

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA
METÁLICA NO PROCESSO GMAW-S EM SOLDAGEM
ORBITAL**

LISSY YOJANA HURTADO MENESES

ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 65A/13

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO – 2013

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA
NO PROCESSO GMAW-S EM SOLDAGEM ORBITAL**

LISSY YOJANA HURTADO MENESES

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, PhD. (ENM - UnB)
(Orientador)**

**Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, PhD. (ENM/UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Eduardo de Magalhães Braga, Dr. (ENM/UFPA)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 29 DE NOVEMBRO DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

MENESES, LISSY YOJANA HURTADO.

Modelagem e simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital [Distrito Federal] 2013.

xvii, 174p. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2013).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|---------------------|----------------------------|
| 1. Processo GMAW-S. | 2. Simulação. |
| 3. Modelagem. | 4. Transferência metálica. |
| 5. Soldagem Orbital | 6. Estabilidade. |

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENESES, L. Y. H. (2013). Modelagem e simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-65A/13, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174p.

CESSÃO DE DEREITOS

AUTOR: Lissy Yojana Hurtado Meneses.

TÍTULO: Modelagem e simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Lissy Yojana Hurtado Meneses
SCRN 704/5 Entrada 34 Bloco G, Sala 300.
70.730-670 – Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

À Deus, razão do meu viver.

À Santíssima Virgem Maria.

Aos meus pais, Diomelina e Orlando.

À minha irmã, Yania Carolina.

AGRADECIMIENTOS

Quero agradecer inicialmente a Deus por esta grande oportunidade de estudo e superação.

À universidade de Brasília por me aceitar em sua prestigiosa instituição e à CAPES pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, Diomelina e Orlando e a minha irmã Yania, pelo apoio e amor incondicional, por serem minha fonte de energia e por me ajudar a superar momentos de dúvida, incentivando-me a continuar sempre com muito carinho.

Ao meu namorado Heidelberg, por estar ao meu lado durante todo esse período, pelo apoio, compreensão e amor.

À família Muñoz Cajas por se tornar a minha família aqui no Brasil.

Ao Eber pela amizade e apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus colegas e amigos do GRACO, Margarita, Andrés, Jairo e Jesus, pela ajuda, conselhos e também pelas alegrias compartilhadas.

Ao Professor Sadek pela orientação, ensinamentos e confiança depositada.

Aos professores Guilherme Caribé, Carlos Llanos, Mauricio Motta e demais pelos ensinamentos.

Ao Marrocos, pela sua ajuda e assistência.

Aos meus amigos Alex, Diana, Milton, Laura, Carolina e Rosio, pelos inesquecíveis momentos de convivência.

RESUMO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW-S EM SOLDAGEM ORBITAL

A procura por processos de soldagem versáteis e de alta produtividade é uma necessidade contínua, em especial na união de dutos que representam o cerne no escoamento dos mais diferentes fluidos na área de petróleo e gás. A soldagem orbital refere-se ao processo de união de dutos e tubulações. A soldagem fora da posição plana e a própria geometria da peça de trabalho tornam o processo complicado, devido à variação contínua da posição de soldagem, o que constitui uma constante mudança no comportamento das forças que atuam sobre a gota de metal fundido e altera a dinâmica da transferência de metal. Este evento faz com que a solda apresente problemas de qualidade, pelo escoamento da poça de fusão e a instabilidade na transferência metálica.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento e implementação de um modelo híbrido que representa o processo GMAW na soldagem orbital, construído sob a aplicação de um tratamento físico e matemático específico para a modelagem dos períodos de formação, crescimento e transferência da gota, que compõem o modo de transferência por curto circuito, a fim de compreender os fenômenos físicos e dinâmicos envolvidos no processo. As respostas obtidas pelo modelo foram complementadas com o estudo da estabilidade da transferência de metal em experimentos reais, para ter uma visão global que combine o conhecimento obtido pela análise de experiências reais conduzidas, com os resultados gerados por ferramentas computacionais. Após a análise das respostas obtidas, os procedimentos desenvolvidos nesta pesquisa foram expostos a uma regra de regulação de parâmetros, para mitigar os efeitos da variação da posição de soldagem e melhorar a estabilidade da transferência metálica. Os resultados apresentados foram satisfatórios e se refletem na melhoria da aparência e qualidade do cordão de solda. Destaca-se que o modelo pode ser utilizado para o estudo do controle da transferência de metal, bem como para o estudo da escolha de parâmetros adequados para soldagem, com o objetivo de alcançar um elevado nível de qualidade da junta soldada em diferentes condições.

ABSTRACT

MODELING AND SIMULATION OF METAL TRANSFER IN THE GMAW-S PROCESS IN ORBITAL WELDING

Demand for welding versatile processes and high productivity is an ongoing need, particularly in the union of ducts that represent the core in the flow of the different fluids in the field of oil and gas. The orbital welding refers to the process of union of ducts and pipes. The welding outside the plane position and the own geometry of the work piece make the process complicated, due to the continuously variation in the welding position, which is a constant change in the behavior of the forces acting on the molten metal droplet, and changes the dynamics of metal transfer. This event causes the solder present quality problems by runoff of the molten pool and the instability in metal transfer.

This paper proposes the development and implementation of a hybrid model that represents the GMAW process in the orbital welding, built under the application of specific physical and mathematical treatment for the modeling of periods of formation, growth and transfer of the drop, which compose mode transfer by short circuit, in order to understand the physical and dynamical phenomena involved. The responses obtained by the model were complemented with the study of stability of metal transfer in real experiments, to have a global vision that combines the knowledge gained by analyzing real experiments with the results generated by computational tools. After the analysis of responses, the procedures developed in this study were exposed to a regulation rule of parameters, in order to mitigate the effects of the variation of welding position and improve the stability of metal transfer. The results were satisfactory and were reflected in the improvement of the appearance and quality of the weld. It is noteworthy that the model can be used to study the control of metal transfer, as well as to study the choice of appropriate parameters for welding, in order to achieve a high level of quality of the welded joint in different conditions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	HISTÓRICO	5
2.2	PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	6
2.3	PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW.....	8
2.3.1	Princípio de funcionamento.....	8
2.3.2	Gases de proteção para GMAW	9
2.3.3	Equipamentos do processo GMAW	11
2.3.4	Variáveis do Processo GMAW.....	14
2.4	Transferência Metálica.....	16
2.5	Transferência Metálica por Curto- Circuito.....	18
2.6	Estabilidade na Transferência Metálica	20
2.7	Soldagem Orbital	23
2.7.1	Posições Adoptadas no Tubo.....	24
2.7.2	Posições de Soldagem Orbital	25
2.7.3	Ângulo de posicionamento do eletrodo.....	25
3	PANORÂMICA DOS TRABALHOS ANTERIORES E RELACIONADOS.....	28
3.1	MODELAGEM DO PROCESSO GMAW	28
3.2	ESTUDO DO DESTACAMENTO DA GOTA DE METAL FUNDIDO E TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM GMAW	34
3.3	ESTUDOS FORA DA POSIÇÃO PLANA.....	41
3.4	FORÇAS AGINDO SOBRE A GOTA DE METAL FUNDIDO	45
4	METODOLOGIA	48

4.1	GENERALIDADES DA MODELAGEM DO PROCESSO GMAW-S COMO SISTEMA HÍBRIDO NA SOLDAGEM ORBITAL	48
4.2	MODELAGEM PARA O PERÍODO DE ARCO	50
4.2.1	Forças agindo sobre a gota no período de arco	50
4.2.2	Componentes do sistema GMAW-S no período de arco.....	56
4.2.3	Sistema elétrico no período de arco.....	58
4.2.4	Equações do modelo GMAW-S para o período de arco	60
4.3	MODELAGEM PARA O PERÍODO DE CURTO - CIRCUITO.....	62
4.3.1	Forças agindo sobre a gota no período de curto-circuito.....	63
4.3.2	Comportamento do sistema GMAW-S no período de curto-circuito.....	65
4.3.3	Sistema elétrico no período de curto-circuito.....	70
4.3.4	Equações do modelo GMAW-S para o período de curto-circuito.....	70
4.4	DESEMPENHO DO MODELO HÍBRIDO	71
4.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	72
4.5.1	Experimentos sem regulação de parâmetros	73
4.5.2	Experimentos com a regra de regulação de parâmetros	75
4.6	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	76
4.6.1	Bancada experimental.....	76
4.6.2	Equipamentos	78
4.6.3	Materiais e insumos utilizados	81
4.7	ESTUDO DA ESTABILIDADE NA DINÂMICA DE TRANSFERÊNCIA DE METAL.....	82
4.8	REGRA DE REGULAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	84
5	RESULTADOS	88
5.1	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO	88
5.2	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS SEM REGULAÇÃO DE PARÂMETROS.....	94

5.2.1	Resultados da análise da estabilidade na transferência metálica nas soldas sem regulação de parâmetros	95
5.3	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO SEM REGULACAO DE PARAMETROS.....	134
5.4	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM REGULAÇÃO DE PARÂMETROS.....	142
5.5	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO MODELO COM REGULAÇÃO DE PARÂMETROS.....	150
6	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	153
7	CONCLUSÕES.....	161
7.1	TRABALHOS FUTUROS	163
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	164
	APÊNDICES	173
A-	MODELO HÍBRIDO.....	174

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Classificação dos processos de soldagem	7
Figura 2.2:	Esquema da Soldagem GMAW.	8
Figura 2.3:	Equipamento básico para a soldagem GMAW (Dobignies, 2008).	12
Figura 2.4:	Classificação das variáveis do processo GMAW	14
Figura 2.5:	Parâmetros diretos e indiretos do processo de Soldagem GMAW (modificado - [9])	15
Figura 2.6:	Esquema dos tipos de transferência metálica em GMAW (Modenesi e Bracarense, 2011).	17
Figura 2.7:	Transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW (modificado - (Silva, 2005).	19
Figura 2.8:	Oscilograma de corrente e tensão para o modo de transferência por curto-circuito (modificado (ESAB, 2005b))	21
Figura 2.9:	Soldagem manual de dutos (Pharris e Kolpa, 2007).	23
Figura 2.10:	Posições de soldagem adoptadas no tubo	24
Figura 2.11:	Posições do tubo na soldagem orbital (Fronius, 2010)	25
Figura 2.12:	Técnica de soldagem puxando y empurrando na seção vertical descendente do tubo.	26
Figura 2.13:	Ângulos de posicionamento do eletrodo (ESAB, 2004).	26
Figura 2.14:	Planos de referência para o Ângulo de posicionamento do eletrodo (ESAB, 2004).	27
Figura 4.1	Comportamento do sistema híbrido.	48
Figura 4.2:	Comportamento dos sinais de tensão e corrente em GMAW-S.	49
Figura 4.3:	Relação entre o comportamento das linhas de corrente com o ângulo de condução e direção da Fem.	52
Figura 4.4:	Comportamento de fz em relação ao ângulo de condução (θ).	54
Figura 4.5:	Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente convergentes	55
Figura 4.6:	Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente convergentes na posição sobre cabeça.	55

Figura 4.7:	Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente divergentes.....	55
Figura 4.8:	Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente divergentes na posição sobre cabeça.	56
Figura 4.9:	Localização dos comprimentos dos parâmetros no período de arco.....	57
Figura 4.10:	Equivalente do circuito elétrico do sistema na fase de arco.	59
Figura 4.11:	Representação da fracção do eletrodo fundido pela relação entre MR e var	61
Figura 4.12:	Comportamento das forças (a) no período de arco, (b) no período de curto-circuito.....	65
Figura 4.13:	Raios principais da ponte metálica.....	65
Figura 4.14:	Cálculo do raio $R1$ a partir de três pontos na curva de raio $R2$	66
Figura 4.15:	Evolução da ponte metálica	67
Figura 4.16:	Esquema da lei de continuidade de fluidos na ponte metálica.	69
Figura 4.17:	Esquema do modelo GMAW híbrido.	72
Figura 4.18:	Montagem experimental para a realização dos testes.	77
Figura 4.19:	Planta experimental de soldagem orbital	78
Figura 4.20:	Equipamentos Fronius (a) Fonte de soldagem, (b) Alimentador de arame.	79
Figura 4.21:	Placa de aquisição de dados USB-6009.....	81
Figura 4.22:	Esquema da classificação do eletrodo.....	82
Figura 5.1:	Esquema de ajuste dos parâmetros do modelo híbrido	90
Figura 5.2:	Validação do modelo híbrido para experimentos com $var = 5,5$ e (a) $vsold = 14$ mm/s, (b) $vsold = 13$ mm/s, (c) $vsold = 12$ mm/s.	92
Figura 5.3:	Validação do modelo híbrido para experimentos com $var = 6,0$ e (a) $vsold = 14$ mm/s, (b) $vsold = 13$ mm/s, (c) $vsold = 12$ mm/s.	93
Figura 5.4:	Divisão do tubo de acordo com a posição de soldagem.	94
Figura 5.5:	Divisão do sinal de tensão para a análise de estabilidade de transferência..	95
Figura 5.6:	Visual da solda A2 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).....	97
Figura 5.7:	Visual da solda A3 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).....	98
Figura 5.8:	Visual da solda A4 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).....	99
Figura 5.9:	Visual da solda B1 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).....	100
Figura 5.10:	Visual da solda B2 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).....	101
Figura 5.11:	Visual da solda B3 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).....	102
Figura 5.12:	Visual da solda B4 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).....	103

Figura 5.13:	Visual da solda B5 ao longo do tubo (0°- 180°).	104
Figura 5.14:	Visual da solda B6 ao longo do tubo (0°- 180°).	105
Figura 5.15:	Visual da solda B7 ao longo do tubo (0°- 180°).	106
Figura 5.16:	Visual da solda B8 ao longo do tubo (0°- 180°).	107
Figura 5.17:	Visual da solda B9 ao longo do tubo (0°- 180°).	108
Figura 5.18:	Visual da solda B10 ao longo do tubo (0°- 180°).	109
Figura 5.19:	Visual da solda B11 ao longo do tubo (0°- 180°).	110
Figura 5.20:	Visual da solda B12 ao longo do tubo (0°- 180°).	111
Figura 5.21:	Visual da solda B13 ao longo do tubo (0°- 180°).	112
Figura 5.22:	Visual da solda B14 ao longo do tubo (0°- 180°).	113
Figura 5.23:	Visual da solda B15 ao longo do tubo (0°- 180°).	114
Figura 5.24:	Visual da solda B16 ao longo do tubo (0°- 180°).	115
Figura 5.25:	Visual da solda B17 ao longo do tubo (0°- 180°).	116
Figura 5.26:	Visual da solda B18 ao longo do tubo (0°- 180°).	117
Figura 5.27:	Visual da solda B19 ao longo do tubo (0°- 180°).	118
Figura 5.28:	Visual da solda B20 ao longo do tubo (0°- 180°).	119
Figura 5.29:	Visual da solda B21 ao longo do tubo (0°- 180°).	120
Figura 5.30:	IVcc em função do ângulo de soldagem para as soldas (A2 - B9).	121
Figura 5.31:	Desvio padrão $\sigma IVcc$ em fusão da tensão de soldagem das soldas (A2-B9).	122
Figura 5.32:	Fcc em função do ângulo de soldagem para as soldas (A2 - B9).	123
Figura 5.33:	Desvio padrão σFcc em função da tensão de soldagem das soldas (A2-B9).	123
Figura 5.34:	FLT em função do ângulo de soldagem para as soldas (A2 - B9).	125
Figura 5.35:	Desvio padrão σFLT em função da tensão de soldagem das soldas (A2-B9).	125
Figura 5.36:	Período de curto circuito em função do ângulo de soldagem para as soldas com $var=6$ m/min.	126
Figura 5.37:	Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $var=6$ m/min.	127
Figura 5.38:	Índice de regularidade de transferência em função do ângulo de soldagem para soldas com $var= 5,5$ m/min.	128
Figura 5.39:	Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $var=5,5$ m/min.	129

Figura 5.40: Freqüência de curto circuito em função do ângulo de soldagem para soldas com $var=5,5$ m/min.	129
Figura 5.41: Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $var=5,5$ m/min.....	130
Figura 5.42: (FLT) em função do ângulo de soldagem para soldas com $var=5,5$ m/min.	131
Figura 5.43: Desvio padrão do fator (σFLT) para as soldas com $var=5,5$ m/min.....	131
Figura 5.44: Período de transferência em função do ângulo de soldagem para soldas com $var=5,5$ m/min.....	132
Figura 5.45: Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $var=5,5$ m/min.....	132
Figura 5.46: Índice de regularidade e desvio padrão (a) IV_{cc} , (b) F_{cc} , (c) FL_T , (d) T, das soldas selecionadas B9 e B14.....	134
Figura 5.47: Respostas dos estados do modelo híbrido proposto (a) X1, (b) X2, (c) X3, (d) X4, (e) X5.	136
Figura 5.48: Condições para a mudança de período no modelo híbrido (a) comprimento efetivo, (b) raio R_1	138
Figura 5.49: Comportamento de outros parâmetros no modelo (a) taxa de fusão do eletrodo, (b) evolução do comprimento do arco, (c) volume atingido pela gota metálica.	139
Figura 5.50: Comportamento da força de gravidade na posição vertical descendente da soldagem orbital.	140
Figura 5.51: Comportamento da força eletromagnética na posição vertical descendente da soldagem orbital.	141
Figura 5.52: Influência de fatores de atenuação exploratórios nos índices da estabilidade da transferência de metal.	143
Figura 5.53: Comportamento dos parâmetros de referência (a) corrente de soldagem, (b) tensão de soldagem, (c) velocidade de alimentação de arame, (d) velocidade de soldagem, segundo o fator de regulação f	145
Figura 5.54 : Análise de regularidade (a) IV_{cc} , (b) F_{cc} , (c) FLT , (d) T, na transferência de metal para as soldas com regulação de parâmetros.	147
Figura 5.55: Parâmetros de corrente e tensão das provas com regulação.	148
Figura 5.56: Funcionamento da regra de regulação como o memodelo híbrido.	150

Figura 5.57: Estados do modelo híbrido com regulação de parâmetros, (a) X1, (b) X2, (c) X3, (d) X4, (e) X5.	152
Figura A1: Modelo híbrido em <i>simulink</i>	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1:	Parâmetros ótimos de soldagem na posição plana.....	73
Tabela 4.2:	Planejamento experimental, sem regulamentação de parâmetros	74
Tabela 4.3:	Parâmetros aplicados na fase exploratória de regulação	76
Tabela 4.4:	Composição química e propriedades mecânicas do eletrodo.	82
Tabela 5.1:	Testes iniciais sem regulação de parâmetros	89
Tabela 5.2:	Parâmetros do modelo híbrido.....	91
Tabela 5.3:	Índices de estabilidade para cada secção da solda A2.....	97
Tabela 5.4:	Índices de estabilidade para cada secção da solda A3.....	98
Tabela 5.5:	Índices de estabilidade para cada secção da solda A4.....	99
Tabela 5.6:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B1	100
Tabela 5.7:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B2	101
Tabela 5.8:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B3	102
Tabela 5.9:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B4	103
Tabela 5.10:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B5	104
Tabela 5.11:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B6	105
Tabela 5.12:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B7	106
Tabela 5.13:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B8	107
Tabela 5.14:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B9	108
Tabela 5.15:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B10.....	109
Tabela 5.16:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B11	110
Tabela 5.17:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B12	111
Tabela 5.18:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B13	112
Tabela 5.19:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B14	113
Tabela 5.20:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B15	114
Tabela 5.21:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B16.....	115
Tabela 5.22:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B17	116
Tabela 5.23:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B18	117
Tabela 5.24:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B19	118
Tabela 5.25:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B20	119
Tabela 5.26:	Índices de estabilidade para cada secção da solda B21	120

Tabela 5.27: Parâmetros de entrada para o modelo híbrido.	134
Tabela 5.28: Parâmetros de referencia para a regra de regulação.	142
Tabela 5.29: Comparação visual entre os cordões de solda, com e sem regulação de parâmetros.	149

LISTA DE ABREVIACÕES

Abreviatura	Significado
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CC	<i>Curto-Circuito</i>
crp	<i>Com regulação de parâmetros</i>
DBCP	<i>Distância Bico De Contato/Peça</i>
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i>
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i>
DWP	<i>Direct welding parameters</i>
EM	<i>European norms</i>
Fcc	<i>Frequência de curto-circuito</i>
FCAW	<i>Flux Cored Arc welding</i>
GRACO	<i>Grupo de Automatização e Controle</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GMAW-S	<i>Gas Metal Arc Welding – Short Circuit Mode</i>
GTAW	<i>Gas Tungteno Arc Welding</i>
IVcc	<i>Índice de Vilarinho da Transferência em Curto-Circuito</i>
IWP	<i>Indirect Welding Parameters</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MIMO	<i>Multi-Input-Multi-Output</i>
NI	<i>National Instruments</i>
PGMAW	<i>Pulsed Gas Metal Arc Welding</i>

