa de deposição (a) curto-circuito, (b)-pulsado.

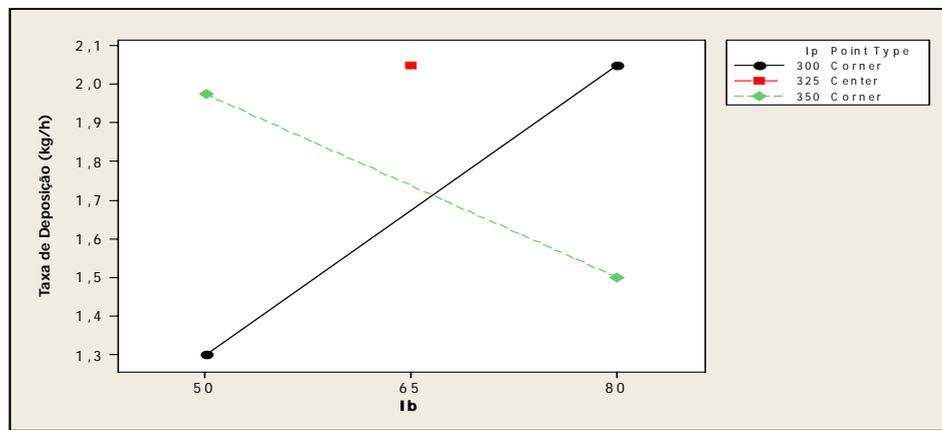


Figura 4.10-Influência da interação da $I_p \cdot I_b$ sobre a taxa de deposição.

(b) Análise da Área Total Adicionada

A área total adicionada corresponde à área de penetração mais a área de reforço do cordão de solda. A sua importância na soldagem se dá pela determinação do perfil da solda, ou seja, na geometria do cordão de solda e pela produtividade do processo, já que a área total

pode medir o quanto de arame eletrodo foi utilizado para produzir o cordão. Considerando a influência dos fatores no modo por curto-circuito, Figura 4.11(a), observa-se que apenas a velocidade de alimentação do arame se mostrou significativa, sendo que sua utilização no nível máximo (4m/min) permite obter o maior valor de área depositada, resultado este esperado em função da maior imposição de calor nesta condição. No modo pulsado os fatores I_b e t_b e as interações $I_p \cdot I_b$ e $I_p \cdot t_p$ foram às significativas nesta resposta. Ao se analisar os efeitos principais, Figura 4.11(b) nota-se que a maximização da área depositada pode ser obtida para a utilização de I_b no nível máximo (80 A) e t_b no nível mínimo (4 ms). Transpondo esta condição de I_b para a interação $I_p \cdot I_b$, Figura 4.12(a), observa-se que a corrente de pico deve ser utilizada em seu nível mínimo (300 A) para garantir uma máxima área depositada. Esta condição da corrente de pico permite definir a condição mais adequada do tempo de pico através da interação $I_p \cdot t_p$ mostrada na Figura 4.12(b), sendo neste caso definido o tempo de pico em seu nível máximo (3 ms).

De uma maneira geral ao se comparar os dois modos de transferência, nota-se que a área total adicionada do cordão de solda para o modo de transferência pulsado foi superior à do modo de transferência por curto-circuito, devido ao fato que o modo de transferência por curto-circuito gerou mais respingos que o modo de transferência pulsado.

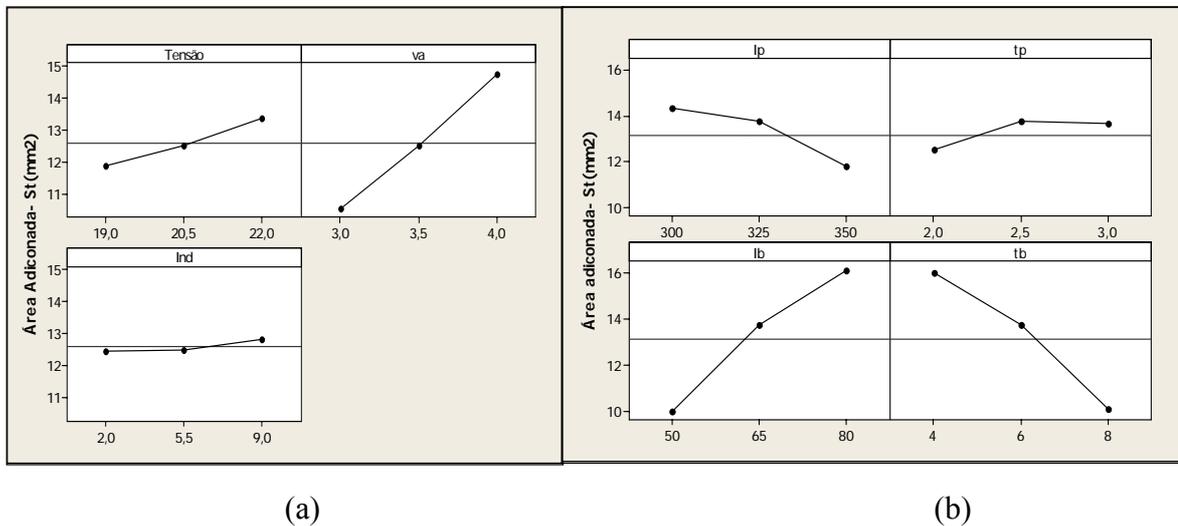


Figura 4.11-Efeito dos fatores principais sobre a área total adicionada. (a) Curto-circuito, (b) Pulsado.

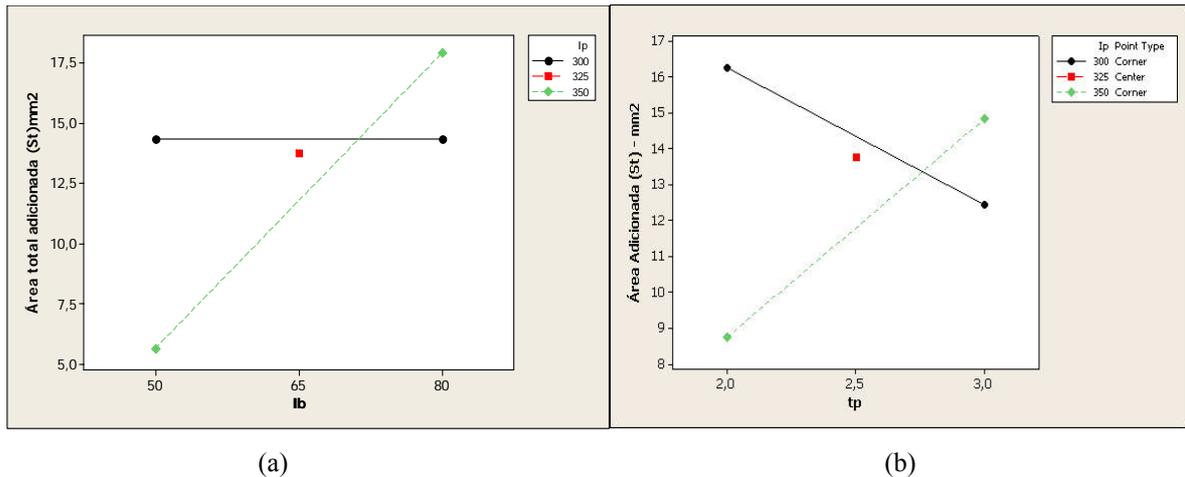


Figura 4.12 Influência das interações sobre a área total depositada: (a) $I_p * I_b$; (b) $I_p * t_p$.

4.2.4 Análise da Influência dos Parâmetros no Aspecto Visual do Cordão

(a) Análise da Qualidade do Cordão de Solda

A qualidade do cordão de solda, neste trabalho é avaliada pela inspeção visual do cordão de solda, representa uma resposta importante para o processo. Vale a pena citar que a qualidade do cordão aqui avaliada não reflete a estabilidade do arco elétrico. Os testes realizados mostraram-se que a qualidade oscilou de uma forma bem significativos entre cordões considerados ruins e bons.

Conforme expresso pela ANOVA, no modo por curto-circuito apenas a indutância se mostrou significativa nesta resposta, ou seja, quanto maior a indutância menos respingos e quanto menor a indutância mais respingos. Observando a Figura 4.13 (a), o efeito dos fatores principais sobre a qualidade do cordão, nota-se que para melhorar a qualidade do cordão a regulagem da indutância em seu nível médio (5,5) melhorou significativamente o aspecto visual do cordão. Da mesma figura, mesmo não sendo significativos, os resultados sugerem que regulagens da tensão e alimentação do arame em seus níveis médios indicam como sendo a melhor condição de soldagem. Com relação ao modo pulsado, analisando a Figura 4.13 (b), percebe-se que a maximização da qualidade do cordão de solda foi obtida com valores máximos de corrente de pico (350 A), de tempo de pico (3ms) e de corrente de base (80 A)

associado a um tempo de base no seu valor mínimo (4ms). Estes resultados são confirmados pela interação da corrente de pico pelo tempo de pico ($I_p \cdot t_p$), Figura 4.14.

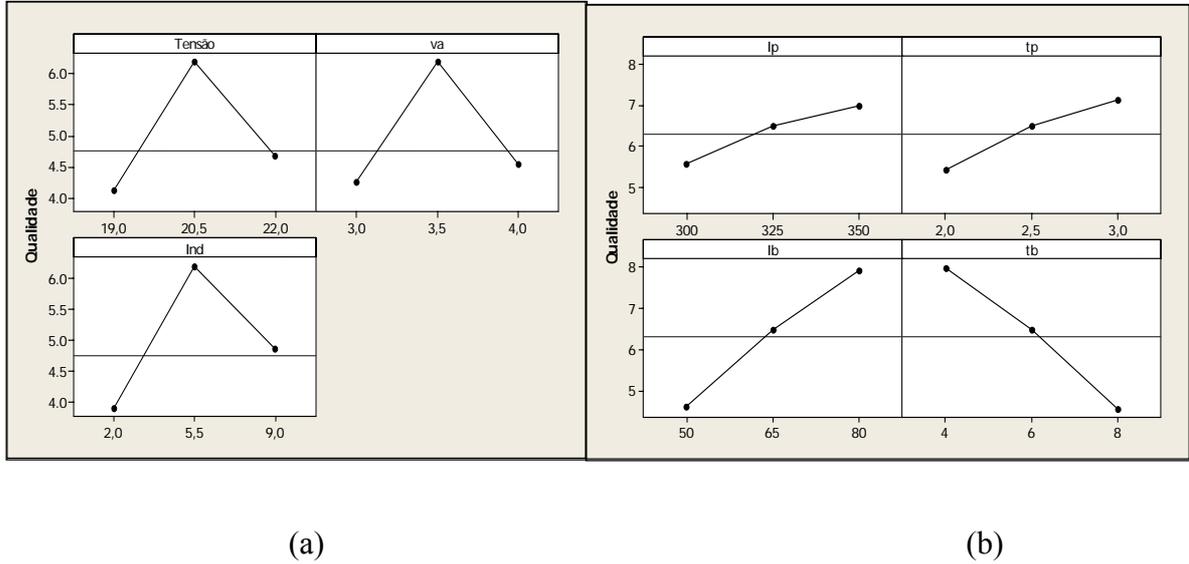


Figura 4.13-Efeito dos principais fatores sobre a qualidade do cordão.(a) Curto-circuito
(b) Pulsado.

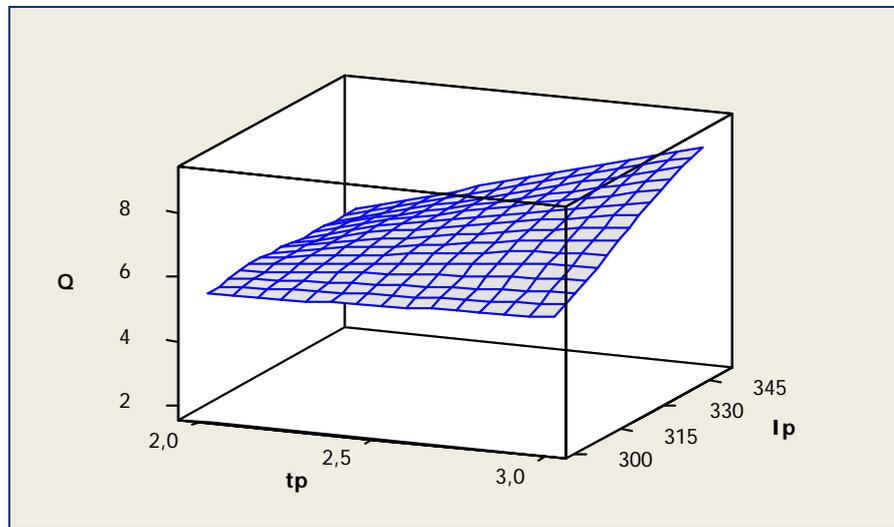


Figura 4.14-Influência da interação da $I_p \cdot t_p$ sobre a qualidade.

4.3 CONDIÇÕES OTIMIZADAS

Nas análises anteriores procurou-se encontrar uma condição que permitisse otimizar cada resposta separadamente.

Entretanto na prática é necessário encontrar uma resposta que permita otimizar todos os fatores na obtenção de uma estabilidade do arco, produtividade e aspecto visual adequados, ou seja, uma condição considerada ótima. Para tentar encontrar uma condição otimizada para cada modo de transferência utilizou-se a ferramenta “Response Optimizer” do software comercial MINITAB. As Figuras 4.15 e 4.16 mostram os níveis de ajustes pretendidos para os modos de transferência por curto-circuito e pulsados respectivamente dentro da ferramenta “Response Optimizer”.

A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos de acordo com os ajustes estabelecidos. Nota-se que as condições ótimas obtidas para o curto-circuito, sugerem uma tensão no seu nível médio, uma velocidade de alimentação no seu nível médio, e uma indutância no seu nível médio. Comparando estes resultados com os resultados reais percebe-se que esta condição corresponde aos testes (17), (18), (19) e (20) da Tabela 4.6, os quais se aproximam do previsto pelo software, validando as análises realizadas. Com relação ao modo pulsado observa-se na mesma tabela que as melhores condições obtidas de acordo com os ajustes pretendidos sugerem ajustes da corrente de pico, tempo de pico e tempo de base em seus níveis mínimos associados a corrente de base no seu nível máximo. Assim foi realizado novo teste nestas condições para validar as condições previstas pelo software.

É importante citar que quanto maior a desejabilidade global, melhor o ajuste do modelo para o processo, sendo assim na tentativa de otimizar o processo pulsado percebeu-se que a melhor condição otimizada pelo software correspondia a corrente de pico $I_p=300$ A, $t_p=3$ ms, e $I_b=80$ A $t_b=4$ ms a qual apresentava uma desejabilidade de 0,96, mais na prática ao tentarmos realizar o teste, isto não foi possível pois o arco desestabilizava devido ao escorrimento do material sendo este fato observado por outros pesquisadores (Pereira & Ferraresi,2002;Oliveira,2002). Assim foi realizada nova otimização dos parâmetros esta condição corresponde ao novo teste realizado para validar as análises previstas pelo software, ou seja, corrente de pico $I_p= 300$ A, tempo de pico $t_p=2$ ms, corrente de base $I_b=80$ A, tempo de base $t_b= 4$ ms, apesar de apresentar uma desejabilidade menor 0,72 conseguiu bons resultados, com relação ao escorrimento de material, pois utilizou uma corrente média menor, com menor imposição de calor, devido ao menor tempo de pico.

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C8 St(mm2)	Maximize ▼	10	15		1	1
C12 TD	Maximize ▼	1,30	1,58		1	1
C13 Q	Maximize ▼	5	6		1	1
C17 TC	Maximize ▼	10	15		1	1
C18 sT	Minimize ▼		20	50	1	1
C19 sttc	Minimize ▼		2	8	1	1

Figura 4.15-Níveis das respostas pretendidas para o modo curto-circuito.

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C11 Q	Maximize ▼	6	9		1	1
C12 R	Target ▼	80	90	95	1	1
C18 TD	Maximize ▼	1	3		1	1
C22 St(mm2)	Maximize ▼	12	23		1	1

Figura 4.16-Níveis das respostas pretendidas para o modo pulsado.

Tabela 4.5-Respostas obtidas utilizando o “Response Optimizer”.

Modo de transferência	Condição ótima	Respostas Previstas	Desejabilidade
Curto-circuito	Tensão=20,5	$S_t=12,50\text{mm}^2$	0,50
	Volts	TD=1,36 Kg/h	0,21
	va=3,5m/min	Q= 6,20	1,00
		Tc=10,50 ms	0,10
		sT=37,49%	0,42
		Ind=5,5	sttc=4,43%
Desejabilidade Global = 0,37			
Pulsado	Ip=300 A	$S_t=19,60\text{mm}^2$	0,69
	tp= 2ms	TD=1,95 kg/h	0,48
	Ib=80 A	Q=9,0	1,00
	tb=4ms	R=88%	0,80
Desejabilidade Global =0,72			

Tabela 4.6-Comparação das respostas analisadas e resultados previstos.

Modo	Analisada	Previsto	Resultado				Erro			
			Obtido				Experimental (%)			
			T17	T18	T19	T20	E17	E18	E19	E20
CC	S _t (mm ²)	12,50	13,35	14,17	12,36	10,10	6,8	13,4	7,9	19,4
	TD (kg/h)	1,36	1,38	1,32	1,11	1,03	1,5	2,9	18,4	24,3
	Q	6,2	5,7	5,7	5,4	6,0	8,1	8,1	12,9	3,22
	Tc (ms)	10,50	10,12	10,56	12,94	8,38	3,6	0,6	23,2	20,2
	sT	37,41	28,95	38,60	40,6	41,60	22,6	3,2	3,2	11,2
	sttc	4,43	4,70	4,1	5,10	3,8	6,1	7,4	15,1	14,2
			TR1	TR2	-	-	ER1	ER2	-	-
PP	S _t (mm ²)	19,60	18,15	18,20	-	-	7,4	7,2	-	-
	TD (kg/h)	1,95	2,11	1,92	-	-	8,2	1,5	-	-
	Q	9,0	7,0	7,5	-	-	22,2	16,6	-	-
	R(%)	88,0	89	86,0	-	-	1,1	2,3	-	-

Onde: T17, T18, T19, T20 = São testes realizados no modo por curto-circuito, e E17,

E18, E19, E20 = Erros relativos aos testes realizados; TR = Testes realizado;

ER = Erro cometido nos testes.

Observa-se que o erro experimental para o modo por curto circuito variou entre 0,6 % a 24 %, e para o modo pulsado o erro variou de 1% a 22 %.

Para a validação das respostas analisadas foi calculado o intervalo de confiança (IC) da média, conforme a equação 4.1, considerando um intervalo de 95%. Esta faixa de variação foi então comparada com a resposta do ensaio prático correspondente, verificando a validade dos resultados.

$$IC = (\mu - 2\sigma) \leq X \leq (\mu + 2\sigma) \quad (4.1)$$

Onde:

μ = Média amostra

IC = Intervalo de confiança

N= Número de testes realizados

σ = Desvio padrão da média

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_i - X)^2 + (X_{ii} - X)^2}{N}} \quad (4.2)$$

A Tabela 4.7 mostra os valores calculados do intervalo de confiança, para as respostas analisadas, na tentativa de confirmar se os valores obtidos para as respostas dos ensaios executados estão de acordo com os previstos. Verifica-se que a maioria dos valores obtidos nos ensaios está dentro do intervalo de confiança e que os valores previstos pelo Minitab apenas a resposta qualidade está fora do intervalo analisado, isto comprova que o modelo é bom, mas precisa de ajustes.