PIT	Pinch Instability Theory
SAW	Submerged Arc Welding
SFA	<i>Spent Fuel Assemblies</i>
SFBT	<i>Static Force Balance Theory</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SISO	Single-Input-Single-Output
srp	<i>Sem regulação de parâmetros</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_1	Área do centro da ponte	m^2
A_2	Área da zona de contato	m^2
B	Campo magnético	A/m
C_1	Constante de aquecimento por arco	m^3/As
C_2	Constante de aquecimento por efeito Joule	m^3/VAs
D	Taxa de deposição	Kg/m
D_d	Deslocamento da gota	m
ρ	Resistividade linear	V/Am
ρ_e	Densidade do eléctrodo	kg/m^3
E	Campo elétrico	N/C
E_a	Fator do comprimento de arco	V/m
f	Fator de regulação	%
F_{em}	Força eletromagnética	N

F_g	Força de gravidade	N
FL_T	Fator L_T de regularidade de transferência	
$f1_{cc}$	Fator de curto circuito	
\hat{F}_{TT}	Força média total exercida na transferência de massa	N
F_s	Tensão superficial	N
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
h	Fração do eletrodo fundido	m
H	Aporte térmico	J/mm
H_d	Altura da ponte metálica	m
I	Corrente de soldagem	A
I_{ref}	Corrente de soldagem de referência	A
J	Densidade de corrente	A/m ²
l_a	Comprimento de arco	m
l_e	Comprimento do eletrodo em estado sólido	m
L_{ef}	Comprimento efetivo	m
L_{eft}	Comprimento efetivo instantâneo	m
L_f	Indutância da à fonte	H
m_d	Massa da gota	Kg
M_R	Taxa de fusão	m ³ /s
γ	Módulo de tensão superficial	N/m
R	Resistência dos condutores eléctricos	Ω
R_a	Resistência do arco eléctrico	Ω
r_d	Raio da gota	m

r_e	Raio do eletrodo	m
R_f	Resistência da fonte	Ω
r_{tb}	Raio do tubo	m
R_1	Raio principal da ponte metálica	m
R_2	Raios principal da ponte metálica	m
P_{avg}	Pressão média sobre a ponte metálica	N/m^2
T	Período de curto circuito	s
t_{ab}	Tempo de arco aberto	s
t_{cc}	Tempo de curto-circuito	s
μ_0	Constante de permeabilidade magnética	$Kg\ mA^{-2}s^{-2}$
U_a	Tensão do arco	V
U_M	Pressão de Lorentz	N/m^2
U_o	Constante a tensão do arco	V
U_{oc}	Tensão de soldagem	V
v	Velocidade do fluxo na parte central da ponte metálica	m/s
v_{ar}	Velocidade de alimentação do arame	m/min
V_d	Volume da gota	m^3
v_{sold}	Velocidade de soldagem	mm/s
$v_{soldref}$	Velocidade de soldagem de referência	mm/s
v_{arref}	Velocidade de alimentação de arame de referência	m/min
V_{ref}	Tensão de soldagem de referência	V
v_{zc}	Velocidade na zona de contato	m/s
v_1	Velocidade do fluxo no centro da ponte	m/s

v_2	Velocidade do fluxo na da zona de contato	m/s
X_1	Deslocamento da gota na ponta do eletrodo	m
X_2	Velocidade de deslocamento da gota	m/s
X_3	Corrente de soldagem	A
X_4	Comprimento do eletrodo no estado sólido	m
X_5	Massa da gota	Kg
θ	Ângulo de condução	°
φ	Posição de soldagem	°
$\sigma f_{1_{cc}}$	Desvio padrão do fator de curto circuito	
σF_{cc}	Desvio padrão da frequência de curto-circuito	Hz
σFL_T	Desvio padrão fator L_T de regularidade	
σIV_{cc}	Desvio padrão do índice de Vilarinho	
T	Desvio padrão do período de curto circuito	s
σt_{ab}	Desvio padrão tempo de arco aberto	
σt_{cc}	Desvio padrão tempo de curto-circuito	
$\Delta P:$	Diferença de pressão através da interface do fluido	

1 INTRODUÇÃO

A soldagem orbital é um processo para a união de tubos de pequeno e grande porte, com aplicações nas indústrias alimentícia, farmacêutica, petroquímica, nuclear e energia térmica, entre outras. O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é convencionalmente utilizado para tais fins, devido a sua versatilidade e produtividade elevada. No entanto, apresenta algumas dificuldades associadas com a definição correta dos parâmetros de soldagem, o que leva a uma perda de qualidade da soldagem.

A transferência do metal tem sido identificada como um dos fatores que influenciam a qualidade da solda. No entanto, existem muitas lacunas a serem preenchidas sobre o tema, especialmente se aplicada à soldagem orbital.

A modelagem matemática tem sido utilizada como uma ferramenta importante para descrever os aspectos físicos e operacionais do processo GMAW, visando a melhorar a qualidade da soldagem. Porém, devido à complexidade dos fenômenos físicos envolvidos, muitos aspectos ainda carecem de melhor entendimento. Isso é mais evidente na modelagem do processo GMAW no modo de transferência por curto-circuito (método adequado para soldagens fora de posição plana pela facilidade de controle sobre a poça de fusão), uma vez que, em muitos casos, os fenômenos envolvidos foram abordados sob a mesma perspectiva dos processos de soldagem com transferência metálica por voo livre (globular ou goticular), gerando resultados que estão longe de serem os eventos reais.

Destarte, faz-se necessário observar que na transferência metálica por curto-circuito, a gota não é destacada do eletrodo; portanto, não há transferência através do arco por voo livre. Alguns autores identificaram dois períodos relevantes do processo, correspondentes ao período de arco e período de curto-circuito, onde se dão a formação, o crescimento e a transferência de gota metálica, respectivamente. No entanto, a representação dos fenômenos envolvidos no período de curto-circuito ocorre após as adaptações do período arco. E ainda, a informação disponível é muito escassa e pouco explicativa, dificultando o uso dos modelos prévios para execução direta, uma vez que por estarem representados por equações não lineares, a sua transcrição direta em meios computacionais não é suficiente para conhecer as respostas do processo e avaliar os resultados obtidos.

As razões destacadas anteriormente influenciaram o desenvolvimento do presente trabalho objetivando desenvolver a modelagem e a simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital, por meio da aplicação de conceitos físicos e matemáticos que representaram especificamente os fenômenos envolvidos no período de arco e curto-circuito, a fim de fornecer informação do processo não disponível pela aquisição direta dos sinais.

O presente estudo propõe o desenvolvimento independente de dois modelos que representem os fenômenos envolvidos exclusivamente no período de arco e curto-circuito. Tais modelos tem por base um conjunto de equações que descrevem os aspectos relacionados aos componentes do sistema, características operacionais da fonte de energia e as forças que comandam o comportamento da gota em cada fase. Posteriormente, estes foram unificados alternando consecutivamente os períodos de arco e de curto-circuito através das condições de mudança, constituindo um modelo híbrido que descreve o processo GMAW-S na soldagem orbital.

Para uma visão global das respostas do processo à variação de parâmetros de entrada, as alterações no comportamento dinâmico foram estudadas a partir da análise de estabilidade da transferência de metal nos sinais das soldas obtidas experimentalmente, em condições normais de operação e sob a aplicação de uma regra de regulação de parâmetros.

Nas linhas que serão apresentadas a seguir, espera-se que o modelo e os resultados obtidos possam contribuir como ferramentas para o estudo e controle da transferência metálica, bem como para a escolha adequada de parâmetros de soldagem, visando atingir um melhor nível de qualidade na soldagem.

A seguir, tem-se a seguinte organização de capítulos no presente estudo:

Capítulo 1: apresenta os objetivos da presente pesquisa;

Capítulo 2: apresenta uma visão geral dos conceitos teóricos da soldagem necessários para a compreensão da temática abordada;

Capítulo 3: aborda o estado da arte, que abrange as pesquisas na soldagem relacionadas ao tema de estudo aqui proposto;

Capítulo 4: apresenta a metodologia utilizada para a elaboração do presente trabalho, bem como a descrição dos equipamentos empregados para tal finalidade;

Capítulo 5: expõe os resultados obtidos;

Capítulo 6: apresenta a discussão dos resultados;

Capítulo 7: apresenta as conclusões e os trabalhos futuros para a continuidade da pesquisa aqui apresentada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver a modelagem e a simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital, por meio da aplicação de conceitos físicos e matemáticos que representem especificamente os fenômenos envolvidos no período de arco e curto-circuito, a fim de fornecer informação do processo não disponível pela aquisição direta dos sinais.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para o alcance do objetivo principal, têm-se os seguintes objetivos secundários:

- Desenvolver um modelo matemático que represente os fenômenos físicos envolvidos exclusivamente no período de arco.
- Desenvolver um modelo matemático que represente os fenômenos físicos envolvidos somente no período de curto-circuito.
- Unificar os dois modelos propostos na fase anterior a fim de se obter uma representação completa do processo GMAW-S na soldagem orbital.
- Adaptar as constantes do modelo visando a obtenção de respostas semelhantes àquelas obtidas experimentalmente.
- Simular computacionalmente o modelo híbrido proposto para avaliar o comportamento dos fenômenos envolvidos na transferência metálica.
- Analisar experimentalmente a estabilidade da transferência metálica, a fim de complementar o conhecimento gerado pelo modelo proposto.
- Desenvolver um programa de *software* para a análise dos sinais obtidos do modelo e as provas experimentais.

- Identificar os parâmetros de tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem, que geram as melhores condições na estabilidade da transferência metálica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO

Atualmente, a soldagem é uma técnica utilizada globalmente para infinitas aplicações na indústria. Sua versatilidade na ligação dos metais a tornaram indispensável para o desenvolvimento de projetos, que vão desde a união de uma cadeira com uma estrutura de metal, até a criação de navios e estruturas sofisticadas. No entanto, o seu desenvolvimento e sua implementação não teria sido possíveis sem o conhecimento da soldagem existente em tempos passados.

A história mostra que os primeiros sinais de soldagem foram feitos há 3.000 anos, pelo aquecimento e subsequente martelamento das peças na área que queria se juntar. Devido ao avanço do conhecimento e a descoberta de metais, o homem começou a desenvolver uma técnica chamada de soldabrasagem, onde se tinha a união de dois metais de natureza igual ou diferente pela adição de uma liga de outro metal, com um ponto de fusão abaixo da base.

A industrialização e as guerras mundiais influenciaram o rápido avanço da soldagem, mostrando os primeiros rasgos de como a referida técnica é conhecida atualmente. Naquela época, foram inventados métodos básicos de soldagem conhecidos como soldagem por resistência, gás e arco, cujo princípio do desenvolvimento em cada caso se deu por uma série de eventos importantes, marcados pelo avanço do conhecimento no campo da soldagem (ESAB, 2005a).

A soldagem por resistência data de 1856, quando James conseguiu a fusão e a soldagem de arames de cobre através de aquecimento por resistência elétrica. As primeiras máquinas de soldagem por resistência foram utilizadas para soldagem de topo. A descoberta de acetileno, por Edmund Davy, levou ao desenvolvimento da soldagem a gás no século XIX, onde foi utilizada uma chama óxido combustível, que, anos mais tarde e com a invenção da tocha, se tornaria numa importante ferramenta para a soldagem e o corte de aço devido às altas temperaturas identificadas – cerca de 31.000° C. A descoberta do arco elétrico por Sir Humphrey Davy, em 1810, deu início à soldagem a arco. Posteriormente, em 1881, Nikolai Bernardos apresentou um método com base na geração de um arco elétrico produzido entre

um eletrodo de carvão e a peça metálica de trabalho – técnica que em 1890 foi aperfeiçoada por Nicolai Slavianoff, ao utilizar uma vareta de metal como eletrodo ao invés de carvão, gerando dupla funcionalidade como fonte de calor, quanto metal de adição ao se-derreter. Em 1907, Oscar Kjellberg inventou o eletrodo revestido, a fim de melhorar as imperfeições da solda, geradas pelo método descrito anteriormente (ESAB, 2005a).

O método conhecido como TIG (*Tungsten Inert Gas*), foi desenvolvido em 1890 por C. L. Coffin, onde as soldaduras a arco são feitas em um ambiente de gás protetor inerte. A soldagem GMAW (*Gás Métal Arc Welding*) foi introduzida por Lyubavskii e Novoshilov, pelo uso de um gás ativo de proteção (CO₂); Posteriormente, foram introduzidas outras formas de soldagem a laser e fricção.

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

A soldagem é definida, segundo a Sociedade Americana de Soldagem, como o processo de coalescência localizado de metais ou não metais, produzido por aquecimento dos materiais à temperatura de fusão, com ou sem aplicação de pressão ou metal de adição (*Naindu, et al., 2003*); A maioria dos processos de soldagem precisa de altas temperaturas, e sua classificação depende dos métodos empregados para produzir a união almejada. O princípio de operação engloba uma subclassificação, segundo o método utilizado, para fins de soldagem. Entre os processos de soldagem globais, tem-se: a brasagem, a soldagem por pressão e a soldagem por fusão – esta última subclassificada em soldagem a arco elétrico com ou sem eletrodo consumível, apresentando maior diversidade em relação à sua forma de ação, uma vez que permite o uso de dois tipos de gases para a proteção inertes ou ativos que dão origem à Soldagem GMAW, além da utilização de eléctrodos tubulares que fornecem um fluxo de material ao processo sob proteção gasosa.

A figura 2.1, a seguir, destaca a categorização dos processos de soldagem de acordo com a classificação por grupos que compartilham princípios operacionais.

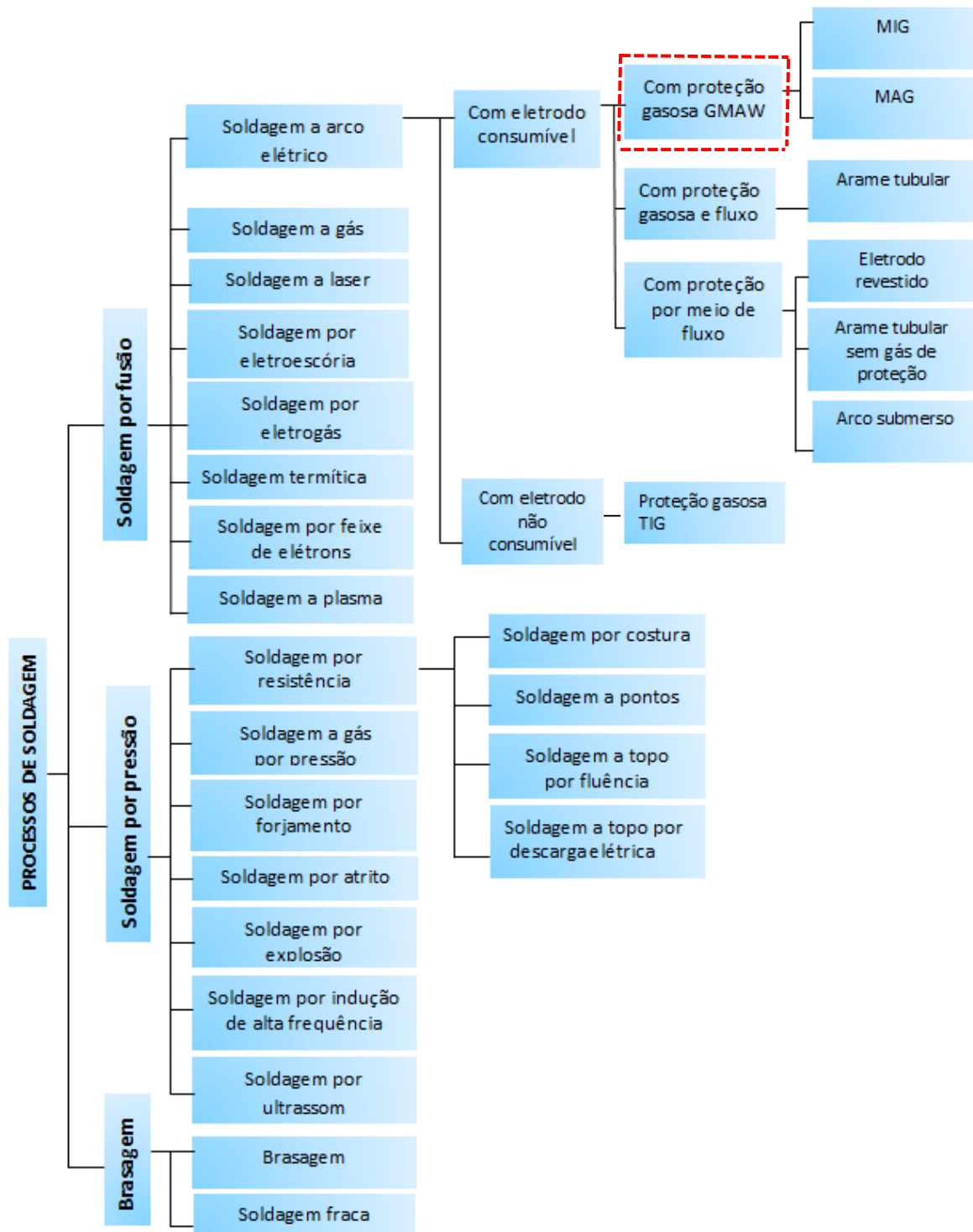


Figura 2.1: Classificação dos processos de soldagem

Após a apresentação geral dos processos de soldagem, as linhas a seguir apresentarão o processo GMAW, foco de estudo da presente dissertação.

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

2.3.1 Princípio de funcionamento

O processo de soldagem GMAW, por definição, é um processo de soldagem ao arco eléctrico que produz a coalescência de metais pelo aquecimento do arco, estabelecido entre um eletrodo de metal alimentado continuamente, e a peça de trabalho (Eghtesad, *et al.*, 2008). Tal processo utiliza um fluxo de gás (inerte ou ativo) fornecido externamente para proteger a poça de fusão contra a contaminação da atmosfera. O referido processo também é conhecido como soldagem MIG/MAG, referindo-se à soldagem MIG (*Metal Inert GAs*) – quando a proteção tem por base gases inertes, e MAG (*Metal Active Gas*) – quando o gás utilizado é ativo.

A aplicação do processo GMAW requer corrente contínua (CC), e funciona normalmente com o arame no pólo positivo (polaridade reversa) (ESAB, 2005b). No momento de contato entre o eletrodo e a peça de trabalho carregada negativamente, produz-se o arco e a alta temperatura gerada funde rapidamente a ponta do eletrodo, formando uma gota que é destacada e transferida para a peça de trabalho, produzindo a transferência metálica – tem-se aí o processo que desempenha o papel mais importante na determinação e controle da qualidade da soldagem em GMAW (Huang e Zhang, 2010). A figura 2.2, a seguir, ilustra esquematicamente o referido processo.

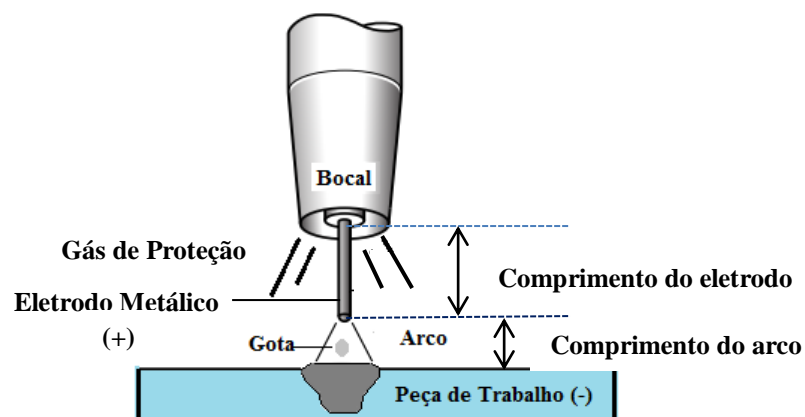


Figura 2.2: Esquema da Soldagem GMAW.

Na escala industrial o processo GMAW é amplamente utilizado por sua elevada produtividade, flexibilidade e baixo custo. São comumente empregadas correntes de soldagem de 50 A até mais que 600 A e tensões de soldagem de 15 V até 32 V (ESAB, 2005b).

2.3.2 Gases de proteção para GMAW

O gás de proteção tem a principal função de proteger a poça de fusão da contaminação do ambiente, mas este irá influenciar de modo considerável a qualidade final da solda, afetando algumas de suas propriedades. Neste sentido, a escolha do gás deve ser feita em conformidade às suas propriedades e à aplicação que será desenvolvida (Lincoln Electronic, 2006).

As propriedades do gás de proteção estão relacionadas com os seguintes critérios, a saber:

- **Potencial de ionização:** é a energia mínima necessária para remover um elétron de um átomo na fase gasosa no estado fundamental. É expressa em elétron-volts, joules ou quilojoules por mole [kJ/mol].
- **A condutividade térmica:** é a grandeza física que mede a capacidade dos materiais para conduzir calor; quanto maior for a condutividade térmica, mais rápido conduzem calor e energia térmica para a peça de trabalho, sendo melhor condutor com respeito aos que apresentam baixa condutividade que mostram o comportamento inverso. É expressa em watt por metro e por kelvin [W/mK].
- **A reatividade química do gás de proteção com a poça de fusão:** é a tendência existente em uma reação química entre os elementos das partes mencionadas, onde a reatividade está relacionada com a perda ou o ganho de elétrons; no caso dos metais, a reatividade varia com sua eletropositividade, ou seja, quanto mais eletropositivo for o elemento, mais reativo será, e maior será sua tendência de perder elétrons; e ainda, no caso dos não metais, variam da mesma forma com a eletronegatividade – os não metais mais reativos possuem grande tendência de receber elétrons.

2.3.2.1 Gases inertes

Os gases inertes não reagem quimicamente, e sua utilidade encontra-se na proteção da poça de fusão. No entanto, o gás deve ser ionizado para se tornar um gás condutor, ou seja, plasma. Os dois tipos de gases utilizados para esta finalidade são o Argônio e o Hélio, e a energia necessária para ionizar é de 15,7 eV e 24.5 eV, respectivamente. Devido ao fato de que o Argônio apresenta uma baixa energia de ionização, tem-se facilitada a abertura do arco em relação ao hélio (Lincoln Electronic, 2006).

O Argônio é um gás incolor e inodoro, obtido como subproduto na destilação industrial do ar no estado líquido para produção de oxigênio. Sua utilidade em soldagem encontra-se na proteção do arco elétrico que atinge altas temperaturas. É preciso salientar que o referido gás não reage quimicamente mesmo em tais condições, e tampouco apresenta decomposição molecular ou absorção de calor atômico porque é um gás inerte monoatômico. Outra vantagem é a baixa condutividade térmica, o que resulta em menor dissipação de calor dentro do arco e menor condução de energia térmica para a peça de trabalho, diminuindo os efeitos da distribuição de temperatura no interior da região afetada pelo arco ao gerar maior concentração de calor que estabiliza o arco.

O Hélio é um gás nobre, que não reage quimicamente para formar novos compostos. É o segundo elemento químico mais abundante no universo e à temperatura ambiente encontra-se no estado gasoso; possui alta condutividade térmica, o que afeta a forma do arco e a distribuição de temperatura no interior da região e implica maior condução de energia térmica para a peça de trabalho. Com a utilização do referido gás, a estabilidade do arco depende de aumentos na tensão do arco, e a influência sobre as características do cordão de solda dá-se em menor profundidade de penetração.

2.3.2.2 Gases reativos

Ao contrário de gases inertes, estes tipos de gases reagem quimicamente junto aos elementos de material de base para gerar certos efeitos de acordo com o processo a ser executado.

Os principais gases nesta classificação empregados na soldagem são: oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, e dióxido de carbono (CO_2) (Lincoln Electronic, 2006).

O Oxigênio (O_2) possui propriedades oxidantes que lhe permitem reagir quimicamente com os componentes da poça de fusão para formar óxidos. A mistura deste gás em pequenas percentagens com o Argônio gera boa estabilidade no arco e melhora consideravelmente o aspecto final do cordão de solda.

O hidrogênio (H_2) é um gás inflamável e possui alta condutividade térmica. Pode ser adicionado em pequenas percentagens (1-5%) ao argônio para blindagem de aço inoxidável e ligas de níquel.

O Nitrogênio (N_2) é um gás não inflamável e inerte à temperatura ambiente. As altas temperaturas do arco alteram as suas propriedades, tornando-lhe reativo com alguns elementos, tais como: o alumínio, o magnésio e o titânio. Não é recomendável como gás de blindagem principal, mas pode ser misturado com outros gases para alguns tipos de aplicações na soldagem.

O Dióxido de Carbono (CO_2) apresenta um comportamento semelhante ao Nitrogênio, devido à capacidade das altas temperaturas do arco em alterar suas propriedades de gás inerte para gás reativo, onde a energia do arco de plasma faz com que a molécula sofra um processo de dissociação na região anódica, gerando íons de carbono e íons de oxigênio, que reagem no arco, tornando o gás ativo.

2.3.3 Equipamentos do processo GMAW

A soldagem GMAW pode ser realizada manual ou automaticamente. O equipamento básico para o desenvolvimento do processo é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem, uma fonte de gás protetor, além dos cabos e mangueiras, conforme exposto na figura 2.3, a seguir.

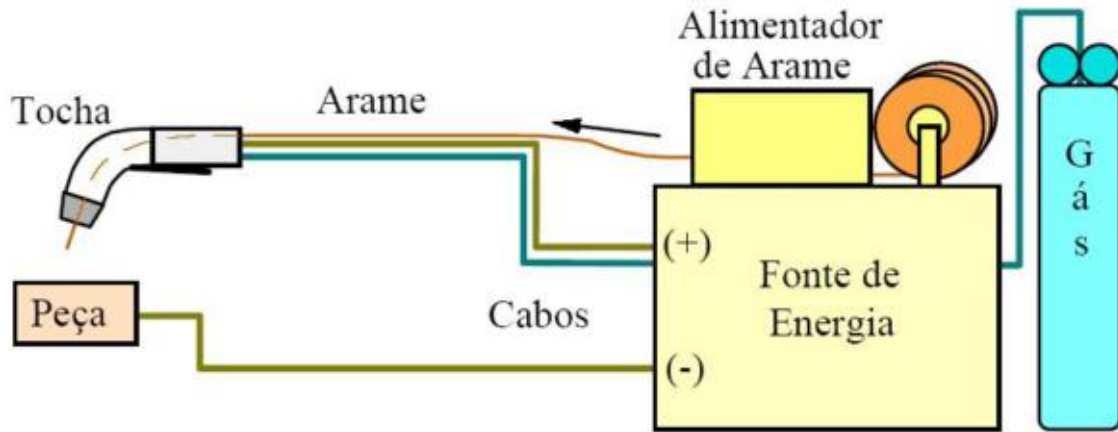


Figura 2.3: Equipamento básico para a soldagem GMAW (Dobignies, 2008).

2.3.3.1 Fonte de Energia

A fonte de energia, como o nome sugere, é responsável por gerar o fornecimento constante de energia elétrica ao processo, e incorpora características de saída para otimizar o rendimento do arco no processo de soldagem. Por conseguinte, são classificadas como fontes de corrente e de tensão constante. O primeiro grupo mantém o comprimento do arco estável, através da constante taxa de fusão e velocidade de alimentação de arame variável. Nas alterações inesperadas das condições iniciais, a fonte reage com um aumento momentâneo da velocidade de alimentação de arame. O segundo grupo mantém o comprimento do arco estável, com uma velocidade de alimentação do fio constante, onde as variações no comprimento do arco são controladas pela diminuição da corrente (Marques, 2002).

A fonte de energia *TransPlus Synergic 5000* empregada no desenvolvimento dos ensaios, é uma fonte de energia invertida, digitalizada e controlada por microprocessador. Seu princípio de funcionamento tem por base o controle do processo de soldagem através da unidade central de controle e de regulação da fonte, que é acoplado a um processador de sinal digital, que permite um processo de soldagem preciso com boa reprodutibilidade dos resultados (Fronius, 2006).

2.3.3.2 *Tocha de Soldagem*

A tocha guia o arame e o gás de proteção para a região de soldagem. Atualmente, existem diferentes tipos de tochas refrigeradas à água ou refrigeradas pelo gás de proteção, com formato nas extremidades reto ou curvo, para atender às necessidades e exigências das aplicações na soldagem.

Segundo (Marques, 2002), a tocha de soldagem consiste basicamente de um bico de contato, que faz a energização do arame-eletrodo, de um bocal que orienta o fluxo de gás protetor, e de um gatilho de acionamento do sistema. O bico de contato é um pequeno tubo à base de cobre, cujo diâmetro interno é ligeiramente superior ao diâmetro do arame-eletrodo, e serve de contato elétrico deslizante. O bocal é feito de cobre ou material cerâmico, e deve ter um diâmetro compatível com a corrente de soldagem e o fluxo de gás a ser utilizado em uma dada aplicação. O gatilho de acionamento movimenta um contactor que está ligado ao primário do transformador da máquina de solda, energizando o circuito de soldagem, além de acionar o alimentador de arame e uma válvula solenóide, que comanda o fluxo de gás protetor para a tocha.

2.3.3.3 *Fonte de Gás e Alimentador de Arame*

A fonte de gás fornece o gás necessário para a proteção da poça de fusão contra a contaminação da atmosfera durante o processo de soldagem. Em geral, o gás ou a mistura de gases é contido em um cilindro.

O alimentador de arame é acionado por um motor de corrente contínua, e sua principal função é puxar o arame do carretel e alimentá-lo para o arco. Não existe qualquer ligação entre o alimentador e a fonte de energia. Entretanto, ajustando-se a velocidade de alimentação de arame, ajusta-se a corrente de soldagem fornecida pela máquina, devido às características da fonte e do processo (Marques, 2002).

2.3.4 Variáveis do Processo GMAW

As variáveis do processo GMAW podem ser classificadas em três categorias, de acordo com o estabelecido por Naindu et al. (2003), conforme expresso na figura 2.4, a seguir, que apresenta a classificação dos parâmetros dentro de cada divisão.

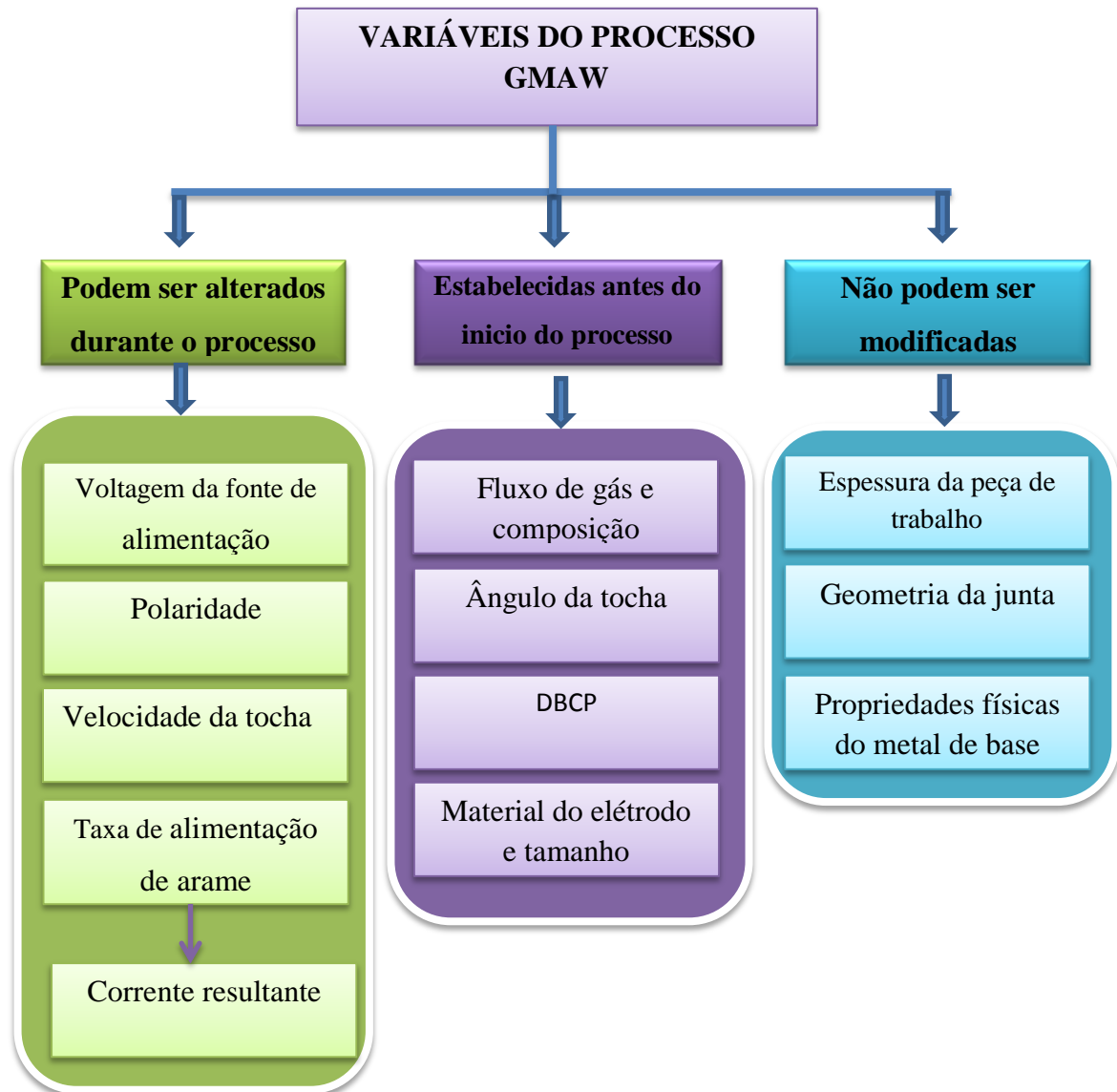


Figura 2.4: Classificação das variáveis do processo GMAW

No entanto, segundo Bingul e Cook (1999), existe outra classificação para as variáveis do processo de soldagem, ao considerá-los como parâmetros diretos de soldagem (DWP) e parâmetros indiretos de soldagem (IWP). O primeiro grupo corresponde aos parâmetros relacionados com o reforço da solda, a geometria da zona de fusão, as propriedades

mecânicas, a microestrutura da solda e as descontinuidades; o segundo grupo representa as variáveis de entrada que controlam os DWS. Na figura 2.5, a seguir, detalha-se o conjunto de parâmetros diretos e indiretos de soldagem.

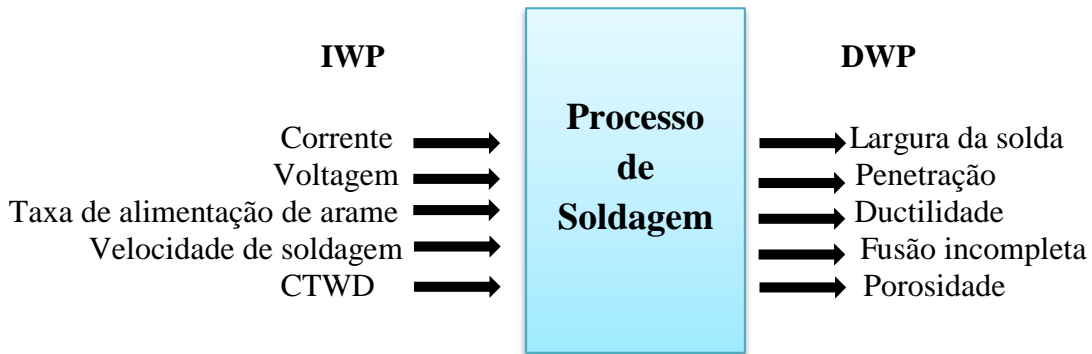


Figura 2.5: Parâmetros diretos e indiretos do processo de Soldagem GMAW (modificado - [9])

2.3.4.1 Comportamento das variáveis de soldagem

Os resultados obtidos ao final do processo de soldagem dependem do comportamento das variáveis e a maneira como estes influenciam a penetração, a geometria da junta e a qualidade da solda. Nesta seção, têm-se as respostas das variáveis, segundo o estudo proporcionado em (Naindu, *et al.*, 2003).

Corrente de soldagem: a variação da corrente é diretamente proporcional à velocidade de alimentação do eletrodo, ao manter as demais variáveis de soldagem constantes. Altas correntes de soldagem representam o acréscimo da taxa de deposição do material, o aumento da profundidade e a largura de penetração e o aumento de tamanho do cordão de solda.

Tensão de soldagem: baixos níveis de tensão geram cordões de solda estreitos, com maior altura do reforço; o aumento da tensão implica o aumento do aporte térmico ao processo, alargando a zona termicamente afetada; valores elevados de tensão acrescentam a possibilidade de aparecimento de respingos, porosidades e mordeduras.

Polaridade: determina o tipo de ligação elétrica entre a pistola e a fonte de soldagem, pode ser positiva ou negativa. O primeiro tipo é denominado DCEP e gera boas condições para a

estabilidade do arco, poucos respingos e boa penetração, enquanto o outro grupo, com polaridade inversa (DCEN), ocorre uma tendência de maior instabilidade.

Tensão do arco: ao manter as demais variáveis de soldagem constantes, a tensão do arco é proporcional ao comprimento de arco.

Velocidade de soldagem: é a velocidade com que a tocha passa por cima da peça de trabalho na direção de soldagem; velocidades baixas aumentam a deposição de material fundido e geram cordões largos; inversamente, em velocidades muito altas, tem-se a deposição de material insuficiente e produzem-se defeitos de mordeduras no cordão de solda.

Comprimento do eletrodo (*Stick-Out*): é a distância entre a ponta do tubo de contato e a ponta do eletrodo. O aumento da extensão do eletrodo acrescenta a resistência elétrica do circuito, reduzindo a corrente de soldadura assim como a velocidade de fusão, resultando na redução do comprimento do arco e na estabilização do comprimento do eletrodo.

Orientação do eletrodo: a sua orientação é determinada pela inclinação da pistola de soldagem e o posicionamento afeta a penetração e o formato do cordão de solda. A soldagem pode ser executada para esquerda ou direita com respeito à junta de solda; o primeiro caso produz um grau máximo de penetração, um arco estável e cordões estreitos; quando a soldagem é realizada à direita, os cordões têm menos penetração e maior largura.

2.4 Transferência Metálica

A transferência de metal é a maneira pela qual o material é transferido a partir da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão, gerando forte influência no processo GMAW em termos de estabilidade, produção de respingos, formato do cordão, capacidade de fundir o metal de base e qualidade da solda (Norrish, 1992).

Segundo os estudos realizados por Kim e Eagar (1993), as variáveis que determinam o modo de transferência metálica são: a corrente de soldagem, a composição do gás de proteção, o comprimento do eletrodo, a polaridade, o material de soldadura, entre outros fatores que podem afetar a transferência, como, por exemplo, os contaminantes ambientais; no entanto, a corrente de soldagem é o fator que define o tipo de transferência.

O processo GMAW inclui três formas principais de transferência metálica, a saber: a transferência por curto-circuito, a transferência globular e a transferência por “*spray*”, aerossol ou goticular. Cada caso possui diferentes tipos de estabilidade de arco, penetração, produção de respingos, formação de porosidade e nível de aprisionamento de gás. A figura 2.6, a seguir, apresenta esquematicamente a divisão dos modos de transferência de acordo com os níveis de corrente e tensão para cada caso.

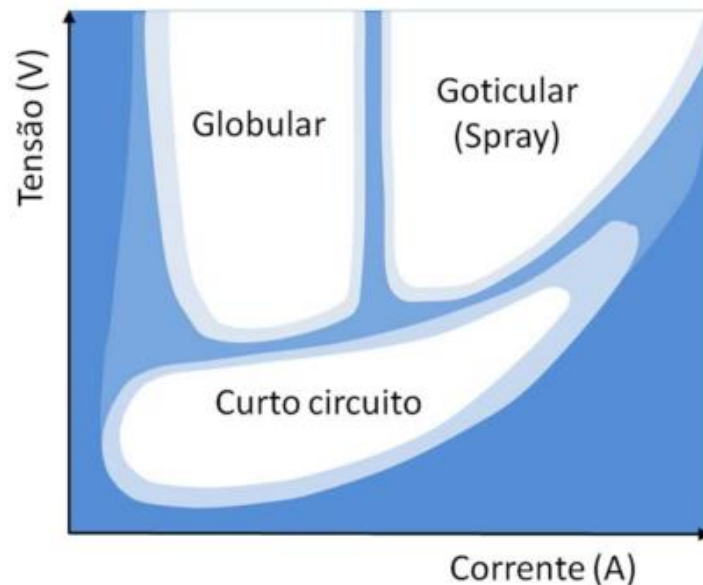


Figura 2.6: Esquema dos tipos de transferência metálica em GMAW (Modenesi e Bracarense, 2011).

Técnicas fotográficas e câmeras de vídeo de alta velocidade foram utilizadas para classificar os modos de transferência de acordo com o tamanho e forma da gota. Faz-se importante salientar que o modo de transferência por *spray* dispõe de um conjunto adicional de técnicas de transferência metálica (*spray* rotacional, *spray* com alongamento e *spray* projetado), que permitem a utilização de eletrodos de diâmetro maior, e que fornecem altas taxas de deposição, boa fusão e penetração, além de uma boa aparência da solda (Bingul e Cook, 2006).

Para fins da questão suscitada nesta dissertação, só se aprofunda o tema da transferência de curto-circuito.