Tabela 4.7-Cálculo do intervalo de confiança das respostas analisadas.

Modo	Resposta prevista		Resposta obtida				μ	σ	IC
	St	TD	Q	TC	sT	sttc			
CC	St	12,50	13,35	14,17	12,36	10,10	12,50	1,76	$8,98 \leq S_t \leq 16,02$
	TD	1,36	1,38	1,32	1,11	1,01	1,21	0,17	$0,87 \leq TD \leq 1,55$
	Q	6,20	5,7	5,7	5,4	6,0	5,70	0,24	$5,22 \leq Q \leq 6,20$
	TC	10,50	10,12	10,56	12,94	8,38	10,50	1,88	$6,74 \leq TC \leq 14,26$
	sT	37,41	28,95	38,60	40,6	41,60	37,39	5,76	$25,87 \leq sT \leq 14,26$
	sttc	4,43	4,70	4,1	5,10	3,8	4,43	0,59	$3,25 \leq sttc \leq 5,61$
PP	S _t	19,6	19,0	18,20	-	-	18,6	0,57	$17,46 \leq S_t \leq 19,74$
	TD	1,95	2,11	1,92	-	-	2,01	0,13	$1,75 \leq TD \leq 2,53$
	Q	9	7	7,5	-	-	7,25	0,35	$6,55 \leq Q \leq 8$
	R	88,0	89,0	86,0	-	-	87,5	2,12	$83 \leq R \leq 92$

4.3.1 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO ARCO PARA AS CONDIÇÕES OTIMIZADAS

Depois de estabelecido as condições otimizadas para as juntas de topo, foram realizadas alguns testes em juntas sobrepostas para avaliar o comportamento dinâmico da soldagem, pois a estabilidade do processo, no modo por curto-circuito está relacionada com a regularidade da transferência metálica e dos parâmetros do processo (tensão, corrente, material, gás etc).

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram os oscilograma dos testes correspondentes aos modos de transferência por curto-circuito e pulsado para as condições otimizadas pelo software MINITAB, nelas se observa o comportamento estável da tensão e corrente.

Analisando a Figura 4.17 percebe-se uma boa regularidade dos sinais para o modo por curto-circuito, comprovando assim, uma boa estabilidade do arco e conseqüentemente uma

solda mais regular, apesar de que durante a soldagem apareceram perturbações associadas à transferência sem curto-circuito, sendo que este fenômeno é visualizado por pequenos ruídos nos oscilograma de tensão e corrente após o curto-circuito normal.

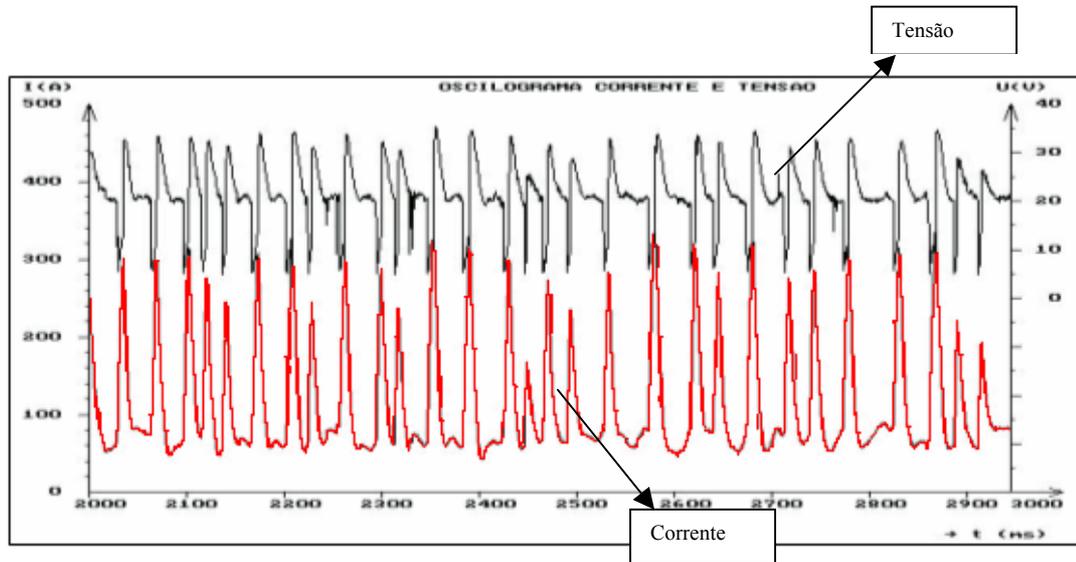


Figura 4.17-Oscilograma de tensão e corrente, modo curto-circuito, $V=20,5$ Volts, $v_a=3,5$ m/min, Indutância=5, (Software MIGMAG).

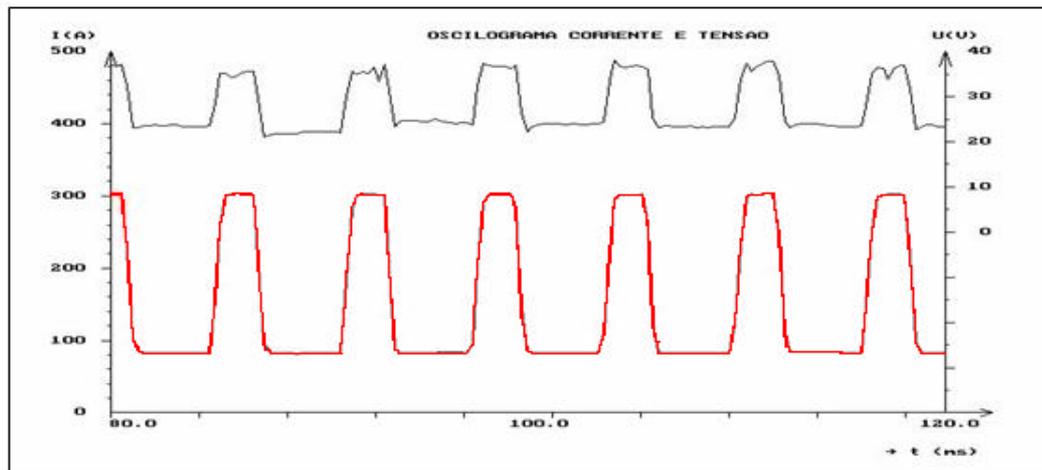


Figura 4.18- Oscilograma da tensão e corrente, modo pulsado, $I_p= 300$ A, $t_p=2$ ms, $I_b=80$ A, $t_b=4$ ms, (Software MIGMAG).

A Figura 4.18 ilustra a condição para o modo pulsado, através dos sinais observa-se uma condição que provavelmente está ocorrendo um destacamento de metal regular a um nível de corrente média mais baixa. Para a validação desta hipótese é necessário o uso de uma técnica chamada “shadowgrafia”, que é a filmagem da transferência metálica em alta velocidade.

A Figura 4.19 ilustra o diagrama tensão x corrente no modo por curto-circuito para um período de transferência de 5000ms. Cada ponto representa o valor momentâneo de corrente e

tensão de soldagem, observa-se no ponto (A) início do curto-circuito, no ponto (B) o término do curto, o ponto (C) representa a reignição do arco, quando termina o curto, o ponto(D) inicia o processo com o crescimento da gota na ponta do eletrodo. Observa-se que existe uma relação entre os segmentos AB e CD com o tempo, ou seja, de AB representa o período de curto-circuito no qual a corrente eleva rapidamente de A para B. Quando o arco é reignitado, uma rápida elevação da tensão do arco ocorre instantaneamente (BC). A linha CD representa o período de arco aceso. A alimentação do arame e o crescimento da gota fundida reduzem gradualmente a tensão para o ponto D onde o curto-circuito ocorre outra vez e a tensão cai a ponto A onde o ciclo é repetido. Os movimentos de B para C e de D para A ocorrem quase instantaneamente. Existem algumas linhas verticais que têm se desviado do contorno regular ABCD representam variações irregulares do arco provavelmente neste intervalo de tempo ocorre curtos aleatórios.

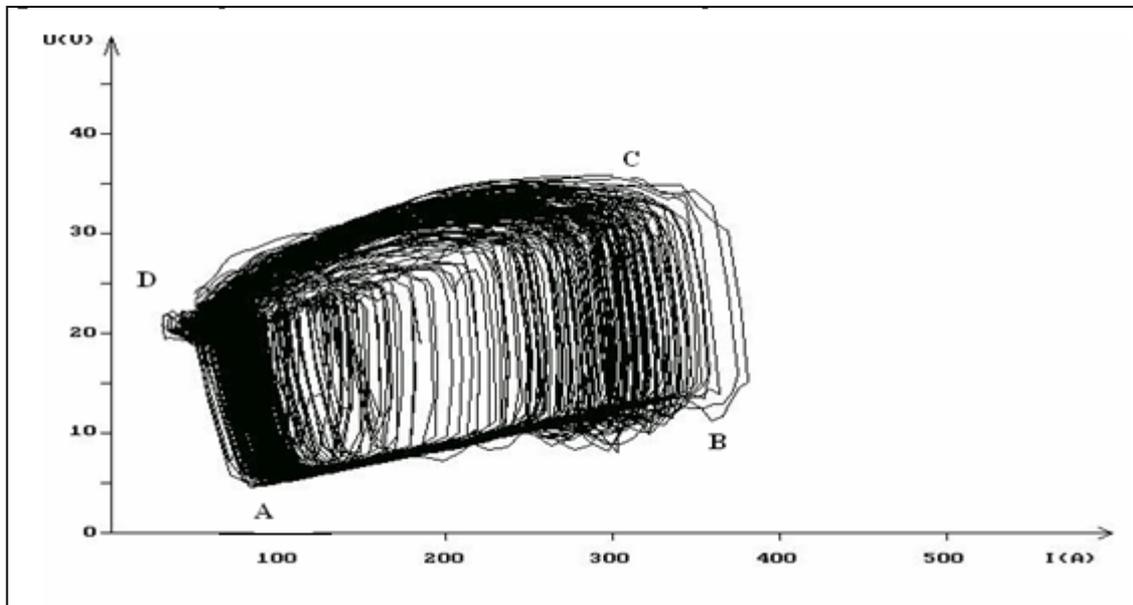


Figura 4.19-Diagrama tensão e corrente (Software MIGMAG).