2.5 Transferência Metálica por Curto- Circuito

A transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW é caracterizada pelo contato regular entre a gota de metal fundido, ainda ligado ao eletrodo, e a poça de fusão, segundo Souza, et al. (2011), além de ocorrer em baixos níveis de corrente e tensão. Tal fenômeno se dá para comprimentos de arco curtos e o contato com a poça de fusão sucede antes do destacamento da gota, de modo que nenhum metal é transferido através do arco.

Em termo industrial, a referida técnica é amplamente utilizada para a soldagem de corpos de aço carbono. São empregados arames com diâmetros entre 0,8 mm e 1,2 mm, e proteção de gás com base em CO₂. Este modo de transferência de metal produz uma pequena poça de fusão de solidificação rápida que é particularmente útil na união de materiais de pequena espessura em qualquer posição, materiais de grande espessura nas posições vertical, sobre cabeça e posição plana (ESAB, 2005b).

A transferência de metal ocorre no momento de curto-circuito, com uma frequência de 20 a 200 vezes por segundo, resultando em alterações periódicas na corrente e tensão de soldagem. Durante o curto-circuito, a corrente tende a se elevar rapidamente, causando uma maior fusão do eletrodo, e o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética, formando uma ponte de metal, que é separada no fim de curto, provocando a restauração do arco, à custa da vaporização de parte do material entre o eletrodo e a poça de fusão e a formação de respingos, conforme Modenesi e Bracarense (2007).

O processo de transferência de metal no modo de curto-circuito é apresentado na figura 2.7, a seguir, que evidencia *pari passu* a evolução da gota de metal fundido até o contato com a poça de fusão e a restauração do arco, além do oscilograma do comportamento da corrente e da tensão durante cada fase do processo.

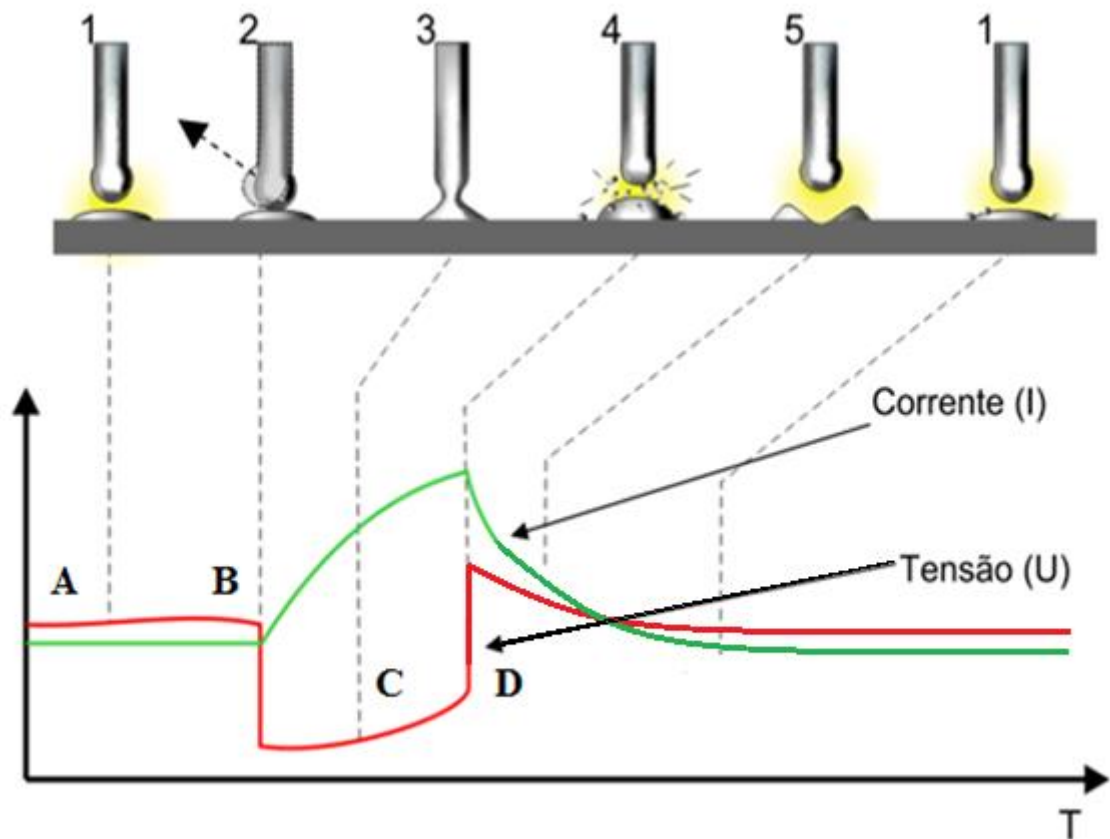


Figura 2.7: Transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW (modificado - (Silva, 2005).

De acordo com a figura apresentada anteriormente, a transferência metálica por curto-circuito foi dividida em cinco etapas, e o oscilograma de corrente e tensão em quatro períodos. No passo número um (1), a gota de metal fundido começa a se formar na ponta do eletrodo, e o arco se localiza entre o período A-B. No entanto, à medida que a gota é formada, o comprimento do arco diminui. Na fase dois (2), a gota toca a poça de fusão e tem-se uma queda brusca da tensão, enquanto a corrente começa a aumentar, conforme ilustrado no período C, onde ocorre o curto-circuito, e o arco é extinto; na próxima etapa (3), com a ponte metálica estabelecida, o metal é transferido para a poça de fusão pela ação das forças, principalmente pela força eletromagnética produzida pelo aumento da corrente (efeito Pinch), e pela força de tensão da superfície da poça, que suga o metal líquido na sua direção. Em (4), ocorre o rompimento da ponte metálica e é o fim do curto-circuito; o arco é reaberto e a tensão sobe mostrando um pico de reignição (D). Na fase (5), há uma queda dos níveis de tensão e corrente, e uma nova gota começa a se formar na ponta do eletrodo, dando início a um novo ciclo.

2.6 Estabilidade na Transferência Metálica

A transferência metálica no processo de soldagem desempenha um papel muito importante na qualidade e resultado final da solda. Pesquisadores na área de soldagem têm abordado este tema de estudo para identificar e controlar os fatores que afetam a estabilidade da transferência de metal. Ponomarev é citado no estudo de Carneiro et al. (Carneiro, et al., 2011), pela sua contribuição na identificação de três fatores que influenciam a estabilidade da transferência metálica do processo GMAW, e correspondem respectivamente à estabilidade do arco, à regularidade na transferência e o comportamento operacional do processo de soldagem. Tal conceito é reforçado pelos resultados de Gonçalves *et al.*(2008), onde a estabilidade é atribuída ao processo pela existência da regularidade na transferência metálica, visando apresentar um comportamento homogêneo ao longo do cordão de solda, e que produza uma quantidade mínima de respingos, além de uma poça e metal de solda geometricamente homogêneos em toda a extensão do cordão.

A transferência por curto-circuito é relativamente mais susceptível a instabilidades, com a geração de uma elevada quantidade de respingos, particularmente ao final de cada curto-circuito. Existe, contudo, uma condição de menor instabilidade que ocorre quando a frequência de transferência (ou de curtos-circuitos) é máxima, segundo Modenesi e Bracarense (2007), onde a indutância desempenha um papel importante no comportamento da taxa de crescimento da corrente, uma vez que o aumento rápido da corrente promove uma elevada formação de respingos, e o caso oposto leva à interrupção do processo de soldagem.

Souza (2010) propõe um método para identificar a estabilidade da transferência em curto-circuito, com base na constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto, o que significa que pouca variação nos tempos, tanto em curto-circuito como em arco aberto, geram estabilidade ao processo. O critério utilizado para definir a estabilidade foi o Índice de Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc}), conforme a equação 2.1, apresentada a seguir: quanto menor o valor do índice, melhor é a regularidade do processo de transferência.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma t_{cc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma t_{ab}}{t_{ab}} \quad (2.1)$$

Onde:

σ_{tcc} = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito.

σ_{tab} = desvio padrão da média do tempo de arco aberto.

t_{cc} = média do tempo de curto-circuito;

t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

O processo de soldagem no modo de transferência curto-circuito apresenta um comportamento cíclico no contato entre o eletrodo e a poça de fusão. Cada evento gera crescimento da gota e transferência de metal, respectivamente. O tempo transcorrido em cada caso é chamado tempo de arco aberto e tempo curto-circuito, e a continuidade cíclica do processo é descrita através da frequência de ocorrência de curtos circuitos (F_{cc}), cujo valor é obtido a partir da equação 2.2, (Aguiar Lima e Scotti, 2003).

$$F_{cc} = \frac{1}{t_{ab} + t_{cc}} \quad (2.2)$$

A figura 2.8, a seguir, apresenta um oscilograma do comportamento dos sinais de corrente e tensão para o modo de transferência curto-circuito no processo GMAW, e ilustra como obter o tempo de arco e de curto-circuito a partir das informações geradas pelos sinais. Tal procedimento permite uma análise quantitativa do processo para determinar a estabilidade da transferência e, assim, determinar a relação entre os tempos de arco e tempos curtos, com os resultados finais do cordão de solda.

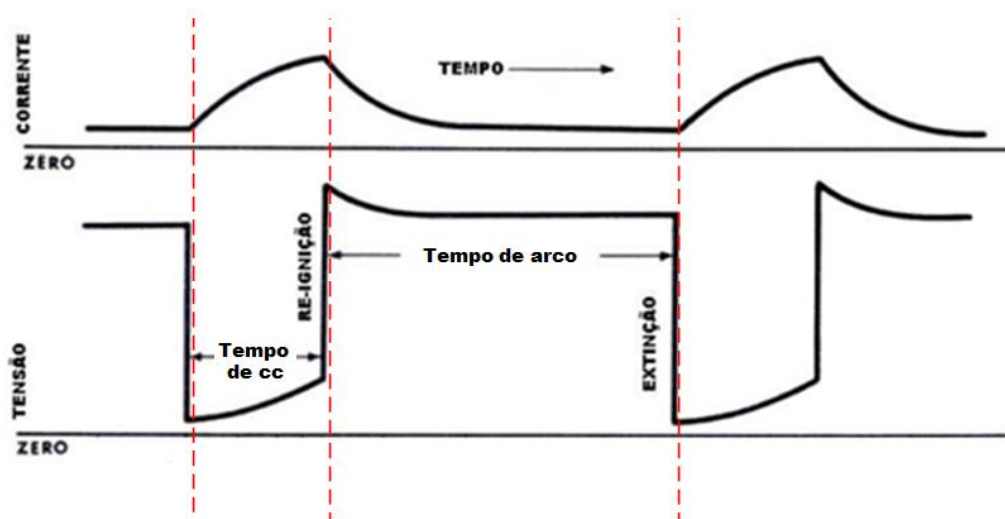


Figura 2.8: Oscilograma de corrente e tensão para o modo de transferência por curto-circuito (modificado (ESAB, 2005b))

Lima e Scotti (2003) destacam em seus estudos três principais causas para a instabilidade na transferência metálica, a saber: curtos-circuitos instantâneos ou aleatórios sem transferência de metal, falha na reignição do arco elétrico e variações na velocidade de alimentação do arame. Bingul & Cook (1999) atribuem a estabilidade ao processo GMAW, equilibrando a taxa de alimentação do eletrodo com a taxa de fusão do eletrodo, a fim de manter um comprimento de arco constante e criar a estabilidade no arco e, portanto, a estabilidade do processo. Adolfsson, *et al.*, (1999) determinaram que o processo de soldagem GMAW é estável se a transferência de metal, a partir do eletrodo para o poça de fusão, ocorre regularmente. De modo ideal, a estabilidade da transferência em curto-circuito ocorre quando a frequência de curto-circuito é igual à frequência de oscilação da poça, com uma taxa máxima de curtos-circuitos, em condições de desvio padrão mínimo dos tempos de curtos-circuitos, mínima massa transferida por curto-circuito e perda mínima de material por respingos. Hermans e Ouden (1999) afirmaram que a estabilidade máxima do processo GMAW em curto-circuito ocorre para condições de soldagem específicas, ao manter baixos níveis de tensão e baixas taxas de alimentação do arame, além de obter um desvio-padrão mínimo na frequência de curtos-circuitos. Finalmente, aqueles autores concluem que a estabilidade do processo está diretamente relacionada com as oscilações da poça, em particular, quando a frequência de curto-circuito é igual à frequência de oscilação da poça.

Dutra, *et al.* (1995) argumentaram que condições estáveis na geometria da solda são obtidas sob certos parâmetros e variáveis de soldagem, que possam garantir a estabilidade no processo de transferência de metal. A estabilidade é gerada pela regularidade na formação e na separação das gotas metálicas e pode ser avaliada com base na repetibilidade temporal dos valores instantâneos de tensão e corrente. Norrish (1992) apresenta vários índices de estabilidade propostos por outros autores, com base na análise estatística dos dados. O desvio-padrão do tempo de arco, o desvio-padrão da corrente de pico, a distribuição de probabilidade do curto-circuito e o tempo de arco, a análise estatística de tempo e arco de curto-circuito, são considerados indicadores da estabilidade do processo de soldagem.

2.7 Soldagem Orbital

Atualmente, a soldagem orbital tornou-se mais importante no mundo da pesquisa científica, devido às exigências industriais de um mercado crescente na construção e união de quilômetros de tubulações para o transporte de fluidos, que atendem as necessidades do mundo moderno. No entanto, a despeito da demanda do uso desta técnica, a maior parte do trabalho é feita manualmente, o que envolve a utilização de mão de obra qualificada para fazer as soldagens nos tubos, que requer um soldador principal altamente qualificado para fazer as passagens iniciais em cada junta, e um conjunto adicional de soldadores para executar passes adicionais até a obtenção da quantidade adequada de material depositado, além do perito treinado na inspeção das juntas, de acordo com o tamanho e composição do tubo (Pharris e Kolpa, 2007). Este tipo de gestão aumenta o custo do projeto, principalmente por causa da quantidade de material desperdiçado pela geração de respingos e pelas correções pendentes, uma vez que os resultados dependem da experiência do pessoal e não garante a continuidade, a uniformidade geométrica e a qualidade da solda ao longo do tubo. A figura 2.9, a seguir, ilustra o trabalho feito no campo e as condições em que a soldagem é realizada.



Figura 2.9: Soldagem manual de dutos (Pharris e Kolpa, 2007).

O principal processo de soldagem utilizado na instalação de tubulações é a soldagem manual com eletrodo revestido (SMAW). No entanto, para fins de aumento da produtividade e diminuição de custos, várias indústrias adotaram processos de soldagem

automáticos ou semiautomáticos com arames sólidos (GMAW), arames tubulares com alma metálica (PGMAW) ou arames com alma não metálica (FCAW) (ESAB, 2004). Porém, o ambiente de trabalho hostil para a soldagem de tubulações impede o deslocamento e a manutenção de equipamentos de alta complexidade, de modo que o processo de soldagem GMAW é amplamente utilizado nestes casos.

2.7.1 Posições Adoptadas no Tubo

A soldagem orbital é o procedimento de soldar tubos, pelo movimento circular da ferramenta de soldadura ao redor da peça de trabalho (Lima II, et al., 2005).

A geometria do tubo torna complicado o processo de soldagem porque este deve ser realizado em quatro posições diferentes, divididos em quatro zonas: posição plana ($315^\circ - 45^\circ$), posição vertical descendente ($45^\circ - 135^\circ$), sobre cabeça ($135^\circ - 225^\circ$), e posição vertical ascendente ($225^\circ - 315^\circ$), conforme (Lima II *et al.*, 2005). A figura 2.10, a seguir, apresenta as divisões do tubo e a posição de soldagem adotada em cada caso. É importante ressaltar que cada um deles tem 90° , e os parâmetros de soldagem ótimos são diferentes para garantir as condições de continuidade e qualidade da solda.

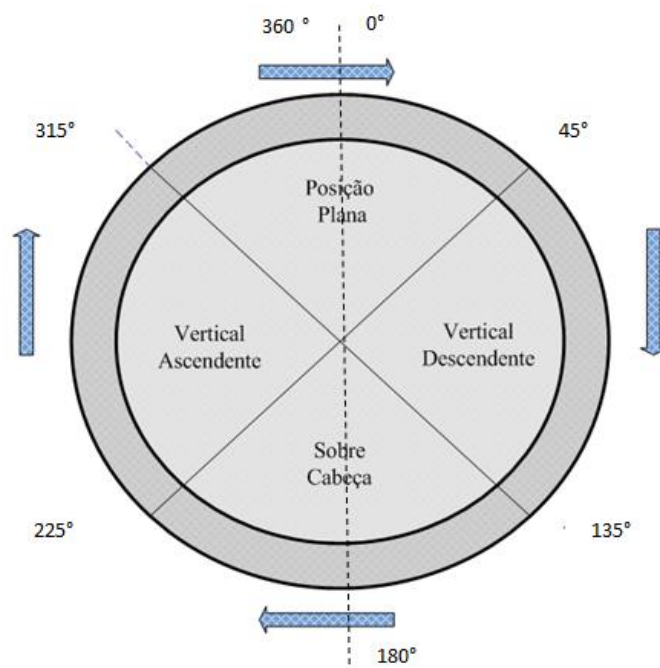


Figura 2.10: Posições de soldagem adoptadas no tubo

2.7.2 Posições de Soldagem Orbital

As posições do tubo para soldagem são padronizadas por meio de códigos internacionais, tais como: ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) e normas Europeias EN 287 / EN ISO 6947 (Fronius, 2010). Na figura 2.11, a seguir, tem-se as diferentes posições do tubo para solda e o trajeto percorrido pela tocha de soldadura.

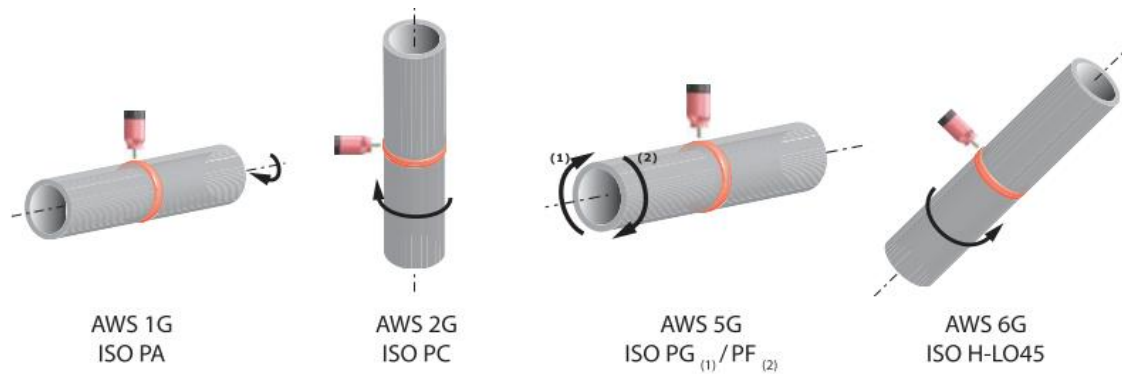


Figura 2.11: Posições do tubo na soldagem orbital (Fronius, 2010)

A figura apresentada anteriormente destaca no primeiro caso 1G (posição plana, feita no lado superior em que a face da solda é aproximadamente horizontal), ou que a tocha de soldagem pode se movimentar ao redor do tubo, seguindo trajetórias diferentes de acordo com sua posição 2G (horizontal), 5G (sobre cabeça), 6G (com peça a ser soldada (tubo) em 45°).

2.7.3 Ângulo de posicionamento do eletrodo

A sociedade americana de soldagem (AWS) indica dois fatores principais para o posicionamento do eletrodo, a saber: o do sentido de soldagem e o ângulo de ataque da tocha. O primeiro refere-se ao posicionamento da tocha em relação à direção de deslocamento do arco e é dividido em duas técnicas: puxado e empurrado. O segundo fator dá-se em relação ao plano de referência ou plano de ataque (ESAB, 2004).

Na técnica de soldagem puxando, a tocha de soldagem é posicionada de modo que o arame seja alimentado no sentido oposto do deslocamento do arco; assim, o arame é adicionado ao metal de solda já depositado. Na técnica de empurrando, a tocha de soldagem é

posicionada para que o arame seja alimentado no mesmo sentido do deslocamento do arco, de modo que o metal fundido do elétrodo é adicionado diretamente na peça de trabalho. A Figura 2.12, a seguir, ilustra o posicionamento da tocha para cada uma das técnicas discutidas anteriormente, para rolagem em ângulo positivo na posição vertical descendente de uma secção do tubo.

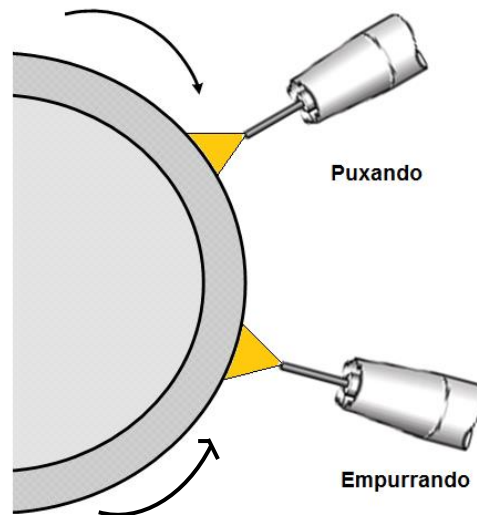


Figura 2.12: Técnica de soldagem puxando y empurrando na seção vertical descendente do tubo.