A Figura 4.20 mostra os histogramas de duração de curto-circuito para o modo por curto-circuito, percebe-se que mesmo utilizando uma indutância média (5,5), durante a soldagem, apareceram curtos de pequena duração os quais são caracterizados por apresentarem um tempo de curto menor que 1,5ms e estão associados à alta corrente de curto-circuito, que provoca um rompimento brusco da ponte metálica e resulta em intensa oscilação da poça de fusão e da gota residual na ponta do eletrodo. Cabe salientar que, provavelmente existem outras forças dominantes, tais como eletromagnética vaporização brusca de material e o efeito da tensão superficial possam estar agindo em conjunto para causar o aumento dos

curtos-circuitos aleatórios, sendo assim há necessidade de estudos mais profundos sobre o assunto. Observa-se também que a grande incidência de curtos-circuitos ocorreu entre os intervalos de tempo entre 2,5ms e 7,5ms, caracterizando a predominância de curtos-circuitos com transferência metálica.

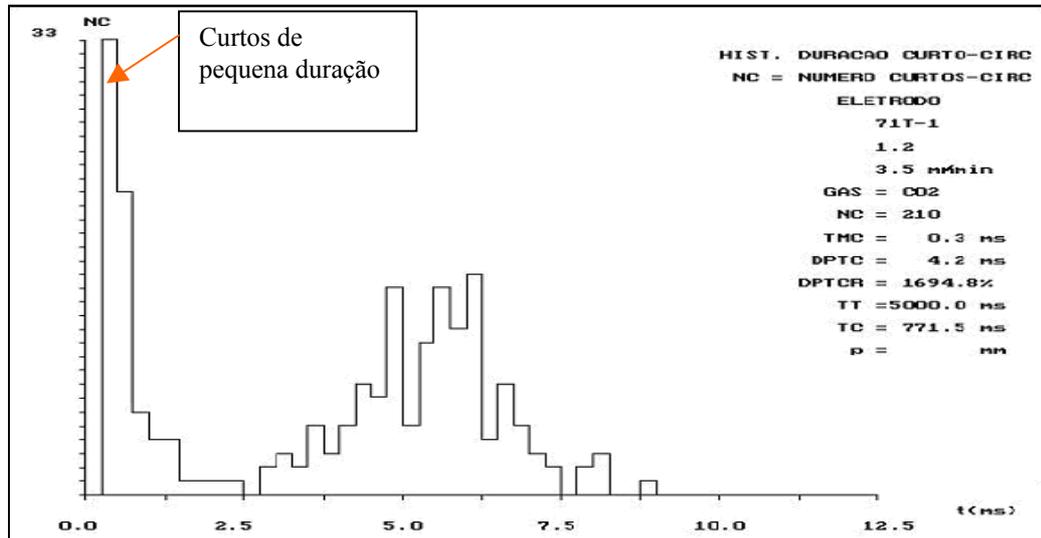


Figura 4.20-Histograma de duração de curto-circuito, V= 20,5 Volts, va=3,5m/min, Ind=5,5, (Software MIGMAG).

4.4 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS CUSTOS ASSOCIADOS AOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA

Depois de estabelecidas às condições otimizadas do processo, partiu-se para a avaliação, de forma simplificada, do custo econômico relativo ao metro linear de solda em ambos os modos de transferências estudados. O conhecimento do custo relativo a estes modos de soldagem pode ser de grande interesse, principalmente na opção de escolha das condições de soldagem, visto que através deste procedimento pode se estipular o preço de venda do produto, possibilitando tomar decisões quanto ao volume de investimentos necessários para uma operação, prever modificações provocadas por alteração na escala de produção, ou mesmo, estabelecer os princípios para a implantação de um programa de redução de custo final. Desta maneira se torna possível, pelo simples motivo de conhecer cada parcela do custo do produto, promover melhorias no processo que gerem menores custos para o produto final.

Existe várias metodologia na literatura para determinar os custos das soldagens, sendo alvo de estudo de vários pesquisadores como (Canetti, 1992; Machado, 1995; Silva, 2000). O cálculo dos custos neste trabalho foi baseado na metodologia utilizada por Silva et al (2000), os quais fizeram uma comparação dos custos, por metro linear, entre diversos processos de soldagem, além de uma análise de sensibilidade para determinar quais os fatores mais impactantes no custo final de cada processo. Para isto os autores levam em consideração os custos de material, da mão-de-obra, de consumo de energia elétrica, depreciação e manutenção dos equipamentos, estabelecidos conforme a equação (4.3).

$$CTS = CM + CMO + CE + CEE \quad (4.3)$$

Onde CTS= Custo total de soldagem; CM= Custo de Material; CMO=Custo de mão de obra; CE= Custo com equipamento; CEE= Custo com energia elétrica. O custo de material neste trabalho envolve o custo com eletrodo e o custo com gás, à utilização do custo com mão de obra se justifica pela diferentes taxa de deposição e velocidades de soldagem ser diferentes para os dois modos de transferência, assim se obtém uma diferença para o custo com mão de obra. O custo com equipamento envolve o custo com investimento, o custo com depreciação, o custo com manutenção. O custo com energia elétrica se justifica pelos diferentes valores de corrente e tensão de soldagem para cada modo de transferência.

A equação 4.3; pode ser desmembrada em outras equações, conforme a Tabela 4.8. Todos os custos são dados em R\$/m, pois acredita que este índice é o mais adequado para a seleção de processos de soldagem, utilizando chapas finas.

Tabela 4.8-Equações para determinação dos custos parciais SILVA et al (2000).

Fatores de Custo (R\$/m)		Equações de Custo	Equação
Material (CM)	Eletrodo, (Cw).	$Cw = Pw \cdot (TD \cdot 100 / R) / (vs \cdot 60 / 100)$	(4.4)
	Gás (Cg)	$Cg = Pg \cdot Qe \cdot 100 / vs$	(4.5)
Equipamento (CE)	Investimento, (Ci).	$Ci = Vê \cdot (Ir / 100) \cdot TD / (Pm \cdot vs \cdot 60 / 100)$	(4.6)
	Depreciação, (Cd).	$Cd = Vê \cdot TD / (R \cdot Pm \cdot vs \cdot 60 / 100)$	(4.7)
	Manutenção, (Cm).	$Cm = Em \cdot TD / (Pm \cdot vs \cdot 60 / 100)$	(4.8)
Mão de obra (CMO)	Mão de obra (CMO)	$CMO = Sw / (vs \cdot 60 / 100 \cdot fop / 100)$	(4.9)
Energia elétrica (CEE)	Energia elétrica (CEE)	$CEE = (Im \cdot Vm \cdot Pel) / (10^3 \cdot (ee \cdot 0,1) \cdot vs \cdot 0,6)$	(4.10)

A Tabela 4.8 mostra os valores adotados, segundo Silva et al (2000) para calcular as equações dos custos parciais, utilizando os valores adotados na Tabela 4.9 associados aos modos de soldagem por curto-circuito (CC) e pulsado (PP) do processo com Arame Tubular. Vale a pena citar que os componentes dos custos foram calculados, utilizando a condição de ótimo correspondente a cada modo de transferência estudado. Assim, conforme mostrado na Tabela 4.6, para o modo de transferência por curto circuito às análises se basearam no teste (18) e para o modo pulsado, no teste (TR1), para efeito de comparação dos dois modos de transferência. Pois estes testes apresentaram melhores resultados com relação à estabilidade do arco, as características econômicas, e qualidade visual do arco.

Tabela 4.9-Valores adotados para as equações dos custos associados ao processo FCAW.

Fatores	Definição	Unidades	Valor adotado	
			CC	PP
Pw	Preço do eletrodo	R\$ /kg.	10,3	10,3
Pg	Preço do gás	R\$/m ³	0,009885	0,015
Qe	Vazão do Gás	l/min.	14	14
vs	Velocidade de soldagem	cm/min	35	45
Ve	Valor do equipamento	R\$	20000,00	20000,00
R	Rendimento	%	67,9	89,0
TD	Taxa de deposição	kg/h	1,32	2,11
Ir	Taxa de retorno	%	2,5	2,5
Pm	Produção mensal de solda	kg/mês	128,72	202,56
Sw	Salário do operador + encargos sociais	R\$	6,50	6,50
fop	Fator de operação	%	60	60
td	Depreciação meses	-	60	60
Em	Custo mensal de manutenção	R\$/mês	25	25
Im	Corrente média	A	111	150
Vm	Tensão média	Volts	20,5	23
Pel	Preço da eletricidade	R\$/Kwh	0,5	0,5
ee	Eficiência elétrica equipamento	%	75	75

Analisando a Tabela 4.10, a qual mostra o resultado dos custos para os dois modos de transferência, observa-se que o custo relativo ao eletrodo para o modo pulsado é menor que

para o modo por curto-circuito. Isto pode ser explicado pelo fato das maiores taxas de fusão e rendimento conjuntamente com maiores velocidades de soldagem verificada para o modo pulsado. Com relação ao gás de proteção, o custo para a mistura C25 foi maior que para o CO₂ apesar de ser utilizada a mesma vazão, o que era de se esperar pelo maior custo da mistura C25 apesar da visível melhoria na redução da formação de respingos. Sendo assim o custo total que engloba todos os demais custos foi maior para o modo por curto-circuito que o modo de transferência pulsado, o que já era esperado nos experimentos. Embora os dois modos de transferência sejam indicados para a soldagem de chapas finas e em todas as posições, conforme informado pelo fabricante, vale a pena salientar que estes resultados preliminares indicaram uma redução de aproximadamente 8 % no custo final da solda quando se utilizou o modo pulsado com proteção da mistura de 75% Ar + 25% CO₂ comparativamente ao modo por curto-circuito com proteção de CO₂. Entretanto, sugerem estudos complementares para avaliar esta tendência verificada.