Na soldagem orbital, o deslocamento em graus e o local da tocha são identificados a partir das indicações dos minutos de um relógio de pulso, conforme ilustrado na figura 2.13, a seguir, e o ângulo de ataque é obtido em relação ao plano de ataque, conforme a figura 2.14, a seguir.

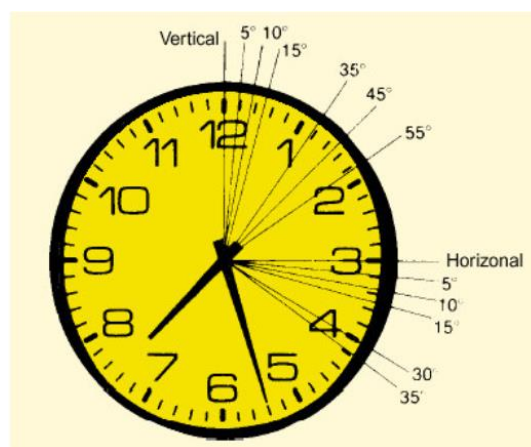


Figura 2.13: Ângulos de posicionamento do eletrodo (ESAB, 2004).

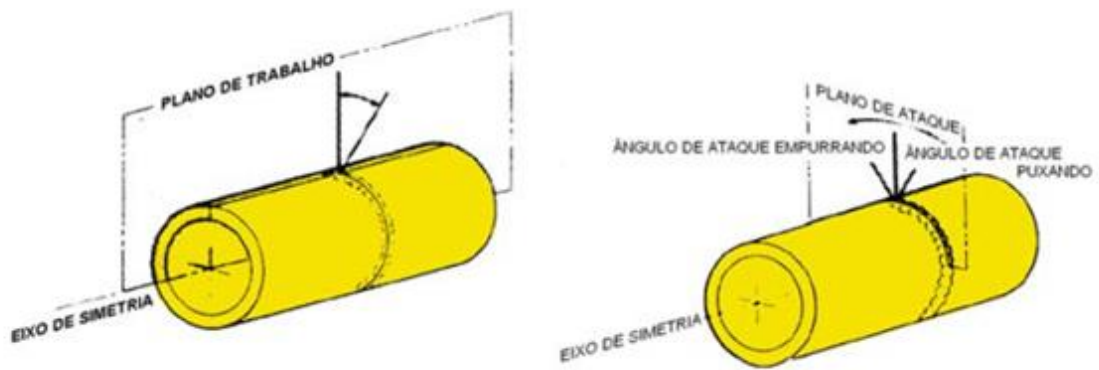


Figura 2.14: Planos de referência para o Ângulo de posicionamento do eletrodo (ESAB, 2004).

3 PANORÂMICA DOS TRABALHOS ANTERIORES E RELACIONADOS

No presente capítulo tem-se a abordagem de estudos relacionados ao tema de pesquisa aqui proposto, visando aprofundar o tema principal de interesse, a partir da pesquisa e experiência de outros investigadores no que tange à soldagem.

3.1 MODELAGEM DO PROCESSO GMAW

Desde os primeiros registros do uso de soldagem na história da humanidade, houve uma grande evolução em relação ao conhecimento de cada um dos processos existentes. A soldagem evoluiu com os progressos tecnológicos, permitindo aos investigadores aprofundar no estudo dos aspectos relativos ao comportamento físico dos fenômenos existentes no processo da soldagem, a fim de alcançar resultados adequados às exigências e necessidades do mundo moderno.

Na presente seção, tem-se a apresentação de estudos realizados por diferentes pesquisadores no domínio da soldagem, em especial, na modelagem do processo GMAW (*Gás Metal Arc Welding*). Moore, *et al.* (1997) desenvolveram um modelo da dinâmica do processo GMAW, com a finalidade de utilização dos resultados na implementação do controle da qualidade da solda, com base no ajuste dos parâmetros de fornecimento de energia, para regular a entrada de massa e calor para o banho de fusão a partir do estudo das propriedades de desprendimento da gotícula do material fundido, até atingir um intervalo de desprendimento e tamanho de gota uniformes, que lhes permitissem controlar a transferência de calor e massa e, conseqüentemente, a qualidade da solda. O sistema foi modelado em termos de equações diferenciais que descrevem a dinâmica e o comportamento do sistema, com a limitação de serem equações não lineares de alta dificuldade; para fins da sua implementação em um controlador, foram feitas aproximações a fim de gerar um modelo simplificado que pode ser implementado empregando alguma das estratégias de controle moderno. Os resultados apresentados por aqueles autores mostram uma visão geral do processo GMAW, porém, não são apresentados os resultados

da aplicação do modelo e a simplificação das equações que envolvem o uso de premissas, o que pode causar a perda de informações do comportamento real do sistema.

Os modelos desenvolvidos para o processo GMAW estão dentro da classificação efetuada pelo uso de métodos específicos, e foram divididos em três grupos. Assim, têm-se os modelos com base nos elementos finitos e métodos de diferenças finitas, os modelos derivados empiricamente ou estatisticamente a partir de dados experimentais, e os modelos originados a partir de raciocínio físico e solução analítica. Infelizmente, cada modelo tem certo grau de limitação. Neste sentido, os modelos do primeiro grupo requerem cálculos numéricos excessivamente demorados, que os tornam inutilizáveis diretamente em um sistema de controle em tempo real; os modelos do segundo grupo contêm pouca informação sobre detalhes físicos e tem aplicabilidade limitada em sistemas de controle multivariável. Para os modelos do terceiro grupo, tem-se um trabalho limitado na descrição do comportamento dinâmico do processo, pois, a maioria destes tem por base as condições de estado estacionário, inaceitáveis para fins de controle.

Bingul e Cook (1999) desenvolveram um modelo matemático para o processo GMAW, correlacionando o perfil de temperatura do anodo com a velocidade de fusão dinâmica do eletrodo, a fim de proporcionar uma análise quantitativa da relação entre a extensão do eletrodo e o comprimento do arco, para gerar um modelo dinâmico que pode ser utilizado no controle adaptativo. O modelo foi validado ao comparar simulações com as respostas obtidas experimentalmente, com resultados promissores no que tange ao desenvolvimento da regulação do comprimento do arco. É possível notar o grau de complexidade no desenvolvimento do modelo devido à natureza complexa das condições de contorno na modelagem do eletrodo.

Terasaki e Simpson (2006) concretizaram um modelo para representar a dinâmica do processo da soldagem por arco elétrico de metal com gás GMAW, visando prever a mudança de modo de transferência de curto-circuito para voo livre, empregando uma descrição em espaço de estados dependente do tempo; os resultados previstos por aquele modelo foram comparados junto ao aspecto experimental, com boa concordância entre estes. No entanto, os resultados requerem um tratamento mais preciso e estudo da transferência de metais no curto-circuito.

Shiwei, *et al.* (2011) desenvolveram a modelagem e simulação da transferência curto-circuito em GMAW, com base no uso de ferramentas computacionais para o estudo das

alterações na corrente e voltagem de soldagem, a partir de mudanças dos parâmetros do processo via simulação, a fim de aplicar os melhores parâmetros encontrados em soldas reais e reduzir o custo da pesquisa. No entanto, apesar da consistência dos resultados obtidos, aqueles autores enfatizaram a necessidade de encontrar um modelo matemático preciso que descrevesse adequadamente o fenômeno da transferência de curto-circuito.

No trabalho de Planckaert, *et al.* (2010a) propôs-se um modelo híbrido com dois estados distintos continuamente comutados que representam a soldagem GMAW no modo de transferência por curto-circuito, com base nas principais forças que atuam sobre o metal fundido durante um ciclo completo, a fim de avaliar a eficácia das estratégias de controle e os efeitos da instalação experimental. Na validação do referido modelo, foram utilizadas técnicas de vídeo e recursos de alto nível para a análise das imagens, empregando-se algoritmos de contorno ativo para medir indiretamente a geometria das gotas, além de testar as hipóteses levantadas no modelo. Os resultados obtidos foram satisfatórios.

Bingul e Cook (2006) representaram um modelo dinâmico capaz de estimar em tempo real o comprimento do eletrodo no modo de transferência spray, para a sua futura aplicação em controle de processos da estabilidade do arco elétrico. Na verificação experimental, a dinâmica do processo foi excitada por uma variação sinusoidal contínua da corrente de arco, através do qual foram feitas medições diretas das mudanças na extensão do eletrodo, do comprimento do arco e da tensão total. E ainda, um sistema de vídeo de alta velocidade capturou a dinâmica da extensão do eletrodo. Os resultados obtidos foram bons, evidenciando que o modelo é adequado para implementação em sistemas controle.

Eghesad *et al.* (2008) desenvolveram um modelo de controle não linear, com base no estudo da estabilidade da dinâmica interna do sistema GMAW, considerando a taxa de vaporização da massa e oxidação do eletrodo. Os esforços dos referidos autores relacionam-se ao tema de estudo de Bingul *et al.*, ao exercer controle sobre o comprimento do arco a partir do voltagem do arco. Para a validação do controlador proposto, aqueles autores realizaram uma simulação do processo incluindo um sinal com dentes serra que representasse a dinâmica do descolamento da gota, onde o controlador tenta compensar a alteração do comprimento do arco causada pelo crescimento e desprendimento da gota. Os resultados apresentados, apesar de exercer o controle sobre o processo, são subjetivos, pois tem-se aí um sinal imposto, não levando-se em conta os fenômenos reais do processo de formação e destacamento da gota à sua aplicação.

Modenesi, *et al.* (2012) concretizaram um modelo matemático em linguagem C++, a fim de simular as variações de tensão, corrente e de comprimento do arco durante a soldagem MIG/MAG. A modelagem foi feita a partir de resultados experimentais tratados com técnicas estatísticas, permitindo conhecer a variação das variáveis do processo na soldagem convencional com transferência por queda livre, curto-circuito e corrente pulsada. Aqueles autores fizeram uso de ferramentas de *software* para a introdução de perturbações que simulassem as mudanças no comprimento do arco, visando a obtenção da variação aleatória nos períodos de transferência em curto-circuito, bem como a geração de corrente e tensão na transferência por queda livre. Os resultados obtidos na simulação foram comparados com dados de experimentos reais, identificando-se aspectos semelhantes entre estes. Não obstante, os referidos autores enfatizaram que o modelo pode ser melhorado por meio da inclusão de aspectos do crescimento e destacamento da gota na ponta do eletrodo, uma vez que tal processo só foi introduzido pela aplicação de um sinal dente de serra.

Chu, *et al.* (2004) analisaram a frequência de curto-circuito do processos GMAW, fazendo uso da densidade espectral e de métodos de análise tempo-frequência a fim de obter qualidade na superfície da solda, por meio da análise da tensão e da corrente de soldadura no domínio da frequência, bem como a relação entre a frequência de curto-circuito e a estabilidade do processo de soldadura. Aqueles pesquisadores realizaram vários experimentos com diferentes parâmetros de soldadura, e com base nos dados experimentais obtidos, o estudo sistemático mostrou que a análise espectral de potência e os métodos de análise de tempo-frequência foram abordagens eficientes para a estabilidade e análise de qualidade do processo.

Modenesi e Reis (2007) desenvolveram um modelo numérico para o cálculo da distribuição de temperatura no eletrodo durante a soldagem, utilizando como parâmetro de controle a taxa de fusão, a corrente de soldagem e a fração do material vaporizado. Aqueles autores empregaram gravação de vídeo de alta velocidade na região do arco para suportar o modelo, que mostrou que as anomalias na curva de taxa de fusão realizadas com fontes de alimentação de corrente constante, ocorrem por mudanças abruptas nas condições de aquecimento do eletrodo pelo arco ou pela fração fundida de material de enchimento vaporizado.

Novais (2010) apresentou um resumo detalhado das principais discontinuidades nos processos de soldagem eletrodo revestido (SMAW), (GMAW) e arco submerso (SAW),

suas causas potenciais e a forma correta de minimizar e corrigir as distorções geradas pelo desvio do processo de soldagem, falhas operacionais, falhas dos equipamentos ou acessórios.

Planckaert (2008) modelou o processo GMAW no modo de transferência curto-circuito, empregando técnicas de processamento de imagem a fim de seguir as orientações da gota formada durante o processo. Os resultados obtidos foram bons.

Choi, *et al.* (2001) propuseram um modelo que pudesse prever a variação dos parâmetros do processo GMAW no modo de transferência curto-circuito, considerando os efeitos da tensão superficial e força eletromagnética devido à corrente. Neste sentido, aqueles autores variaram parâmetros de soldagem e simularam para a análise dos modos de transferência por curto-circuito e voo livre. Os resultados obtidos estão em concordância com os resultados experimentais que ocorrem com blindagem de argônio.

Hermans e Ouden (1999) estudaram a estabilidade do processo GMAW no modo de transferência curto-circuito. Aquele autor monitorou alguns parâmetros para soldas feitas sob diferentes condições, evidenciando que a estabilidade é obtida apenas por um conjunto específico de parâmetros, e que está diretamente relacionada às oscilações da poça.

Bazargan *et al.* (2008) estudaram a estabilidade do processo GMAW e sua dinâmica interna, considerando o processo como um sistema MIMO (múltiplas entradas múltiplas saídas). Aqueles autores projetaram um modelo com base no controle não linear que regulasse a tensão e a corrente de arco. A resposta foi avaliada por simulação, onde foi possível identificar que a taxa de massa de vaporização e oxidação do eletrodo devem ser consideradas.

Moore *et al.* (1998) regularam a corrente e tensão de arco no processo GMAW por meio do controle simultâneo da velocidade de alimentação de arame e a tensão de soldagem em circuito aberto; e ainda, desenvolveram um modelo empírico para provar a sua estratégia de controle do referido processo. Os resultados obtidos foram satisfatórios.

Barborak *et al.* (1999) determinaram a qualidade de ignição do arco, a estabilidade do arco e o modo de transferência metálica, através do sensoriamento do arco. A técnica desenvolvida visou a detecção de perturbações no processo GMAW com resultados promissores.

Boselli *et al.* (2011) desenvolveram um modelo dependente do tempo para o destacamento da gota no processo GMAW, no modo de transferência globular, considerando a formação da gota a partir do volume do fluido e a difusão dos vapores metálicos. Os resultados foram comparados numericamente com imagens experimentais obtidos em alta velocidade, com boa acurácia entre eles.

Santana (2010) desenvolveu um modelo matemático para simular os aspectos elétricos e operacionais do processo GMAW. Os parâmetros simulados apresentaram bons resultados quando comparados com dados experimentais da soldagem.

Eagar (1982) delineou as potenciais aplicações da física no avanço da tecnologia de soldagem a arco, concentrando-se na análise física da soldagem automática por arco. Os resultados mostraram a necessidade do estudo físico fundamental nesta área.

Gomes (2006) analisou o comportamento da soldagem por curto-circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi, onde identificou estatisticamente os fatores controle de maior influência no processo, pela análise do comportamento do arco elétrico, bem como das características geométricas e econômicas do cordão de solda.

Modenesi *et al.* (2011) avaliaram metodologias para a determinação da resistividade elétrica e a soma das quedas de tensão anódica e catódica, considerados como parâmetros básicos para a modelagem matemática do GMAW- S. Os parâmetros foram obtidos pela aplicação das técnicas propostas nas provas experimentais.

Labanda (2005) estudou a influência dos parâmetros no processo de soldagem a arco utilizando modelos de elementos finitos. Os resultados mostraram que o método constituiu uma ferramenta poderosa para reduzir intervalos de variáveis e encontrar valores dos diferentes parâmetros na soldagem robotizada para a obtenção de soldas aceitáveis.

Lancaster (1984) explicou o comportamento físico dos fenômenos envolvidos na soldagem, partindo da premissa de que a maior compreensão da física de soldagem leva à melhor aplicação e controle dos processos de soldagem.

No estudo de Thomsen (2005), o comprimento do arco do processo GMAW manual foi controlado mediante a linearização da realimentação. O controlador teve por base um modelo não linear SISO (*single in, single out*), onde as não linearidades foram canceladas,

a fim de permitir a realimentação do sistema. Os resultados do modelo não foram muito precisos, porém, permitiu obter valores práticos para o desenho do sistema.

Wêglowski *et al.* (2008) estudaram a influência da corrente de soldagem sobre a transferência de metal do processo GMAW. Os resultados mostraram que a taxa de alimentação de arame determinou os valores da corrente, o que teve uma influência significativa no diâmetro das gotas, na velocidade de deslocamento da gota e na taxa de transferência da mesma. Tais resultados foram obtidos da análise de imagens do processo obtidas com câmaras de velocidade.

Em suma, os estudos destacados nas linhas anteriores apresentam diferentes abordagens para o desenvolvimento de modelos da dinâmica do processo GMAW. No entanto, ainda não foi encontrado um modelo que descreva exatamente tal processo, devido à natureza complexa dos fenômenos envolvidos.

3.2 ESTUDO DO DESTACAMENTO DA GOTA DE METAL FUNDIDO E TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM GMAW

No processo de soldagem, é possível a percepção de vários modos de transferência de metal, que desempenham um papel importante na transferência de calor e massa ali existente. No entanto, recentemente têm sido realizadas algumas tentativas para compreender a base física para a dinâmica da transferência das gotas. É evidente que uma maior compreensão do comportamento de transferência de metal ajuda a melhorar a eficiência e a qualidade de soldagem; o interesse de pesquisadores para saber o que ocorre no processo de crescimento e destacamento da gota encaminhou os mesmos ao desenvolvimento de modelos baseados em descrições simplificadas dos efeitos que influenciam o processo de formação de gotículas, tendo em vista ser este um processo muito complexo que inclui a natureza dinâmica do crescimento de gotículas, a interação térmica entre o fio e o plasma, o acoplamento dinâmico entre os fluxos de massa no interior da gotícula de metal e o gás de plasma.

A descrição da transferência de metal do processo GMAW tem por base a teoria do equilíbrio estático de forças (SFBT) e a teoria de instabilidade *pinch* (PIT). A SFBT determina o tamanho da gota a partir de um equilíbrio entre as forças de fixação (força de

tensão superficial) e as forças de destacamento (força gravitacional e eletromagnética) que atuam sobre a gota. A PIT é utilizada para derivar as dimensões de gotículas, considerando as instabilidades criadas em uma coluna de metal líquido sob a influência da pressão magnético no interior do metal líquido.

Neste sentido, Kim e Eagar (1993) compararam a SFBT e a PIT, a fim de prever o tamanho das gotas produzidas no processo GMAW na transferência de metal, em função da corrente de soldagem. Os resultados experimentais do tamanho de gotas nas diferentes correntes foram comparados com as previsões teóricas dos métodos utilizados. A teoria da instabilidade *pinch* resultou inadequada para explicar o fenômeno da transferência de metal nos modos globular e spray, ao contrário da teoria do equilíbrio estático de forças, que previu o tamanho das gotas na transferência globular, mas, na transferência em spray, só obteve sucesso na corrente pulsada.

Nemchinsky (1994), sob um diferente ponto de partida, desenvolveu uma equação para determinar a forma e o tamanho da gota líquida de metal fundido na ponta do eletrodo, o que permitiu conhecer o volume máximo suportado na ponta do eléctrodo e o raio da gota formada, obtendo resultados mais precisos, comparados com modelos existentes da SFBT e da PIT. Vale destacar também que a equação descreve as principais alterações da transferência de metal, onde o tamanho da gotícula apresentou lenta diminuição com correntes baixas. Para correntes mais elevadas, aquele autor propôs um modelo não estacionário para a formação de gotas, no modo de transferência spray. Os resultados obtidos pela comparação dos dados calculados e medidos mostraram boa correlação.

Na Austrália, Simpson e Zhu, (1995) apresentaram um modelo dinâmico teórico para prever a formação de gotículas fundidas em um eletrodo de arame em movimento, para soldagem GMAW. Aqueles autores assumiram a iniciação do processo sob a forma de uma coluna de líquido cilíndrica artificial, evoluindo para uma gota em forma esférica, em baixa corrente, até atingir altas correntes, onde o comportamento era afetado por uma constrição magnética *pinch*, que restringia a gota, deixando-a com uma forma alongada. O tamanho e a forma da gota no modelo se deram em função da corrente de soldagem, do efeito eletromagnético *pinch*, da força de tensão superficial, gravitacional e da transferência de impulso. O modelo apresentou resultados promissores, mas, tem-se aí apenas uma descrição teórica sobre o processo de formação da gota, porque foram escolhidas arbitrariamente as condições iniciais, assumindo-se determinados perfis em

alguns processos físicos que poderiam influenciar a formação de gotas. De qualquer modo, segundo os referidos autores, abre-se a porta para o desenvolvimento de um modelo mais completo a partir dos dados fornecidos.