Este fato mostra que a utilização do modo pulsado torna-se mais competitivo, até mesmo por apresentar resultados tão bons quanto àqueles conseguidos quando se usa o curto-circuito, sendo que com o pulsado percebeu-se um aspecto melhor do cordão de solda, explicado pelo rendimento conseguido por este modo de transferência e também por apresentar uma maior taxa de fusão e deposição, aproximadamente 40% maior que o modo por curto-circuito, dando ao processo mais competitividade e menos respingos.

Tabela 4.10-Planilha de custos para os dois modos de transferência na condição otimizada.

Componentes do Custo	Custos R\$/m	
	Modo Curto-Circuito	Modo Pulsado
Eletrodo (C _w)	0,95	0,90
Gás (C _g)	0,40	0,47
Mão de obra (C _{MO})	0,52	0,40
Investimento (C _i)	0,248	0,193
Depreciação (C _d)	0,165	0,129
Manutenção (C _m)	0,0124	0,0096
Energia Elétrica (C _{ee})	0,072	0,085
Custo total	2,37	2,19

A partir do cálculo dos custos parciais e totais para cada modo de transferência conforme a Tabela 4.10, pode-se criar um modelo para ser simulado e inserir a variabilidade do custo para cada modo de transferência. O modelo utilizado pode ser caracterizado pelas próprias equações propostas por Silva et al (2000) e foi utilizada a técnica de simulação de Monte Carlo por ser uma ferramenta bastante versátil e apresentar certa facilidade de utilização por ser empregada em vários campos da manufatura, sistemas computacionais, negócios, etc.

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

O método gera de forma contínua e aleatória números a fim de simular vários cenários possíveis. Cada geração de novos valores corresponde a um evento ou cenário prováveis de ocorrer, que é inserido na distribuição de probabilidade. A disposição desses eventos em uma distribuição possibilita a avaliação da probabilidade de ocorrência de cada evento, através de medidas de estatística descritiva, como a média, o desvio padrão e frequência de ocorrência de cada cenário. Cada geração da série de números aleatórios significa um cenário possível de ocorrer (Bonanni, 2005).

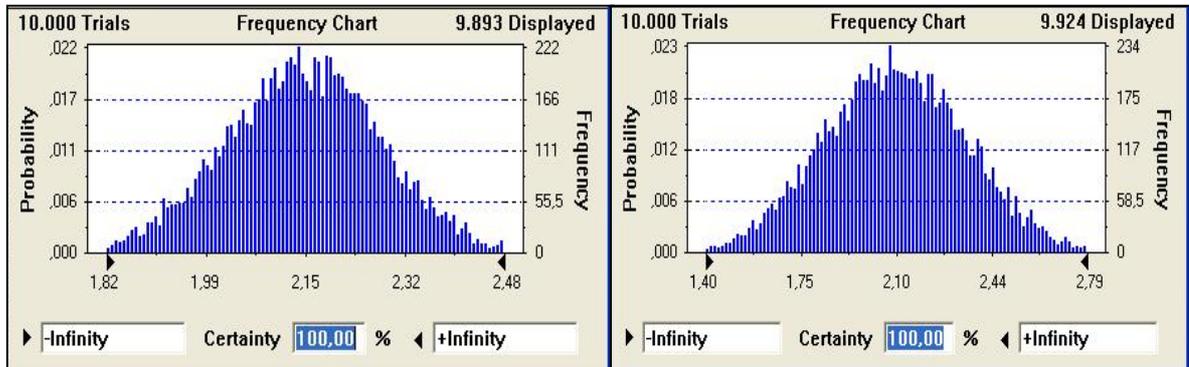
O conhecimento desta variabilidade pode ser bastante útil em tomadas de decisão, tanto para novos produtos e processos, quanto para melhorias e redução de custos. Esta análise pode ser de grande valia quando se deseja saber se determinado produto vai gerar a benefícios para a empresa, ou seja, a empresa sabe que o custo do produto pode chegar até um valor “x” para ser competitivo no mercado, e estando de posse da distribuição de probabilidades do custo, a empresa conhecerá a chance de ter sucesso ou não.

Através da metodologia experimental empregada neste trabalho, verificou o comportamento de cada componente do custo, ou seja, foi atribuída ao custo com eletrodo e com energia elétrica uma distribuição normal e os demais custos como uma distribuição uniforme.

Desta maneira foi feito à simulação de Monte Carlo (SMC) para os dois modos de transferência para verificar a sua variabilidade

Analisando a Figura 4.21-(a) observa-se que a variabilidade do custo (R\$/m) para o modo por curto-circuito encontra-se no intervalo de 1,82 a 2,48, para 10000 interações analisadas ou seja quanto maior o número de iterações mais esta distribuição se aproxima de

uma distribuição normal. Assim para o intervalo de 1,82 a 2,37 a probabilidade é de 94,88% e para o intervalo 2,37 a 2,48 a probabilidade é 3,98%.



(a)

(b)

Figura 4.21-Simulação de Monte Carlo (a) curto-circuito; (b) pulsado.

A Figura 4.21 (b) percebe-se que a variabilidade do custo (R\$/m) encontra-se no intervalo 1,40 a 2,79, ou seja, para o intervalo de 1,40 a 2,19 a probabilidade é 63,56% e para o intervalo de 2,19 a 2,79 a probabilidade é de 35,67%.

Nesta aproximação dos custos gerados por cada modo de soldagem, observa-se que o modo pulsado apresenta-se bem mais competitivo quando comparado com o modo por curto-circuito, como já foi verificado com o cálculo simples dos custos, pois a probabilidade de obter um valor abaixo da média é bem maior. Para a análise dos fatores observa-se que o fator que traz maior impacto, e por sua vez causa maior variação no custo total calculado foi o custo com eletrodo C_e , conforme já observado na Tabela 4.9.

Segundo Barhorst (2000) em seu trabalho, com eletrodo tubular básico tipo metal cored observa que 3% do custo de soldagem é com o gás, 85% o custo com manutenção, 10% do custo com eletrodo, e o restante com os demais custos. Cabe frisar que estudos mais aprofundados devem ser realizados para checar de forma mais adequada à influência destas variáveis no processo.

4.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Esta parte do trabalho teve por objetivo observar e analisar a resistência mecânica dos cordões de solda produzidos sob diferentes condições de soldagem. Sendo assim, foram realizados ensaios de cisalhamento em juntas sobrepostas produzidas com o processo por curto-circuito e pulsado, nas condições otimizadas cujos resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.11.

Comparando os resultados obtidos para o modo pulsado e por curto-circuito, nota-se que a carga máxima suportada pelos corpos de prova para o modo pulsado é 52% maior que para o modo por curto-circuito, e a resistência ao cisalhamento foi 6% maior para o modo pulsado que para o modo por curto-circuito, utilizando junta sobreposta.

Cabe salientar que os ensaios realizados em juntas sobrepostas, os corpos de prova romperam fora do cordão de solda, na zona termicamente afetada (ZTA) sendo assim observa-se que o limite de resistência calculado nos experimentos está dentro do limite de resistência sugerido pelo fabricante, demonstrando assim a resistência do cordão de solda.

Tabela 4.11-Resultados dos testes de cisalhamento.

Testes	Processo	Junta	Carga Máxima (F)	Área transversal (S _t)	Alongamento (Δl)	Tensão Cisalhamento (τ)
-	-	-	kgf	mm ²	mm	kgf/mm ²
1	CC	Sobreposta	826	9,2	0,43	90
2	PP	Sobreposta	1740	18,20	0,46	96

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos, vale ressaltar que todas as análises foram feitas considerando o aspecto econômico, e mecânicos tais como a resistência das soldas, sem o comprometimento com alguns aspectos metalúrgicos. Para viabilizar o estudo é necessária uma análise geral de todas as características envolvidas no processo em questão. Para uma análise completa do presente trabalho, onde um conjunto de parâmetros de entrada supostamente próximos ao ótimo seria necessário fazer uma análise metalúrgica e a

otimização da geometria do cordão para os dois modos de soldagem analisados, viabilizando assim a sua utilização.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Em função dos resultados e das análises realizadas, com o processo com Eletrodo Tubular sob proteção gasosa com a transferência por curto-circuito e pulsado na posição vertical descendente este trabalho permitiu concluir que:

- Dentre os parâmetros tensão, velocidade de alimentação, e indutância, a velocidade de alimentação teve maior influência nos resultados de soldagem por curto-circuito.
- A melhor condição de soldagem nesta posição, para o modo por curto-circuito sugere uma tensão em 20,5 Volts, velocidade de alimentação em 3,5 m/min, e a indutância em 5,5.
- A melhor condição de soldagem nesta posição, para o modo pulsado sugere uma corrente de pico em 300 A; tempo de pico em 2ms; corrente de base em 80 A; e o tempo de base em 4ms.