Haidar, (1998) concretizou a análise da formação de gotículas de metal fundido na soldadura em arco, através do desenvolvimento de um modelo com base nas equações de conservação de massa, energia, impulso, corrente, a lei de Ohm e a equação de Maxwell, levando-se em conta os efeitos da gravidade, tensão superficial, força magnética, força de arrastamento viscoso, inércia e pressão arco. O referido estudo analisou os efeitos específicos do processo, fazendo uso de argônio como gás de proteção, uma vez que a transferência metálica se deu no modo spray e globular. Tal modelo prediz o tamanho de gota na variação de parâmetros e, conforme as forças que atuam sobre esta, obtiveram-se resultados consistentes aos observados na soldagem.

Jones *et al.* (1996) realizaram experimentos em GMAW, onde observaram o comportamento das forças magnéticas que atuam sobre a gota na sua evolução dinâmica, bem como a dependência das forças com a forma instantânea da gota; e ainda, relataram uma técnica para aproximar a evolução temporal das forças a partir de medições experimentais da forma das gotas. Neste sentido, aqueles autores empregaram técnicas de vídeo para seguir o comportamento do processo, e os resultados evidenciaram um grande incremento das forças magnéticas no momento do destacamento da gota. Em outra publicação Jones *et al.* (1997) desenvolveram também um modelo dinâmico para simular o destacamento da gota no processo GMAW, evidenciando a influência dos efeitos físicos (força de gravidade, forças magnéticas) e a dinâmica do processo (aceleração gota no plasma, destacamento da gota) na resposta dos parâmetros de soldadura. Para a simulação da forma de volume da gota, os mesmos partiram, inicialmente, de uma elipsoide truncada, onde o crescimento e o destacamento da gota foram influenciados pelas forças espacialmente distribuídas que atuam sobre a mesma; a predição da forma *a priori* foi determinada pela SFBT, e o ajuste da forma da gota deu-se mediante a resposta dinâmica do centro de massa. As simulações do modelo foram comparadas com medidas de imagens de vídeo obtidas nas provas experimentais, com resultados semelhantes, corroborando a validade do modelo; e ainda, estudaram o papel das forças Marangoni na penetração, chegando à conclusão de que as grandes depressões da poça de fusão durante a soldagem foram causadas pela tensão de cisalhamento Marangoni.

O uso de vídeo e processamento de imagem para extrair informações de fenômenos que ocorrem em processo de soldagem e que são incapazes de serem estudados e observados diretamente, é uma técnica que tem sido amplamente utilizada por vários autores para a validação de seus estudos. Como exemplo, tem-se o estudo de Tolle *et al.* (2002) que estudaram a evidência de determinismo no destacamento da gota no processo GMAW, por meio da análise do conteúdo dos sinais elétricos, especificamente nas medições de tensão entre o bico de contato e a peça de trabalho. Aqueles autores fizeram uso da Transformada Rápida de Fourier para dividir o sinal de tensão nos seus componentes espectrais senoidais, e determinar o modo de transferência de gota, bem como a frequência de transferência das gotas; depois, os mesmos compararam tais resultados com aqueles obtidos por vídeos, e ainda, empregaram técnicas de análise de caos, a fim de determinar o destacamento da gota como um processo estocástico ou determinista, evidenciando, com base na evidência coletada, um processo deterministicamente conduzido, ao invés de um puramente estocasticamente conduzido.

Huang *et al.* (2012) também desenvolveram um modelo não linear modificado do processo GMAW, que incluiu o uso da pressão de recuo laser a fim de proporcionar uma força auxiliar no destacamento da gota com o diâmetro desejado, que objetivasse o emprego no controle de circuito fechado para a qualidade da solda. Para tanto, aqueles autores combinaram a força de pressão laser dentro da teoria de equilíbrio dinâmico de forças e, assim, obtiveram o critério de reinicialização do sistema e destacamento da gota. O modelo foi simulado em *simulink*, e os resultados foram comparados com aqueles obtidos experimentalmente, além do uso da câmera; verificou-se ainda que o modelo era adequado para prever o processo de crescimento de gota, para um controle posterior do processo.

O uso de vídeo e processamento de imagem é uma técnica amplamente explorada por Nascimento (2007) que desenvolveu um sistema de visão computacional para capturar imagens em tempo real do processo de soldagem GMAW convencional, no modo de transferência metálica por curto-circuito para a análise da poça de fusão. Aquele autor sincronizou a ocorrência de um curto-circuito com a captura de imagem, a fim de excluir o brilho do arco, concretizando uma medição precisa da posição do arame de soldagem e da poça fundida. Os resultados obtidos foram bons, com imagens de boa qualidade, que permitiram o processamento robusto de imagens da poça de solda.

Seguindo o caminho de Duarte, Mendes e Ferraresi aplicaram a técnica de Shadowgrafia laser e câmara de vídeo de alta velocidade para obter informação dos modos de transferência de metal na soldagem MIG de alumínio, com a ajuda de técnicas de tratamento de imagem e aquisição de dados (tensão e corrente). Aqueles autores determinaram quatro modos de transferência (curto-circuito, globular, goticular e globular/curto-circuito), em que foram encontrados regiões e pontos de soldagem, onde ocorreram modos de transição de transferência metálica, de forma aleatória, para a mesma condição de soldagem.

O processo GMAW no modo de transferência por curto-circuito se dá a partir de uma sequência de períodos de arco e períodos de curto-circuito. O estudo do referido processo, alterando os dois estados supracitados, dá origem a um modelo híbrido, em que Planckaert Planckaert *et al.* (2007) desenvolveram um modelo de contornos ativos que segue o comportamento dinâmico do ponte de metal fundido estabelecido no momento do curto-circuito, e gera uma estimativa das variáveis relevantes para a concretização de um modelo de soldagem MIG/MAG. E ainda, propôs-se aqui um simulador com equações de espaço de estados, levando-se em conta as forças principais que atuam sobre o metal fundido no ciclo completo (arco-curto). A validação foi feita mediante comparação dos dados experimentais gerados por algoritmo de contorno ativo e aqueles obtidos pelo simulador. Os resultados obtidos e as previsões do modelo foram consistentes com os dados experimentais. No entanto, o ajuste de alguns parâmetros foi passível de necessidade de melhoria.

Souza et al. (2011) avaliaram a influência da tensão de soldagem e do gás de proteção, na correlação entre a indutância e a regularidade da transferência por curto-circuito na soldagem MIG/MAG, por meio da variação da tensão para três valores diferentes de indutância, e dois tipos de gases de proteção. Para visualizar a transferência de metal, aqueles autores empregaram perfilografia sincronizada com filmagem de alta velocidade, que, em conjunto com a análise de sinais de corrente e tensão, evidenciaram que a tensão de soldagem e o gás de proteção não influenciaram as taxas de variação da corrente para uma mesma regulação da indutância, mas que, mesmo assim, a regularidade do processo é dependente do gás de proteção e da tensão de soldagem.

Dobignies (2008) avaliou o rendimento de deposição de material na soldagem MIG/MAG em condições de transferência metálica por curto-circuito forçado, através do controle da

indutância, da distância bico de contato peça e da velocidade de alimentação de arame. No desenvolvimento de experimentos, foram realizadas medições do peso inicial e final das chapas de aço, com os respingos coletados após o processo da soldagem para o cálculo do rendimento de deposição de material, sob a influência da variação de parâmetros. Aquele autor verificou que a estabilidade do arco do curto-circuito forçado, o rendimento do material depositado e o tamanho dos respingos gerados são influenciados pelos parâmetros de estudo, mas não foi possível estabelecer um critério de relação entre o rendimento e a estabilidade de arco.

Bless (1974) estudou a transferência metálica da gota na soldagem, no modo curto-circuito, através de experiências com gotas de soluções aquosas de KCL e mercúrio. Aquele autor construiu equipamentos especiais para simular as condições da transferência com cada uma das soluções, onde foi possível observar os efeitos da tensão superficial e a força de Lorentz no momento do contato com a poça. Os resultados mostraram que gotículas com tamanho maior do crítico estabelecido, foram transferidas para a poça de fusão; em caso contrário, conduziram à formação de um menisco estável. A corrente elétrica gerou uma força repulsiva no caso de gotas com raios pequenos, puxando a gota fora da poça e gerando respingos; e ainda, a instabilidade magnética *pinch* dominou os efeitos da tensão superficial em condições extremas, bem como a indutância magnética

Gonçalves *et al.* (2008) abordaram a pesquisa sobre o processo GMAW por curto-circuito controlado e desenvolveram ferramentas de avaliação da estabilidade do processo, por meio do método de controle da energia no período de curto-circuito, com base na dinâmica da ponte metálica. A dinâmica da transferência metálica foi estudada desde o contato entre a gota e poça, passando pela formação da ponte metálica, até o completo destacamento, avaliada por experiências práticas e o uso de ferramentas computacionais para a simulação de modelos.

Lima e Scotti (2003) fizeram a avaliação cinemática e elétrica da transferência metálica na soldagem GMAW, empregando eletrodos de aço, aço inoxidável e alumínio. Aqueles autores mediram as características cinéticas da gota e seus efeitos sobre a geometria do cordão de solda, bem como a influência da resistência elétrica da gota metálica sobre o desempenho do controle interno de fontes de soldagem; e ainda, avaliaram formas de obtenção dos arcos estáveis pelo controle ou interferência sobre a transferência metálica,

por meio de técnicas de vídeo, processamento de imagens e sincronização de sinais e o auxílio de um planejamento estatístico experimental para o estudo dos fenômenos.

Hu e Tsai, (2006) desenvolveram um modelo matemático que simula os fenômenos de transporte que ocorrem dentro do arco de plasma e o metal no processo GMAW. O modelo foi unificado por acoplamento dos sistemas através de condições de fronteira interfacial em cada passo de tempo, onde foram considerados aspectos da fusão do eletrodo, a formação de gotículas, o destacamento, a transferência e o impacto sobre a peça, e a dinâmica da poça. Aqueles autores observaram que a transferência da gotícula e a deformação da superfície da poça afetam as distribuições transientes da densidade de corrente, temperatura e pressão de arco, evidenciando a não distribuição de Gauss.

Kim, *et al.* (1991), realizaram uma análise quantitativa do comportamento térmico do eletrodo em GMAW, com ênfase na transferência metálica spray com eletrodos de aço e blindagem de argônio, a fim de determinar fenômenos relevantes no controle da taxa de fusão. Aqueles autores observaram, por meio de experimentos, a forma do eletrodo, o tamanho das gotículas, os modos de transferência e sua relação com parâmetros para o controle da soldagem, onde foram extraídas as condições para o desenvolvimento de simulações computacionais. Os resultados foram consistentes com as simulações.

Thomsen (2005) desenvolveu um modelo matemático do processo GMAW, ao passo que executou a simulação e o controle para o comprimento de arco, a transferência de metal e a corrente de soldadura. O modelo inclui aspectos da descrição do circuito elétrico, a dinâmica da gota e a velocidade de fusão do arame, onde a gota foi modelada como um sistema massa-mola-amortecedor influenciado por forças externas, e a taxa de fusão do eletrodo consumível foi modelada dinâmica e estatisticamente. No comprimento de arco, fez-se um controle não linear baseado em linearização e realimentação. O controle da transferência de metal deu-se pela obtenção de um tamanho de gota uniforme antes de pulso iniciação. Os resultados obtidos na simulação e de controle foram bem sucedidos. No entanto, a simulação foi o único critério de validação utilizado, uma vez que não foram realizados testes experimentais.

Beard e Chuang (1987) desenvolveram um modelo para prever a forma em equilíbrio das gotas de chuva, a partir da equação de Laplace, e proporcionaram respostas adequadas à distorção da forma causada pela pressão hidrostática e aerodinâmica. De fato, os conceitos utilizados para a modelagem da forma da gota de água podem ser muito úteis na

modelagem de gotículas de metal fundido na soldagem, com base na premissa de que, em ambos os casos, são fluidos, e adquirem forma aproximadamente esférica.

Liskevych e Scotti (2012) avaliaram um critério para o cálculo da estabilidade no processo GMAW, por meio da relação entre a frequência de destacamento das gotas para teores diferentes de CO₂ com a frequência dos curtos-circuitos obtidos pelo análise estatística das curvas da tensão e corrente. Os resultados mostraram a necessidade de melhorar a técnica de avaliação.

Neste trabalho a frequência de destacamento das gotas para teores diferentes de CO₂ foi relacionada com frequência dos curtos-circuitos obtidos pelo análise estatística das curvas da tensão e corrente.

Jones et al., (1998a) desenvolveram um modelo dinâmico do destacamento da gota no processo GMAW nos modos de transferência por voo livre (globular e *spray*) e estudaram o efeito das forças magnéticas. Os resultados das simulações do modelo foram comparados com as medições experimentais, obtidas a partir das imagens de soldagem, observando o fato de que as forças magnéticas axiais experimentais foram menos potentes do que as forças magnéticas axiais calculadas. (Lim, 2006) determinou a forma de uma gota de água a partir de um conjunto de equações básicas, com soluções fornecidas pelos cálculos numéricos.

3.3 ESTUDOS FORA DA POSIÇÃO PLANA

É muito comum encontrar uma extensa pesquisa na área de soldagem na posição plana, em que todo o processo se dá na mesma posição, sem variação angular de montagem. Alguns pesquisadores têm se interessado em conhecer os efeitos gerados na soldagem, por processos realizados fora da posição plana, que, no caso da soldagem de tubos, inclui posições de solda plana, vertical e sobre cabeça, no qual a variação do ângulo de soldagem tem um efeito significativo na geometria do cordão de solda e nas suas propriedades.

Neste sentido, têm-se na presente seção, os trabalhos desenvolvidos por pesquisadores de acordo com o seu interesse, para a contribuição no referido campo de estudo. Doodman (2010a) por exemplo, estudou o destacamento da gota para soldagem automática GMAW

em tubulações, no modo de transferência spray e globular, por meio da simulação de um modelo espaço de estado modificado, que inclui a velocidade de soldagem e o ângulo de soldagem (0° - 180°). A influência do ângulo no destacamento da gota foi incluso na modelagem dinâmica, além das equações características do processo. Aquele autor aplicou o modelo do SFBT para a condição de destacamento, ao comparar a tensão superficial com as outras forças que atuam sobre a gota. A frequência dominante de desprendimento, os efeitos de perturbações e a irregularidade nos destacamentos foram analisados nas simulações, utilizando-se a representação tempo-frequência, que explica o comportamento do destacamento durante as variações de ângulo. A comparação dos dados experimentais (tensão e corrente) obtidos por simulação gerou a boa concordância entre os mesmos.

Doodman (2010b), ao continuar o referido estudo, aplicou o mesmo à transferência no modo curto-circuito, modificando o modelo apresentado para modo de transferência metálica por voo livre (spray e globular), incluindo o modo curto-circuito, onde considerou o efeito da variação do ângulo na equação da velocidade de fluxo (além do proposto no modelo destacado anteriormente), uma equação dinâmica para extinguir a tensão no momento do curto, empregando uma forma cônica em vez de uma forma esférica para representar a ponte metálica gerada no período de curto-circuito. A transferência metálica foi dividida em três estados (período de arco, período de curto e o evento de destacamento da gota), com equações características para representar os fenômenos envolvidos em cada um dos estados, e foram alternados repetidamente de acordo com as condições estabelecidas para a mudança de período. No estudo do referido autor, foram estudados o salto de frequência e o modo de transferência combinado, causado por variações de ângulo através da simulação e exemplos experimentais. A validação das respostas fez-se por comparação dos dados experimentais e simulados para alguns exemplos propostos por Doodman. Os resultados mostraram que o salto de frequência e o modo combinado apareceram em alguns pontos operacionais onde o destacamento da gota foi irregular pela instabilidade na frequência de transferência. Apesar das mudanças empregadas em tal modelo, estas não foram suficientes para explicar o comportamento físico da transferência por curto-circuito, uma vez que não foram minuciosamente estudados os fenômenos reais do processo, considerando-se a influência das equações que modelam a transferência por voo livre, bem como as mesmas forças que atuam no período de arco para o período de curto, segundo o estudo realizado por Bless (1974) que se concentrou no estudo do comportamento dos fenômenos ligados à transferência por curto-circuito.

O destacamento da gota tem sido investigado como uma questão importante na dinâmica do processo GMAW, onde o destacamento regular é uma das condições necessárias para atingir a transferência de massa adequada para a peça de trabalho, a fim de garantir o bom desempenho na soldagem. Neste sentido, Doodman (2010) neutralizou o efeito da variação do ângulo no destacamento da gota, através do controle da força gravitacional, pela manipulação da força eletromagnética com o ajuste da corrente de soldagem, levando-se em conta a relação direta da força eletromagnética com o quadrado do valor da corrente. Aquele autor acabou por gerar um padrão de corrente de soldagem para neutralizar o efeito da variação do ângulo em torno do tubo, além dos padrões adequados para a tensão do arco, velocidade de deslocamento e velocidade do eletrodo, a fim de manter em igualdade o volume eletrodo fundido, a entrada de calor, a relação tensão-corrente e a densidade de energia, e ainda, alcançar uma taxa de deposição constante. Doodman também desenvolveu exemplos experimentais e simulados do método apresentado, cujos resultados foram avaliados pela representação tempo-frequência e comparados com os resultados sem o efeito da neutralização da variação do ângulo. Aqui é preciso destacar que os resultados foram satisfatórios com melhorias no comportamento do destacamento.

As posições verticais ascendentes e descendentes foram o foco de estudo de alguns pesquisadores, motivados por variações evidentes em ambos os lados. Neste sentido, Costa (2012) estudou parâmetros e técnicas de soldagem para a união de dutos de pequeno diâmetro, com processo MIG/MAG automatizado no modo curto-circuito, nas direções de soldagem, ascendente e descendente. Aquele autor planejou dezesseis ensaios para ambas as direções de soldagem, com a variação da velocidade de alimentação do arame, a tensão de referência, o ângulo de ataque da tocha e a oscilação da tocha; os melhores cordões foram analisados por macrografia, e as mordeduras nos cordões soldados na direção ascendente foi o único indicador de descontinuidade encontrado, além de concluir que para aquela direção, a oscilação da tocha favorece a redução do reforço da raiz e o aumento da largura do cordão, o aumento da velocidade de alimentação promove o aumento da penetração e, com o ângulo da tocha positivo, observou-se o mesmo efeito do ângulo negativo. Para a direção vertical descendente, os resultados foram diferentes, devido ao fato de que a tocha com ângulo positivo aumentou o reforço da face e reduziu o reforço da raiz, enquanto o ângulo negativo mostrou um comportamento oposto. Portanto, para a direção vertical ascendente, requerem-se parâmetros que possam reduzir a penetração, e a

posição vertical descendente necessita de parâmetros que regulem o escoamento do metal fundido.

Nos mesmos estudos fora da posição plana, Silva (2006) comparou os modos de transferência metálica por curto-circuito e pulsado, empregando eletrodo tubular sob proteção gasosa, na posição vertical descendente, onde estabeleceu as melhores condições de ajustes das variáveis em cada modo de transferência a partir de técnicas estatísticas. Foi possível a análise das respostas para cada processo a partir da estabilidade do arco, das características geométricas, econômicas, e da qualidade visual do cordão de solda, onde o modo pulsado foi superior ao modo de curto-circuito sob o ponto de vista econômico e propriedades mecânicas.

Alguns pesquisadores propuseram equipamentos e dispositivos para aperfeiçoar o processo de soldagem e aliviar as tarefas executadas pelo ser humano. Lima II *et al.* (2005) desenvolveram um robô para soldagem orbital, constituído por um pequeno carro que se move ao redor do tubo com quatro graus de liberdade para o movimento da tocha, e é ordenado por um banco de dados que fornece parâmetros ótimos em cada posição de soldagem. Os resultados gerados pelo robô foram satisfatórios e cumpriram com o propósito para o qual foi desenvolvido, onde os cordões de solda não apresentaram grandes variações de uma posição de soldadura para outra, pela utilização da alteração gradual de parâmetros; no entanto, está sujeito a um processo de otimização.

Liao e Xi (2009) propuseram um protótipo de um sistema de detecção do cordão de solda em tubos com base em uma máquina visão, para a inspeção de tubulações. Aqueles autores empregaram um computador embutido na construção dos equipamentos de detecção portátil, além de outros dispositivos para aquisição e processamento de dados em tempo real, a fim de obter informação precisa da solda.

Faz-se importante destacar que além de equipamentos tecnológicos, o ser humano tem desenvolvido programas de *software* sofisticados, para simplificar as tarefas e contribuir para a análise e visualização de dados nas pesquisas. Neste sentido, Bingzhe, *et al.* (1995) empregaram redes neurais para o controle do comprimento da poça de fusão e a taxa de resfriamento na soldagem GTAW em tubos, a fim de manter as características geométricas e metalúrgicas uniformes ao longo do percurso semicircular. A velocidade e corrente de soldagem foram cruciais para a obtenção das características desejadas e o treinamento do neurônio. Os resultados obtidos foram utilizados para a simulação numérica do processo,

cuja resposta mostrou o bom funcionamento do controlador neural para manter as características uniformes. E ainda, aqueles autores propuseram a utilização de duas tochas operadas simultaneamente no sentido horário e anti-horário, a fim de reduzir o efeito do pré-aquecimento do material de base.

Costa (2011) estabeleceu as vantagens e os limites operacionais do processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito convencional e controlado, na união de dutos de pequeno diâmetro nas progressões ascendente e descendente. Os resultados mostraram que o CC convencional apresentou resultados razoáveis nas duas progressões, e o CC controlado apresentou melhores respostas na progressão descendente.

Scotti (2008) apresentou um estudo sobre o estado da pesquisa e investimento na soldagem no Brasil. Aquele autor atentou para a existência de um grande potencial de crescimento na demanda e a pesquisa sobre tecnologia de soldagem, no qual as estatísticas indicaram que o investimento em pesquisa se dá de forma mais rápida do que a inflação e a produção soldada.

3.4 FORÇAS AGINDO SOBRE A GOTA DE METAL FUNDIDO

No processo de soldagem, existem muitas forças envolvidas no processo de formação e separação da gota, nos diferentes modos de transferência de metal. Alguns pesquisadores têm se interessado no estudo do comportamento das forças, devido à importância do conhecimento do comportamento físico, para exercer algum tipo de controle, visando melhorar o referido processo. As abordagens têm sido feitas indiretamente, pela dificuldade de visualização direta dos fenômenos envolvidos.

Waszink e Graat (1983) investigaram as forças que atuam sobre as gotículas de metal fundido geradas no processo GMAW, nos modos de transferência globular, em posição plana. O modelo utilizado no cálculo de tais forças teve por base a transferência da gota a partir de tubos capilares. Assim, as forças consideradas foram: a gravitacional, a eletromagnética, de arrasto e de tensão superficial. Estudou-se ainda a separação da gota do eletrodo, que se torna instável quando este atinge a massa crítica e cai. No entanto, não se tem clareza sobre o procedimento utilizado e como os dados foram obtidos, enfatizando-se que este é um fenômeno complexo e de difícil observação.

Amson (1965) estudou a contribuição do componente axial da força de Lorentz, sobre as forças de destacamento da gota na ponta fundida do eletrodo, por meio da integração da tensão de Maxwell em toda a superfície da ponta. No estudo da sequência do perfil de crescimento da gota, aqueles autores determinaram que a força de Lorentz, em primeiro lugar, impede o destacamento e, em seguida, assiste e, finalmente, o promove assim que o pescoço da gotícula for substancialmente formado.

Burleigh e Eagar (1983) mediram a força exercida pelo arco de soldagem estabelecido entre um eletrodo de tungstênio e uma poça de gálio líquido. Para a obtenção de medições reais, foram realizados experimentos dentro de uma câmara cheia de gás argônio, a fim de eliminar a força exercida pelo fluxo de gás de proteção. Os resultados revelaram que a força do arco de soldagem é proporcional ao quadrado da corrente, e a força total exercida pelo jato de plasma varia parabolicamente com a corrente de soldagem. Não foi encontrada nenhuma correlação aparente entre a penetração e a força do arco ao utilizar diferentes fluxos de superfície. Vale destacar que somente para correntes acima de 200 amperes é que a força foi importante no controle da forma da poça de fusão.

Neste sentido, resultados semelhantes foram encontrados na pesquisa realizada por Jones *et al.* (1998b) onde observaram experimentalmente manifestações de forças magnéticas e propuseram uma técnica para aproximar a evolução temporal da força magnética axial, a partir da forma da gota medida experimentalmente no processo GMAW, no modo de transferência globular. Os resultados obtidos ilustraram que o comportamento convergente e divergente gerado pela corrente, atua como uma força para cima ou para baixo sobre o fluido da gota, além do aumento nas forças magnéticas quando a gota é separada do eletrodo.

Nemchinsky (1996) estudou a distribuição da corrente sobre as gotas de metal fundido na ponta do eletrodo, e a maneira pelo qual o tipo de gás de plasma afeta a sua distribuição. Aqueles autores evidenciaram a dependência da força de Lorentz (que atua sobre o ânodo do arco) com o tipo de gás, com base nas características de densidade de corrente-tensão da camada do ânodo em diferentes gases e a diminuição da força de Lorentz com a existência de densidades negativas. E ainda, a força de Lorentz era maior quando da utilização do gás argônio em vez do gás hélio.

Com base na pesquisa apresentada no presente capítulo, foi possível estabelecer a existência de lacunas e pouca informação sobre a questão do desenvolvimento de modelos

matemáticos do processo GMAW-S aplicados à soldagem orbital. Alguns autores descreveram tal processo de modo semelhante ao tratamento dos processos de soldagem com transferência metálica por voo livre; outros identificaram duas fases na transferência metálica por curto-circuito, porém, as dificuldades do conhecimento dos fenômenos envolvidos no período de curto-circuito geraram que os fenômenos físicos foram abordados nas duas fases sob a mesma perspectiva do período de arco (transferência de metal por voo livre), o que constitui um ponto fraco na representação do modelo, uma vez que os fenômenos físicos envolvidos em cada evento são completamente diferentes, e devem ser tratados adequadamente para conseguir definir equações que representem adequadamente o processo real. E ainda, a informação é limitada e pouco explicativa, dificultando a utilização dos modelos existentes para execução direta – por serem equações não lineares e mutuamente dependentes, faz-se necessário estabelecer pontos de partida iniciais (não mencionados) para a obtenção de algum tipo de resposta.

De fato, o cenário descrito anteriormente influenciou o tema de pesquisa aqui proposto, a fim de criar um modelo híbrido composto por dois estados (período de arco e período de curto-circuito) para representar o processo GMAW-S na soldagem orbital, o mais aproximado para a realidade, através da aplicação de equações matemáticas que representam exclusivamente aos fenômenos envolvidos em cada fase, visando contribuir ao conhecimento nesta área e criar uma ferramenta para o estudo da transferência metálica, a fim de estabelecer estratégias de controle com base em suas respostas.

4 METODOLOGIA

São apresentadas neste capítulo as diferentes estratégias, procedimentos e fundamentos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho.

4.1 GENERALIDADES DA MODELAGEM DO PROCESSO GMAW-S COMO SISTEMA HÍBRIDO NA SOLDAGEM ORBITAL

O processo apresenta um comportamento marcante e diferenciado de outros tipos de transferência de metal por voo livre (globular ou goticular *spray*), pois é o único que inclui dois comportamentos distintos no curso da soldagem, ao alternar consecutivamente dois períodos, onde se dá a formação e o crescimento da gota de metal fundido na ponta do eletrodo, e a transferência de metal para a poça de fusão – estes são chamados de períodos de arco e períodos de curto-circuito, respectivamente.

As razões expostas anteriormente levam ao estudo e tratamento de processo GMAW-S como um sistema híbrido, que exige tratamento físico e matemático específico para a modelagem de cada uma das etapas que o compõem, a fim de abordar os fenômenos que ocorrem na realidade. A Figura 4.1, a seguir, apresenta o período de arco e curto-circuito do processo em questão, e como estes interagem de um estado para outro.

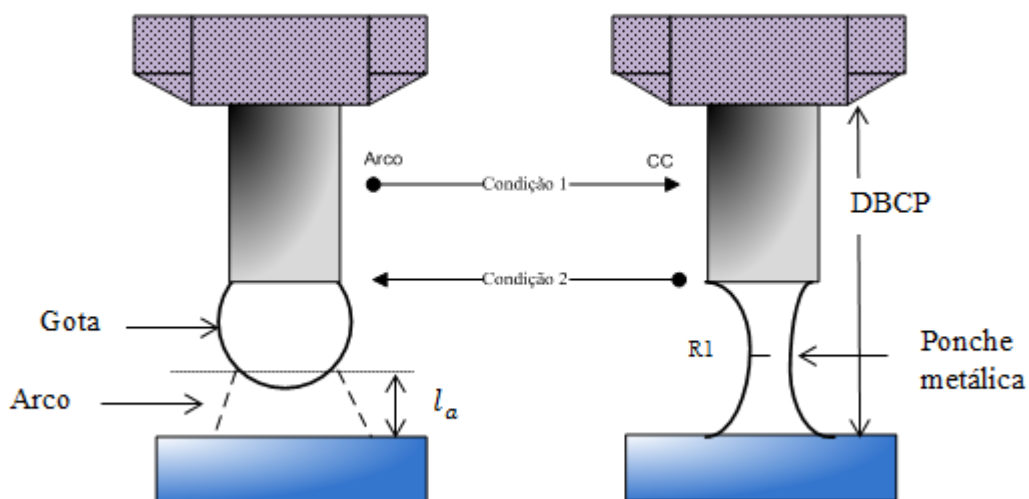


Figura 4.1 Comportamento do sistema híbrido.

O salto de um período para outro é regido por um conjunto de condições específicas a serem cumpridas a fim de gerar a mudança de estado.

Condição 1: o câmbio do período de arco para o período de curto-circuito ocorre no momento que:

- O arco é extinto, isto é, quando $l_a = 0$
- Quando o comprimento efetivo é igual à distância entre o bico de contato e a peça de trabalho $L_{ef} = DBCP$

Condição 2: indica o fim do período de curto-circuito, após a ruptura da ponte metálica, e inicia o período de arco, enquanto que satisfaz:

- O raio principal da ponte metálica tende a zero $R_1 \rightarrow 0$

A ação iterativa do processo GMAW-S se dá pelo comportamento periódico dos sinais de tensão e corrente obtidos durante testes experimentais, cuja conduta é gerada por súbitas mudanças que ocorrem entre as fases de transferência de metal e a reignição do arco que leva à formação de uma nova gota na ponta do eletrodo; e ainda, marca o início de um novo ciclo. A figura 4.2, a seguir, apresenta as alterações periódicas experimentadas pelos sinais mencionados anteriormente. Vale a pena notar que o comportamento inverso que sofrem os sinais durante os períodos de arco e curto-circuito, se dá por ocasião dos fenômenos físicos envolvidos no processo, e serão abordados com maior profundidade nas seções subsequentes.

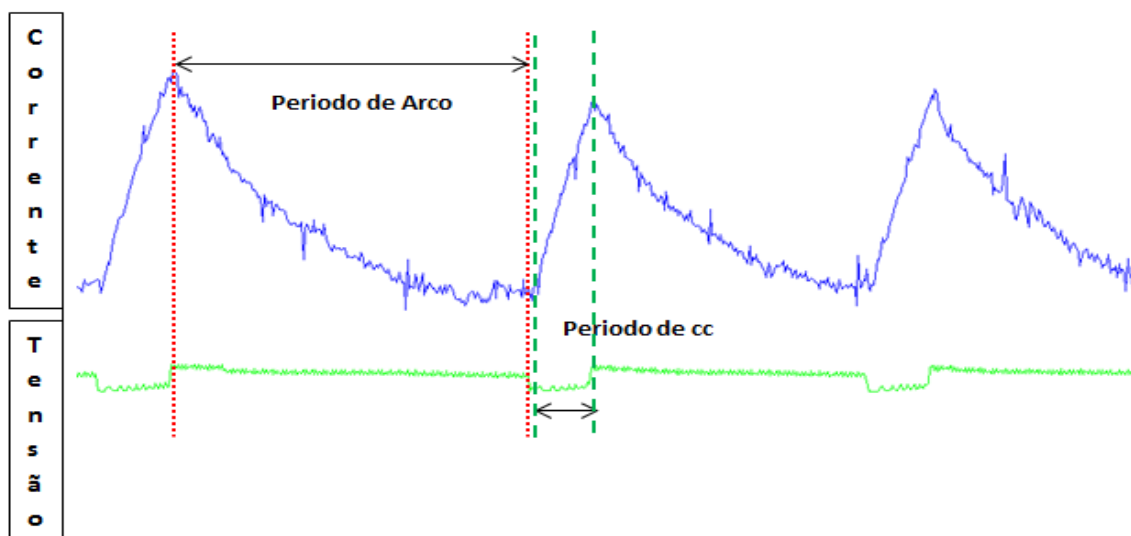


Figura 4.2: Comportamento dos sinais de tensão e corrente em GMAW-S.

4.2 MODELAGEM PARA O PERÍODO DE ARCO

No processo de soldagem GMAW, no modo de transferência por curto-circuito, existem contatos regulares entre o eletrodo e a poça de fusão. Há uma característica que diferencia este tipo de transferência dos outros modos de transferência por voo livre e, precisamente, não existe transferência de metal através do arco, devido ao fato de que a gota nunca é separada da ponta do eletrodo.

No período do arco, ocorre a formação e o crescimento da gota na ponta do eletrodo gerado pela acumulação do metal de adição fundido sob a existência do arco elétrico. O desenvolvimento do modelo matemático de tal processo requer o estudo dos diversos fenômenos que afetam o seu desempenho, e incluem aspectos relacionados aos componentes do sistema, características operacionais da fonte de energia e as forças envolvidas que comandam o comportamento da gota no referido período.

Devido à complexidade dos fenômenos físicos envolvidos neste período, foram necessários fazer uma série de suposições a fim de simplificar o processo e efetuar a modelagem segundo as seguintes considerações:

- O processo de soldagem é estável.
- A densidade do eletrodo (ρ_e) é constante às variações da temperatura.
- O ângulo de condução (θ , vide Figura 4.3) aumenta proporcionalmente em relação ao comprimento efetivo (L_{ef}).
- A geometria da gota de metal fundido é considerada esférica.
- O volume da gota evolui esfericamente de acordo com a diferença entre a velocidade de alimentação do arame (V_{ar}) e a taxa de fusão (M_R).
- O raio do volume da gotícula inicial é igual ao raio do eletrodo (r_e).

4.2.1 Forças agindo sobre a gota no período de arco

Durante o período do arco, a gota é afetada por diferentes tipos de forças que determinam a transferência de metal, cujo comportamento é regido pela teoria do equilíbrio estático de forças, que prevê o destacamento da gota por comparação da tensão de superficial da gota, com forças externas exercidas sobre esta (Thomsen, 2005). As principais forças que atuam e definem a conduta, retenção ou repulsão, da gota na ponta do eletrodo são: a força de

gravidade, a força de tensão superficial, a força eletromagnética, a força de arraste gerada pela passagem de gases e a força de reação a jato dos vapores ou ao jato de plasma (Modenesi e Bracarense, 2007). No entanto, seguindo as recomendações geradas por Planckaert *et al.* (2010a) e Doodman (2010), são consideradas para o desenvolvimento do modelo as forças que apresentam maior contribuição em relação àqueles cuja contribuição pode ser classificada como desprezível.

4.2.1.1 Força de gravidade

Esta força é a massa da gota multiplicada pela aceleração da gravidade (g). Dependendo da posição de soldagem, pode favorecer ou dificultar a transferência de metal (Paulo J Modenesi & Bracarense, 2007). Uma vez da aplicação deste modelo às condições de soldadura orbital, a força de gravidade (F_g) é influenciada pelo ângulo da soldagem (φ) (Doodman Tipi, 2010b); a equação deve, então, incluir tal fator, conforme evidenciado na Equação 4.1, a seguir, onde m_d corresponde à massa da gota de metal fundido.

$$F_g = m_d g \cos(\varphi) \quad (4.1)$$

4.2.1.2 Tensão Superficial

A tensão superficial é uma propriedade inerente de cada material em estado líquido; é determinada pela lei de Tate. Na coexistência de dois meios diferentes, a região de contato entre ambos é caracterizada por uma camada de átomos que estão submetidos a uma força direcionada ao interior do volume a que pertencem. Esta força atua no sentido de reduzir ao mínimo a energia superficial livre – no caso de líquidos, os leva a assumir a forma esférica, que é a de menor área superficial para um determinado volume (Silva, 2005); Tal fenômeno – favorece a retenção da gota na ponta do eletrodo, agindo de forma contrária a seu destacamento; e ainda, apresenta relação com raio eletrodo (r_e) e o módulo de tensão superficial do material do eletrodo (γ), conforme evidenciado na Equação 4.2, a seguir. É importante notar que este comportamento é válido para a fase de arco, uma vez que durante o período de curto-circuito, sua contribuição pode variar.

$$F_s = 2\pi r_e \gamma \quad (4.2)$$

4.2.1.3 Força eletromagnética

No processo de soldagem, o eletrodo e a gota de metal formado pela fusão do mesmo são considerados condutores de corrente, que são percorridos por um fluxo de partículas portadoras de carga (q), cujo evento pode ser comparado à produção de corrente elétrica. Tal fenômeno dá lugar à força eletromagnética, originada a partir do fluxo de corrente no interior do eletrodo, a qual, por sua vez gera um campo magnético (B) em torno do caminho da corrente, conforme a Equação 4.3, a seguir – as trajetórias geradas não seguem um padrão definido, mas tendem a convergir ou divergir dentro da gota, determinando, assim, o sentido da força eletromagnética axial, também conhecida como força de Lorentz.

$$F = q(E + v \times B) \quad (4.3)$$

Onde: v corresponde à velocidade da partícula; E representa o campo elétrico; B corresponde ao campo magnético.

No primeiro caso, quando as linhas de corrente convergem, tem-se um ângulo de condução (θ) negativo, que induz à força de Lorentz a se opor ao destacamento da gota, aliando-se com a força de tensão superficial; no caso contrário, a força eletromagnética auxilia o destacamento da gota a partir da ponta do eletrodo, e contribui no sentido da força de gravidade. Para esclarecer visualmente o comportamento da força eletromagnética em relação ao ângulo de condução, tem-se a Figura 4.3, a seguir.

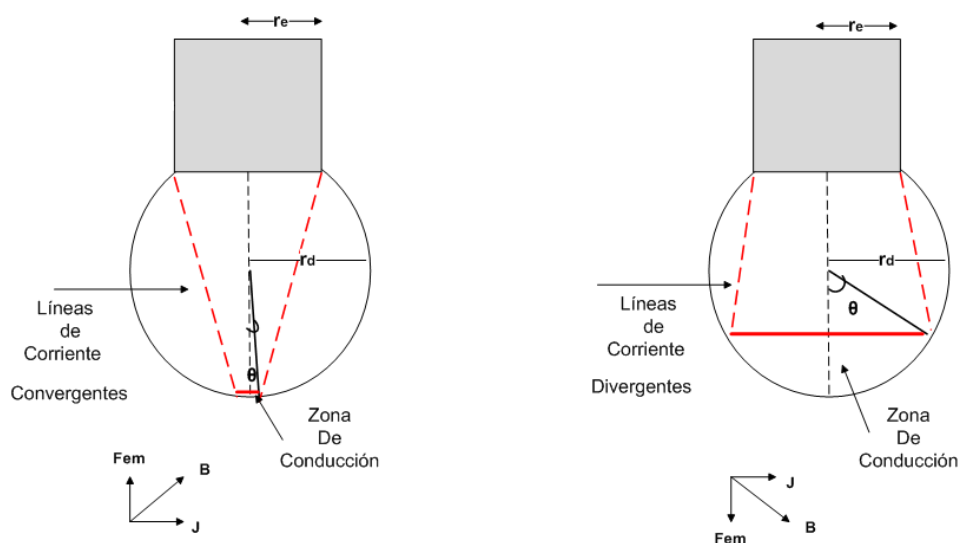


Figura 4.3: Relação entre o comportamento das linhas de corrente com o ângulo de condução e direção da F_{em} .

A força eletromagnética age sobre todos os pequenos elementos da gota, que são submetidos à f_{em} conforme apresentado na Equação 4.4, a seguir, onde J representa a densidade de corrente e B é o campo magnético. A partir da integração da referida equação sobre a corrente I que flui através da gota, tem-se a força eletromagnética total que atua sobre a gota de metal fundido na ponta do eletrodo.

$$f_{em} = J \times B \quad (4.4)$$

A equação apresentada anteriormente pode também ser expressa a partir do *Maxwell Stress*, conforme as Equações 4.5 e 4.6, apresentadas a seguir.

$$f_{em} = J \times B = \frac{1}{\mu} (\nabla \times B) \times B \quad (4.5)$$

$$f_{em} = -\frac{1}{2\mu} \nabla(B^2) + \frac{1}{\mu} (B \cdot \nabla)B \quad (4.6)$$

Na Equação 4.6, o primeiro termo gera uma força radial, agindo sobre os elementos dentro da gota, para linhas de corrente paralela ao eletrodo; quando as linhas da corrente convergem ou divergem, a força eletromagnética gera um componente para cima ou para baixo. O segundo termo expressa a força de rotação agindo sobre a gota para as linhas de corrente paralela, convergentes ou divergentes; a rotação ocorre lentamente em relação ao destacamento da gota, gerando que o termo não seja levado em conta (Thomsen, 2005). Finalmente, através da integração do primeiro termo sobre a corrente I que flui através da gota (vide Equação 4.7, a seguir), tem-se a força total eletromagnética agindo sobre a gota.

$$F_{em} = \int_{V_d} f_{em} dV = \int_{S_d} \frac{B^2}{2\mu} n ds \quad (4.7)$$

A Equação 4.8, a seguir, correspondente à força eletromagnética, onde (μ_0) representa a constante de permeabilidade magnético ($4\pi 10^{-7} \text{ NA}^2$), (r_d) o raio da gota, (r_e) o raio eletrodo e (f_z) a componente variável da força eletromagnética (vide equação 4.9, a seguir) (J.-P. Planckaert, Djermoune, Brie, Briand, & Richard, 2010b), (Jesper Sandberg Thomsen, 2005), (Amson, 1965).