- O modo pulsado mostrou-se mais produtivo que o modo por curto-circuito com relação à taxa de deposição, o rendimento, e taxa de fusão.
- O custo total de soldagem para o modo pulsado mostrou-se inferior aproximadamente 8% que o modo por curto-circuito.
- A simulação de Monte Carlo, empregada neste trabalho, mostrou-ser uma técnica, bastante eficaz para determinar a variabilidade dos custos relacionados à soldagem.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um projeto de experimento (DOE) similar a este trabalho, mas utilizando outro eletrodo e material de base.
- Estudar o fenômeno de escorregamento das gotas, observado na soldagem fora de posição (vertical descendente).
- Estudar o comportamento da soldagem aplicando técnicas estatísticas na posição de soldagem sobre-cabeça.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOLFSSON, S. et al. (1999)**, “*On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding*”, *Welding Journal*, February, pp.59s-73s.
- ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A (1992)**, “*MIG Pulsado Manual de Soldagem*”, São Paulo, Alcan Alumínio do Brasil S/A, pp.11-14.
- ALLUM, C.J. & QUINTINO, L. (1985)**, “*Control of Fusion Characteristics in Pulse Current MIG Welding- Part I*”, *Metal Construction*, vol.4, n17, pp.242-245.
- AMIN, M. (1983)**, “*Pulse Current Parameters for Arc Stability Controlled Metal Transfer in Arc Welding*”, *Metal Construction*, n°6, pp. 272-8.
- ARAÚJO, W.R. (2004)**, “*Comparação entre Soldagem Rubotizada com Arame Sólido e Metal Cores – A Ocorrência do Finger*”, Dissertação de Mestrado, UFMG, 79p.
- AWS WELDING HANDBOOK. (1991)**, “*Flux Cored Arc Welding*”, 8th ed., Miami-USA.American Welding Society, vol.2, 158 p.
- BAIXO, C.E.I. & DUTRA, J.C. (1990)**, “*O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG Através de Projetor e de Transferência Oscilográficos de Tensão e Corrente*”, ANAIS XV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, São Paulo, Novembro, vol. 1. pp.193-209.
- BAUNÈ, E.; BONNET, C.; LIU, S. (2000)**, “*Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable- Part 1 – Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as Basicity Indicator*”, *Welding Journal*, March, pp. 57s-64s.

- BARHORST, S. (2000)**, *“Metal Cored Electrode Basics”*, The American Welder, Nov/Dec, pp 13-15.
- BONANI, C.A. (2005)**, *“Uso Combinado da Técnica DOE e Simulação de Monte Carlo em Um Processo MIG/MAG Pulsado”*, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Junho, 104p.
- BRACARENSE, A.Q. (2000)**, *“Processo de Soldagem por Arame Tubular”*, Apostila UFMG, Maio, Belo Horizonte, pp.88-104.
- BRACARENSE, A.Q. et al. (2004)**, *“Conheça o Processo MIG MAG”*.Revista da Soldagem ABS, Ano 1, nº 5, pp. 6-17.
- BRAGA, M. E.; MOTTA, M.A.C.; FARIAS P. J. (1998)**, *“Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem a Arame Tubular Autoprotégido em Corrente Pulsada”*, Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino-Americano e Ibero-Americano de Soldagem, Fortaleza, vol. 1, ref 187, pp.645-655.
- CANETI, E.E. (1992)**, *“Custos nos Processos de Soldagem”*, in: Wainer. Emílio Brandi; Sérgio D.&Mello,Fábio D.H.Soldagem:Processos e Metalurgia São Paulo;Edgard Blucher.Cap.11,pp.449-61.
- CÓDIGO ASME SEÇÃO IX. (1980)**, *“Padrões para a Qualificação dos Procedimentos de Soldagem e de Brasagem, dos Soldadores e Soldadores de Brasagem, e dos Operadores de Soldagem e de Brasagem”*, Seção IX, 212p.
- COOPER ORDÓÑEZ, R.E. (2004)**, *“Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares”*, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Janeiro, 111p.
- DILLENBECK, V.R.; CASTAGNO, L., (1987)**, *“The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding”*, Welding Journal, vol. 66, nº 9, Sept, pp. 45-49.
- FORTES, C. (2004)**, *“Apostila Arames Tubulares”*, ESAB BR, Maio.

- FRENCH, I.E. & BOSWORTH, M.R. (1995)**, “*A Comparison of Pulsed and Convencional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires*”, Welding Journal, vol.74, n°6, pp.197s-205s.
- GOMES, E. B. (2006)**, “*Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi*”, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Maio, 119p.
- GOMES, E. B; PAIVA, A. P.; COSTA, S.C. (2006)**, “*Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito Aplicado ao Processo com Eletrodo Tubular Através de Taguchi*”, IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife-PE.
- HERMANS, J. M. & DEN OUDEN, G. (1999)**, “*Process Behavior and Stability in Short Circuit gas Metal Arc Welding*”, Welding Journal, April, pp.137s-141s.
- HOUDCROFT, P. & JOHN, R. (1998)**, “*Welding and Cutting*”- Woodhead-Faukner Ltd.Cambrige, England.
- JOAQUIM, R. (2001)**, “*Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem – Módulo II Processo de Soldagem Arame Tubular*”, Centro de Tecnologia de Soldagem, SP.
- JÚNIOR, R.G. (2002)**, “*Desenvolvimento de Novos Métodos de Controle do Arco Voltaico e Transferência Metálica para o Processo Mig/Mag usando Técnicas Computacionais*”, Tese de Doutorado, UFSC, Setembro, 147p.
- KIM, Y.S.; EAGAR, T.W. (1993)**, “*Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding*”, Welding Journal, July, pp. 279s-286s.
- KOBAYASHI, Y.; ANASTÁCIO, A.C.S.A.; DE NARDI, C. (2005)**, “*Estudo da Influência da Variação da Corrente de Curto-Circuito, através da Indutância, sobre as Características Geométricas e Rendimento Real de Deposição*”, III COBEF, Joinville-SC.

- LIMA, A. C.; FERRARESI, V.A. (2006)**, “*Estudo dos Modos de Transferência Metálica de um Arame Tubular Autoprotégido com Variação na Distância Bico de Contato-Peça*”, XXXI CONSOLDA, São Paulo, Novembro, pp.164-172.
- LYTTLE, K. A.; STAPON, W.F.G. (1990)**, “*Select the Best Shielding Gas Blend for the Application*”, Welding Journal, November, pp.21 – 27.
- MACHADO, I.G. (1995)**, “*Economia da Soldagem*”, Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, vol. II ,Caxias do Sul, pp. 909-1013.
- MEDEIROS, C. R. ; QUINTINO, L. ; SANTOS, O. F. J. (1989)**, “*Estudo da Aptidão dos Arames Tubulares à Soldagem MIG com Transferência Controlada*”, Soldagem & Materiais, vol.66, n°5, pp.44-49.
- MIRANDA, C.H. (1999)**, “*Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobrecabeça*”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, Fevereiro, 170p.
- MIRANDA, C.H. & FERRARESI, V.A. (2003)**, “*Identificação da Transferência Metálica Soldagem MIG/MAG Pulsada de Aço Inoxidável Apartir de Um Sensor Óptico*”, II COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Maio.
- MODENESI, P.J. (2004)**, “*Introdução à Física do Arco Elétrico e Sua Aplicação na Soldagem dos Metais*”, UFMG, Setembro, 150p.
- MODENESI, P.J. (2004)**, “*Transferência de Metal na Soldagem MAW (MIG/MAG)*”, Apostila, UFMG, 11p.
- MODENESI,et al. (2001)**, “*Metalurgia da Soldagem*”, Apostila,UFMG, 56p.
- MOTA, C.A.M. et al. (1998)**, “*Efeito dos Parâmetros de Soldagem e do tipo de Arame sobre a Geometria da Solda a Arame Tubular Autoprotégido*”,VCEM-NNE98, Fortaleza, CE, pp.390-396.

- NASCIMENTO, S. A. et al. (2003)**, “*Procedimento Experimental para Seleção de Parâmetros de Pulso para Soldagem com Arame Tubular em Corrente Pulsada*”, Anais do II-COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, ref175, pp. 855-865.
- NORRISH, J. (1992)**, “*Advanced Welding Process*”, Bristol, IOP, 375p.
- NORRISH, J. (1995)**, “*O que é MIG Sinérgico*” Revista Soldagem & Inspeção, ano1, nº3.pp.16-18.
- NORRISH, J. & RICHARDSON, L.F. (1988)**, “*Metal Transfer Mechanisms*”, Weld & Metal Fabrication, Jan/Feb, pp.17-22.
- OLIVEIRA, M.E.J. (2002)**, “*Estudo dos Parâmetros para Soldagem Fora de Posição com Arame Tubular*” Dissertação de Mestrado, UFMG, Março, 101 p.
- OLIVEIRA, L.M. (2005)**, “*Uma Investigação da Influência dos Parâmetros de Pulso em Soldagem com Eletrodo Tubular com Proteção Gasosa*”. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, Setembro, 103 p.
- PALANI, P.K.; MURUGAN, N. (2006)**, “*Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding*”, Journal of Materials Processing Technology, 172, pp. 1-10.
- PEREIRA, W.A. (1995)**, “*Comparação de Características Operacionais Entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto-Circuito*”, Dissertação de Mestrado, UFU, Abril, 140 p.
- PEREIRA, W.A. & FERRARESI, V.A. (2002)**, “*Comportamento do Cordão Na soldagem GMAW Pulsada em Chanfros Estreitos*”, I COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba, Paraná, Abril.
- RODGERS, K.J. & LOCHHEAD, J.C. (1989)**, “*The Use of Gas – Shielded FCAW for Offshore Fabrication*”, Welding Journal, February, pp.26-32.

- RODRIGUES, L.O. (2005)**, *“Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular”*, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Setembro, Itajubá, 82p.
- SAITO, S. M. (2001)**, *“Análise da Influência dos Parâmetros de Pulso sobre a Geometria do Cordão de Solda e Rendimento de Deposição, Obtidos pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular Utilizando Arco Pulsado”*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da UNESP-Bauru, Março, 146 p.
- SALES et al. (2001)**, *“Estudo da Geometria do Cordão de Solda Usando CO₂ na Soldagem com Arame Tubular AWS E71T-1”*, Anais do COBEM, Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, Minas Gerais, v4, ref 172, pp. 543-551.
- SCOTTI, A. & DUTRA, J.C. (1993)**, *“Contribuição ao Estudo da Soldagem Vertical Ascendente Empregando o Processo MIG/MAG Pulsados”*, Anais do IX COBEM, Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Brasília, Dezembro.
- SHINODA, T.; KANEDA, H.; TAKEUCHI, Y. (1989)**, *“An Evaluation of Short Circuiting Arc Phenomena in GMA Welding”*, Welding & Metal Fabrication, December, pp.522-525.
- SIEWERT, T.; SAMARDZIC, I.; KOLUMBI, Z. (2002)**, *“Estimation of Process Stability in the Wag Welding Process by Monitoring the Welding Parameters”*, NIST, National Institute of Standards And Technology, USA, pp.1-12.
- SILVA, C.R.; FERRARESI, V.A.; SCOTTI, A. (2000)**, *“A Quality and Cost Approach for Welding Process Selection”*, J. of the Braz.Soc.Mechanical Sciences, Vol.XXII, n° .3, pp.389-398.
- SILVA, R. H. G. (2005)**, *“Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz”*. Dissertação de Mestrado, UFSC, Fevereiro, Santa Catarina, 128 pp.
- SOUZA, S. A. (1982)**, *“Ensaio mecânicos de materiais metálicos-Fundamentos Teóricos e Práticos”*, 5ª Ed. São Paulo, Editora Edgar Blücher Ltda, 286 p.

- STARLING, D.M.C. & MODENESI, P.J. (2005)**, “*Efeito da Polaridade do Eletrodo na Velocidade de Fusão de Arames Tubulares*”, Universidade Federal de Minas Gerais, Soldagem & Inspeção, Jul/set, vol.10, nº 3, pp.101-108.
- STARLING, D.M.C. & MODENESI, P.J. (2006)**, “*Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares*”, Universidade Federal de Minas Gerais, Soldagem & Inspeção, vol.11, nº 3, pp.147-155.
- SUBRAMANIAM, S. et al. (1998)**, “*Droplet transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum*”, Welding Journal, vol 77, n7, pp. 458-464.
- WAINER, E. et. al. (1992)**, “*Soldagem Processos e Metalurgia*”, Editora Edgard Blucher LTDA, SP, Brasil.
- WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E. (1995)**, “*Flux Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization*”, Welding Journal, v82, nº 3, pp.369s-377s.
- WIDGERY, D.J. (1988)**, “*Flux Cored Wire: An Update*”, Welding and Metal Fabrication, April, pp.88-94.
- WU, C. S. et al. (2004)**, “*Intelligent Monitoring and Recognition of the Short-Circuiting Gas Metal Arc Welding*”, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, September, pp.1145-1151.

APÊNDICE - A

A.1 TESTES EXPLORATÓRIOS

Na tentativa de ajustar os parâmetros de soldagem foram realizados vários testes exploratórios que serão detalhados a seguir sendo analisado com resposta a qualidade visual do cordão que aqui está relacionada com as condições geométricas dos cordões, o aspecto visual e a capacidade de conseguir fazer ou não a solda.

A Tabela A1, A2 e A3 apresentam algumas condições realizadas no laboratório de soldagem sendo os testes respectivamente realizados no modo de transferência por curto-circuito, com simples deposição, utilizando chapa de aço ABNT-1020.

A Tabela A4 mostra as condições de testes realizados com o modo de transferência pulsado, com simples deposição, mantendo fixos os parâmetros de pulso e variando a velocidade de alimentação, a velocidade de soldagem e deixando a tensão se alto ajustar.

Primeiramente na Tabela A1, foi mantido constante a vazão do gás (Q_e)=14l/min, gás=C25, $Ind._s = 9, Ind._d=9$, o ângulo de posição da tocha $\beta=11^\circ$, DBCP=11mm, variando os demais parâmetros com a tensão, velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem. A Tabela 2 mostra os testes realizados, variando a $Ind._s$ e $Ind._d$, a tensão, velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem e deixando fixos os parâmetros como: gás (C25); vazão do gás (Q_e) =14 l/min, o ângulo de inclinação da tocha $\beta =11^\circ$, DBCP=11 mm.

A Tabela A3 mostra os testes realizados variando o ângulo de inclinação da tocha, a tensão, velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem, mantendo fixos os parâmetros: DBCP=11 mm, Vazão do gás 15l/min, gás CO₂, Ind_s=9, Ind_d=9.

Tabela A1-Resultados obtidos para a qualidade visual do cordão de solda.

Testes	Tensão	va	vs	Qualidade
-	Volts	m/min	cm/min	-
1	18	2,6	25	Bom
2	18	3	30	Bom
3	18	3,5	35	Bom
4	18	2,6	30	Bom
5	19	3	35	Bom
6	19	3,5	25	Bom
7	21	2,6	35	Ruim
8	21	3	25	Bom
9	21	3,5	30	Bom
10	21	4	30	Bom
11	21	4,5	35	Ruim
12	21	4	25	Ruim

Tabela A2-Resultado obtido para a qualidade dos cordões de solda variando a indutância.

Testes	Tensão	va	vs	Ind. _s	Ind. _d	Qualidade
-	Volts	m/min	cm/min	-	-	-
1	18	2,6	25	3	9	Bom
2	18	3	30	3	9	Bom
3	18	3,5	35	3	9	Bom
4	18	4	25	3	9	Regular
5	21	2,6	25	3	9	Ruim
6	21	3,5	30	3	9	Bom
7	21	4,5	35	3	9	Bom
8	21	2,6	35	3	9	Péssimo
9	21	3	35	3	9	Bom
10	21	3	35	3	3	Bom
11	18	3	25	3	9	Ruim
12	18	3,5	25	3	3	Péssimo

Tabela A3-Qualidade visual do cordão variando a inclinação da tocha.

Teste	Tensão	va	vs	β	Qualidade
-	Volts	m/min	cm/min	°	-
1	21	3	35	10	Bom
2	21	3	35	15	Bom
3	21	3	25	15	Ruim
4	18	4	35	15	Regular
5	21	3	35	20	Péssimo
5	18	4	25	20	Ruim

Tabela A4-Resultado obtido para a qualidade visual do cordão.

Teste	Ip	tp	Ib	tb	va	vs	Qualidade
-	A	ms	A	ms	m/min	cm/min	-
1	300	2	50	6	4,5	30	Bom
2	300	2	50	6	4	30	Bom
3	300	2	50	6	4	25	Bom
4	300	2	50	6	4,5	25	Bom
5	300	2	50	6	3	25	Ruim
6	300	2	50	6	3	35	Ruim

A.2 OSCIOGRAMAS DOS TESTES-MODO CURTO-CIRCUITO

A análise da estabilidade do arco baseia-se na uniformidade da transferência de glóbulos do arame à poça de fusão. Quanto mais regular o processo de transferência, mais uniforme será a deposição de material, por este motivo alguns estudos foram realizados para se analisar a estabilidade do processo de transferência por curto-circuito, através da análise dos oscilograma em outras situações variando a tensão, a velocidade de alimentação e a indutância.

A Figura A1 apresenta o oscilograma da tensão, observa-se que ao efetuar a soldagem com uma tensão acima de 23Volts e velocidade de alimentação menor que 4,0m/min não houve ocorrência de transferência metálica no modo curto-circuito.

A Figura A2 mostra o oscilograma da corrente e tensão para a condição, V=22 Volts,

$v_a = 3$ min, $Ind = 9$, observa-se através dos sinais a ocorrência de curto-circuito. Apesar de que durante a soldagem apareceram perturbações associadas à transferência sem curto-circuito, que pode se observado pelo diagrama da tensão e corrente Figura A3.

A Figura A3 ilustra o diagrama da tensão e corrente para um período de aquisição de 900ms, observa-se que existem linhas que têm se desviado do contorno regular ABCD, comprovando assim variações irregulares do arco.

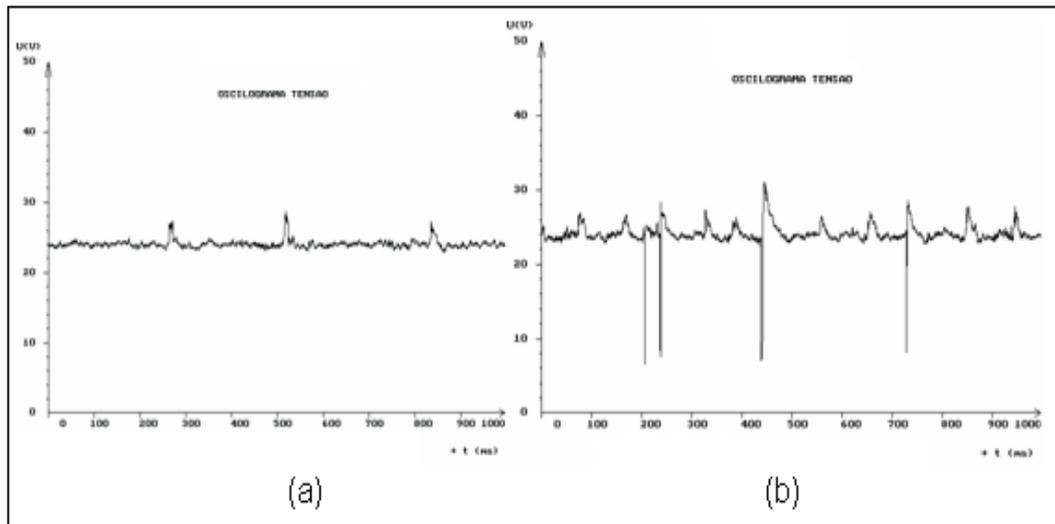


Figura A1-Oscilograma da tensão (24Volts) onde (a)=3m/min, e (b)=4m/min para transferência curto-circuito (Gomes, 2006).

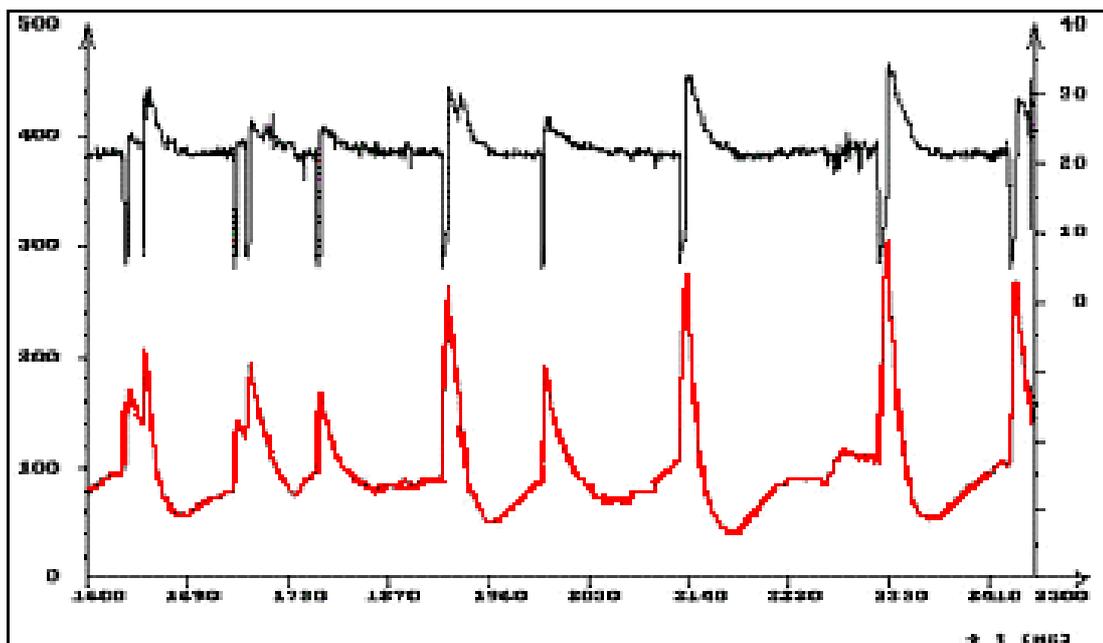


Figura A2-Oscilograma da corrente e tensão $V = 22$ Volts, $v_a = 3$ m/min, $Ind = 9$.

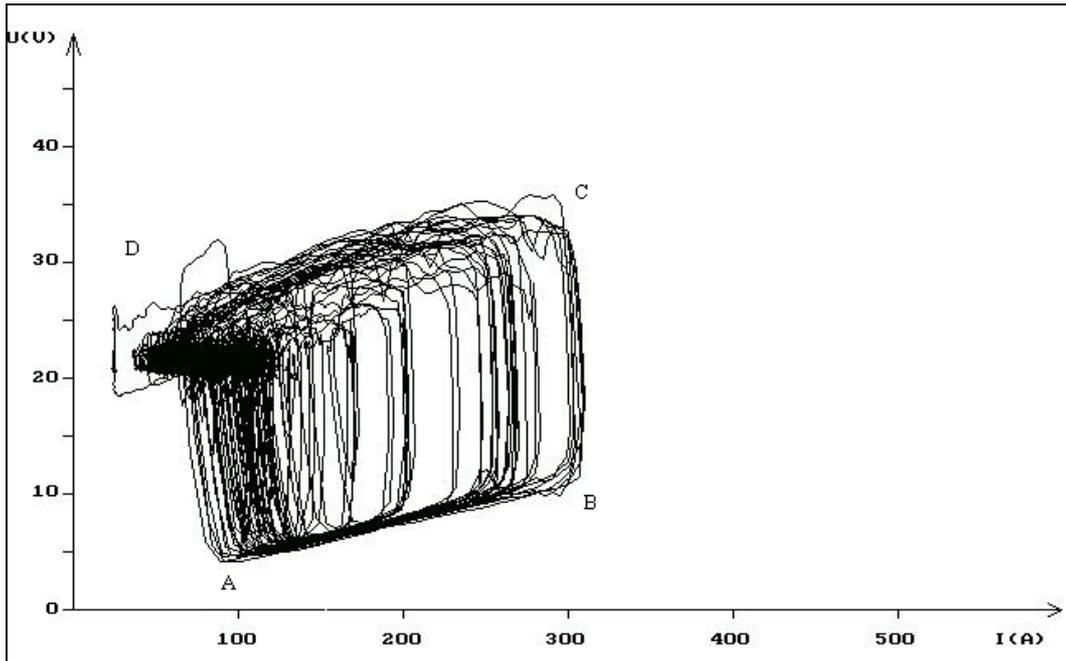


Figura A3-Diagrama da tensão e corrente=22 Volts, $v_a=4\text{m/min}$, $\text{Ind}=9$.

Analisando a Figura A4, a qual ilustra o oscilograma da corrente e tensão para a condição $V=19$ Volts, $v_a=4\text{m/min}$, $\text{Ind}=9$, observa-se pelos sinais uma transferência mais regular, com bastantes curtos-circuitos o que pode ser comprovado pela Figura A5.

A Figura A5 mostra o diagrama da corrente e tensão para um período de transferência de 500ms, nela observa-se que não existem linhas verticais desviando do contorno regular ABCD, comprovando assim uma boa regulagem da transferência.

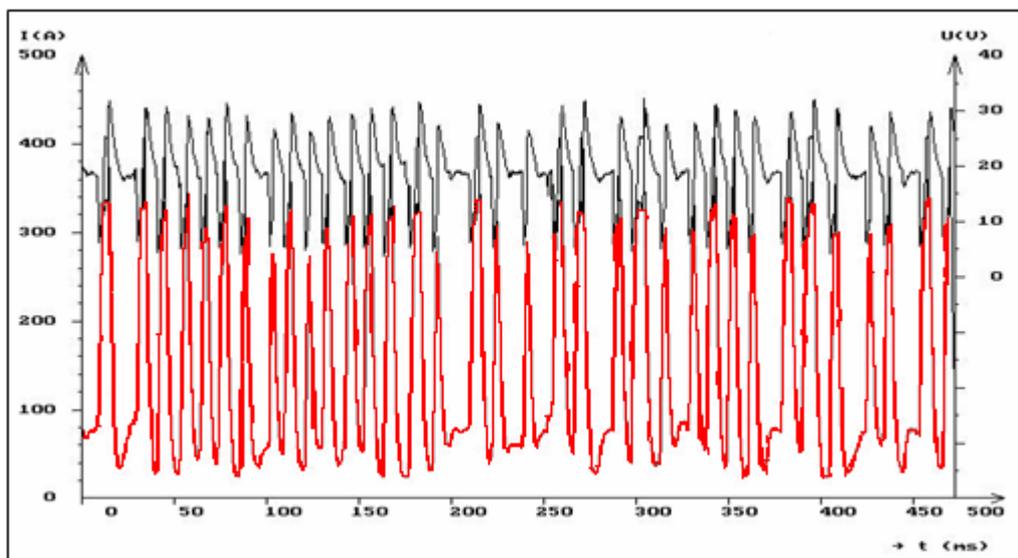


Figura A4- Oscilograma da corrente e tensão $V=19$ Volts, $v_a=4\text{m/min}$, $\text{Ind}=2$.

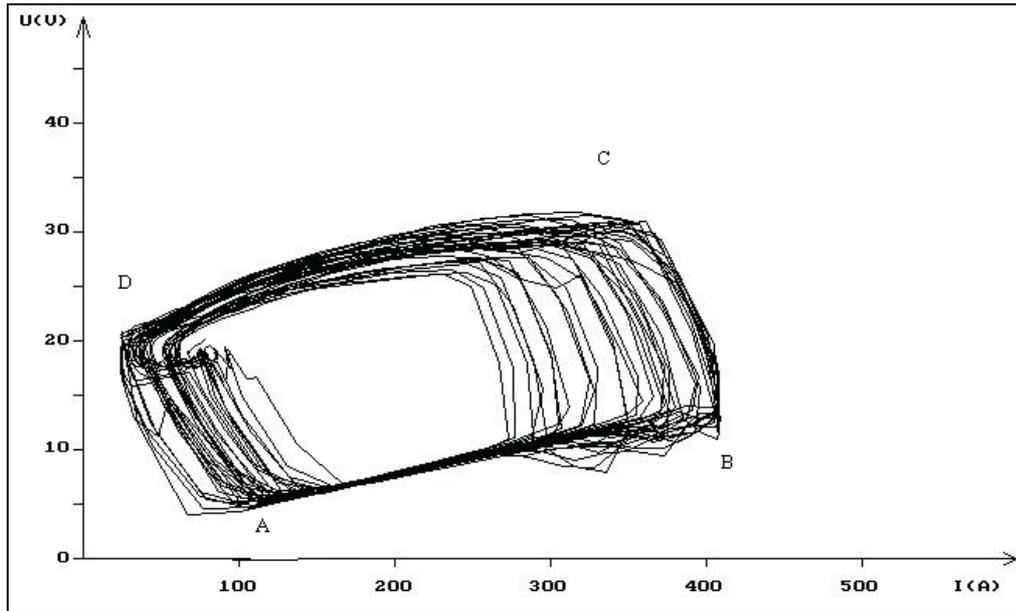


Figura A5-Diagrama da corrente e tensão $V=19$ Volts, $v_a=4$ m/min, $Ind=2$.