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{r_d \sin(\theta)}{r_e} \right) - \frac{1}{4} - \frac{1}{1-\cos(\theta)} + \frac{2}{(1-\cos(\theta))^2} \ln \left(\frac{2}{1+\cos(\theta)} \right) \right] \quad (4.8)$$

$$f_z = \left[\ln \left(\frac{r_d \sin(\theta)}{r_e} \right) - \frac{1}{4} - \frac{1}{1-\cos(\theta)} + \frac{2}{(1-\cos(\theta))^2} \ln \left(\frac{2}{1+\cos(\theta)} \right) \right] \quad (4.9)$$

O valor da componente f_z da força eletromagnética é dependente do ângulo de condução (θ) e, portanto, responsável pela geração de mudanças comportamentais na força eletromagnética com respeito à direção em que a força é orientada. A Figura 4.4, a seguir, apresenta a relação entre (f_z) e (θ), onde a ênfase se dá no ponto de mudança do comportamento (30° aproximadamente), uma vez que para os ângulos de condução inferiores do referido ponto, f_z adquire valores negativos, o que implica que a força eletromagnética segure a gota na ponta do eletrodo; após tal ponto, f_z apresenta alterações no comportamento e atua no destacamento ou separação da gota do seu ponto de fixação.

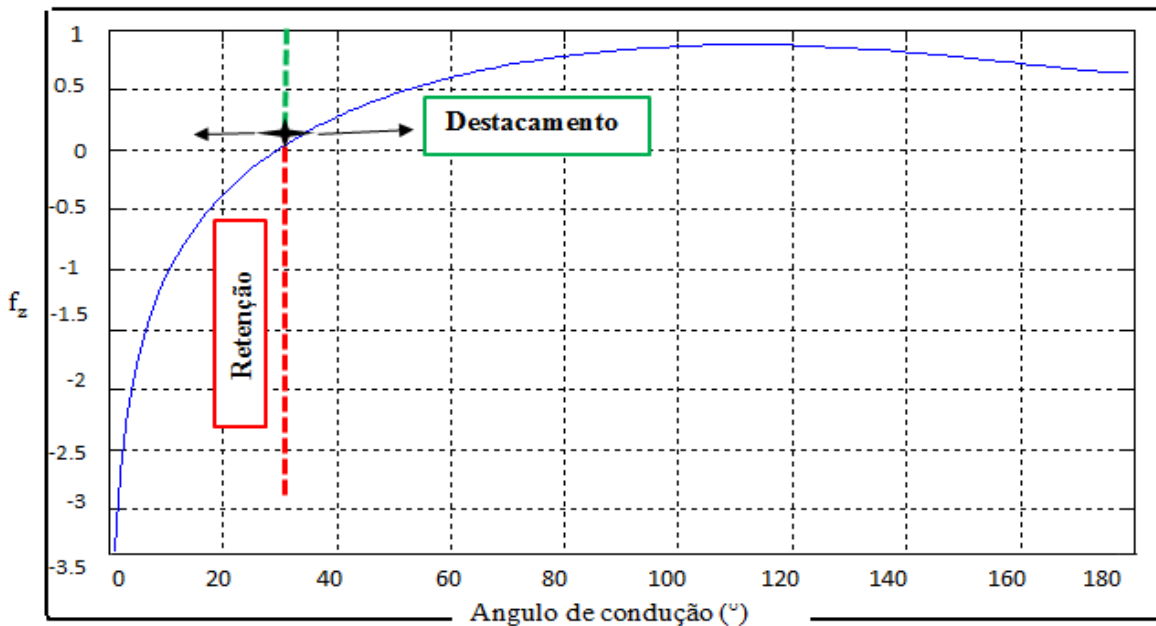


Figura 4.4: Comportamento de f_z em relação ao ângulo de condução (θ).

Conforme conteúdo disposto anteriormente levou-se em conta apenas as forças mais importantes para o desenvolvimento do modelo do processo GMAW-S. No entanto, é importante esclarecer que sua contribuição e seu comportamento são influenciados por fatores externos e internos que indicam se a gota se mantém unida ao eletrodo ou, ao contrário, tende a ser removida do mesmo. A direção do aporte da força eletromagnética depende 100% do ângulo de condução, gerado pelas linhas de corrente convergentes ou divergentes dentro da gota. Conforme a Figura 4.5, a seguir, tem-se o primeiro caso, onde as linhas de corrente convergem e a força eletromagnética ajuda a reter a gota, ao aliar-se à força de tensão superficial contra a direção da força da gravidade.

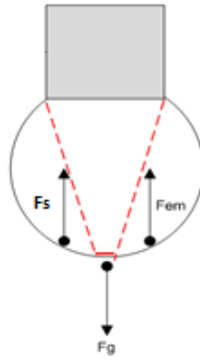


Figura 4.5: Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente convergentes

Na Figura 4.6, a seguir são apresentadas as forças agindo sobre gota, para linhas de corrente convergentes, na posição sobre cabeça.

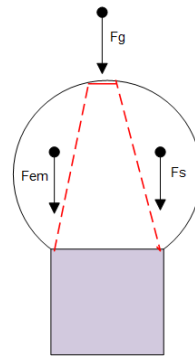


Figura 4.6: Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente convergentes na posição sobre cabeça.

O segundo caso é ilustrado na Figura 4.7 a seguir, onde as alterações de orientação da força eletromagnética promovem a separação da gota da ponta do eletrodo.

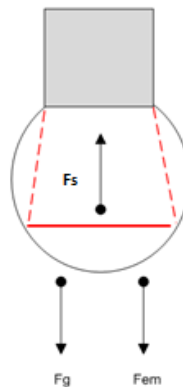


Figura 4.7: Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente divergentes.

Na posição sobre cabeça, a orientação das forças varia como é apresentado na figura 4.8, a seguir.

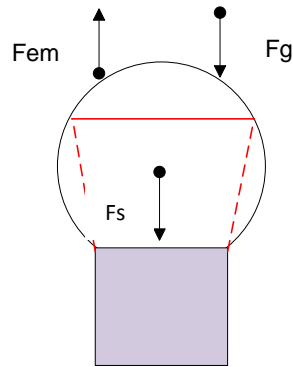


Figura 4.8: Orientação das forças que atuam sobre a gota em linhas de corrente divergentes na posição sobre cabeça.

4.2.2 Componentes do sistema GMAW-S no período de arco

O processo GMAW é composto de vários subsistemas. Suas características dependem da resposta dinâmica de cada um. A seguir, tem-se a relação entre os subsistemas e como estes interagem uns com os outros, em uma relação de influência e dependência mútua. Durante o processo de soldagem, um eletrodo de raio r_e é alimentado continuamente para a peça de trabalho a uma velocidade V_{ar} e fundido a uma taxa determinada por M_R (*Melting Rate*), causando a formação de uma gota metálica na ponta do eletrodo. Faz-se importante esclarecer que para fins da modelagem do sistema, a gota de metal fundido possui um formato esférico de massa m_d e raio r_d que aumentam ao longo do tempo (premissa válida só para o período do arco).

O comprimento do eletrodo em estado sólido (l_e) tem relação com a quantidade do arame que é alimentado e a porção do mesmo que é fundido; a partir de tal ponto para o centro da gota, tem-se uma distância de deslocamento da mesma (D_d), gerada pela ação das forças que ali atuam. O comprimento do arco (l_a) na fase de formação e crescimento da gota apresenta variação em relação à diferença entre a distância bico de contato peça (DBCP) e o comprimento efetivo (L_{ef}). Este último abrange o comprimento do eletrodo sólido, acoplado ao deslocamento da gota e a fração do raio da gota (r_d), que representa a distância do centro da mesma até a área de condução determinada pelo ângulo (θ) – informação condensada nas Equações 4.10 e 4.11, a seguir.

$$l_a = DBCP - L_{ef} \quad (4.10)$$

$$L_{ef} = l_e + D_d + r_d \cos(\theta) \quad (4.11)$$

Para melhor compreensão dos fenômenos mencionados anteriormente, apresenta-se, a seguir, a Figura 4.9, que mostra esquematicamente o eletrodo e a gota de metal fundido com os respectivos comprimentos gerados no processo durante o período de arco.

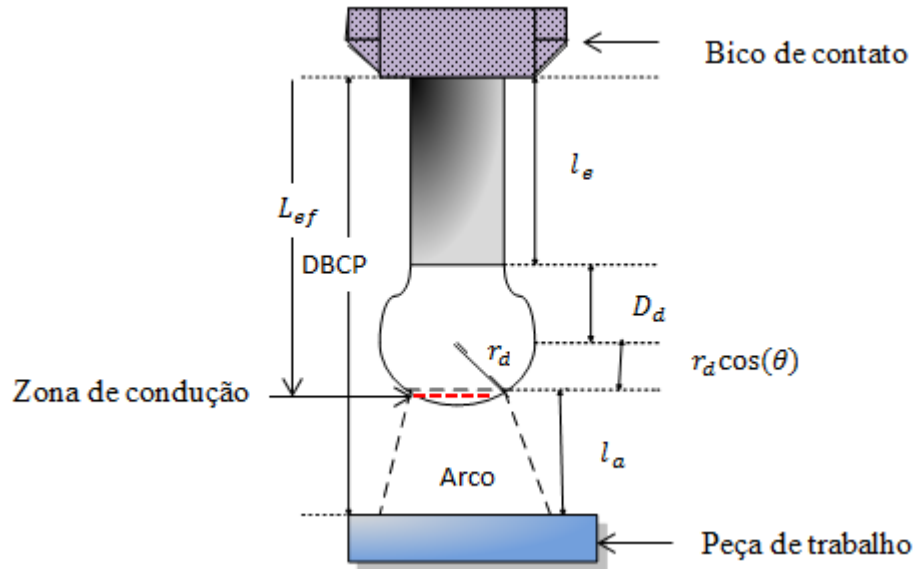


Figura 4.9: Localização dos comprimentos dos parâmetros no período de arco.

O comprimento do eletrodo no estado sólido apresenta variação dinâmica dependente da velocidade de alimentação do arame (V_{ar}), além da taxa à qual funde por unidade de área (M_R). Tal comportamento pode ser representado pela Equação 4.12, a seguir.

$$\frac{dl_e}{dt} = V_{ar} - \frac{M_R}{\pi r_e^2} \quad (4.12)$$

Durante o período do arco, o eletrodo é fundido, adicionando constantemente metal líquido à gota formada na ponta do eletrodo, o que implica na variação da massa da gota, que é diretamente influenciada pela taxa de fusão do eletrodo, conforme evidenciado na Equação 4.13, a seguir.

$$\frac{dm_d}{dt} = M_R \rho_e \quad (4.13)$$

Onde ρ_e é a densidade do eletrodo.

A fusão do eletrodo se dá devido à influência de dois fatores, a saber: aquecimento ôhmico e anódico; no primeiro caso, é devido ao aquecimento do eletrodo pela passagem de corrente através deste; o segundo caso é gerado pela configuração de polaridade para o processo de soldagem GMAW, onde o eletrodo é designado como o ânodo do sistema, o qual é bombardeado por uma grande quantidade de elétrons com elevada energia, que, quando absorvida pelo ânodo, produz a sua fusão. Contudo, é importante ressaltar que a taxa de fusão do eletrodo varia dependendo da intensidade da corrente que flui através do circuito, de acordo com a Equação 4.14, a seguir.

$$M_R = C_1 I + C_2 I^2 \rho l_e \quad (4.14)$$

Onde ρ corresponde à resistividade linear, e C_1 e C_2 são constantes que descrevem o aquecimento do eletrodo, como uma consequência do aquecimento do arco e efeito de Joule, respectivamente.

4.2.3 Sistema elétrico no período de arco

O processo GMAW pode ser considerado como um circuito elétrico constituído por vários subsistemas que podem ser modelados como tal. Ao aplicar a tensão no referido processo, é gerada uma corrente que flui através do circuito, o qual é constituído pela fonte de soldagem, que pode ser representada como um circuito equivalente RL. Faz-se importante destacar a contribuição da fonte de energia utilizada na soldagem, uma vez que influencia o comportamento do processo GMAW, sendo responsável pelo fornecimento constante de energia. O eletrodo metálico e a gota são condutores e, por conseguinte, exercem certa resistência ao fluxo da corrente e são modelados em conjunto como um subsistema de resistência R. Do mesmo modo, o arco elétrico apresenta alguma resistência R_a , que varia de acordo com o seu comprimento. A Figura 4.10, a seguir, evidencia os componentes utilizados na soldagem GMAW, modeladas como um circuito elétrico.

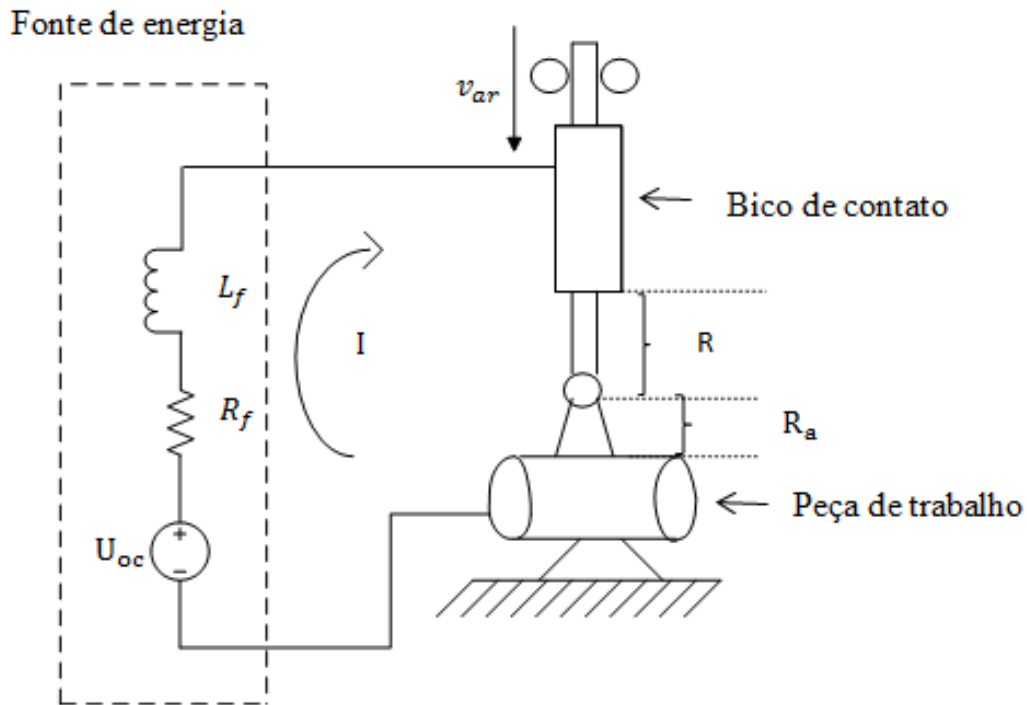


Figura 4.10: Equivalente do circuito elétrico do sistema na fase de arco.

Na aplicação da lei de Kirchoff para o sistema de soldagem apresentado na figura anterior, descobriu-se que a tensão equivalente circuito aberto é representado pela equação 4.15, a seguir, onde U_{oc} representa a tensão de soldagem no circuito aberto, L_f e R_f correspondem à indutância e resistência da fonte respectivamente, R é a resistência dos condutores elétricos, U_a representa a tensão do arco, e I é a corrente que flui através do circuito.

$$L_f \frac{dI}{dt} + (R_f + R)I + U_a = U_{oc} \quad (4.15)$$

O arco é o principal componente da existência de tal período. Neste sentido, faz-se importante considerar as contribuições para o sistema, gerado pela tensão do arco e a resistência em que este incorre. Tem-se inúmeros modelos desenvolvidos para a tensão do arco na soldagem GMAW, que apresentam uma forte relação funcional entre a tensão do arco, o comprimento de arco e a corrente de arco (Zafer Bingul & Cook, 2006). Utilizando-se a Equação 4.16, a seguir, é possível observar as informações então apresentadas.

$$U_a = U_o + R_a I + E_a (DBCP - L_{ef}) \quad (4.16)$$

Onde U_o simboliza constante a tensão do arco, R_a a resistência de arco, E_a é o fator de comprimento de arco, DBCP é a distância existente entre o bico de contato e a peça de

trabalho, e L_{ef} é o comprimento do eletrodo juntamente com comprimento da gota, que vai até aos limites da zona de condução.

4.2.4 Equações do modelo GMAW-S para o período de arco

Na seção anterior, tais subsistemas foram abordados separadamente de acordo com a sua classificação; a união destes representa a dinâmica do processo, descrita com base na utilização das referidas equações, gerando o modelo do processo total.

Para a representação do sistema em espaço de estados, é importante definir as entradas do sistema, que correspondem aos parâmetros utilizados em condições reais de soldagem. Neste sentido, tem-se:

- Velocidade de soldagem (v_{sold});
- Velocidade de alimentação do arame (v_{ar});
- Tensão de soldagem (V).

As equações mencionadas até aqui são utilizadas para construir o modelo do processo GMAW-S durante o período de arco, utilizando as seguintes variáveis de estado, conforme se segue:

- X_1 : Deslocamento da gota na ponta do eletrodo.
- X_2 : Velocidade de deslocamento da gota.
- X_3 : Corrente de soldagem.
- X_4 : Comprimento do eletrodo no estado sólido.
- X_5 : Massa da gota.

A partir das referidas variáveis de estado, tem-se o modelo que descreve o comportamento do processo de soldadura GMAW-S na fase de arco, por meio das Equações 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21, conforme se segue:

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (4.17)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{X_5} (F_g + F_{em} - F_\gamma) \quad (4.18)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{L} [U_{oc} - E_a(DBCP - X_4) - \rho X_3(L_{ef}) - U_o - X_3(R_s + R_a)] \quad (4.19)$$

$$\dot{X}_4 = V_{ar} - \dot{h} \quad (4.20)$$

$$\dot{X}_5 = (C_1 X_3 + C_2 X_3^2 \rho X_4) \rho_e \quad (4.21)$$

Nas equações descritas anteriormente, para representar o comprimento do eletrodo sólido (X_4), utilizou-se a expressão h , que representa a fração do eletrodo fundido por unidade de área. Portanto, o comprimento do eletrodo depende da diferença entre a velocidade de alimentação de arame e a porção derretida do mesmo, o qual é representado pela Equação 4.22, a seguir.

$$h = \frac{M_R}{A} \quad (4.22)$$

Onde M_R é a taxa de fusão do eletrodo e A constitui a sua área derretida, assumido um formato geométrico circular. Para melhor compreensão, tem-se a Figura 4.11, a seguir, com sua informação condensada nas Equações 4.23, 4.24, apresentadas posteriormente.

$$M_R = C_1 X_3 + C_2 X_3^2 \rho X_4 \quad (4.23)$$

$$A = \pi r_e^2 \quad (4.24)$$

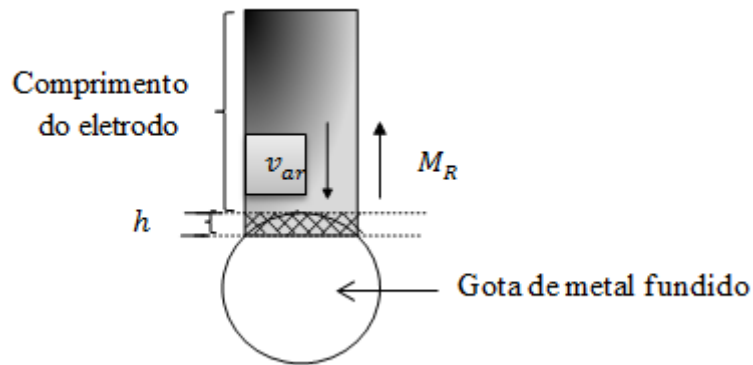


Figura 4.11: Representação da fracção do eletrodo fundido pela relação entre M_R e v_{ar} .

Na figura 4.11, apresentada anteriormente, o eletrodo é alimentado continuamente a uma velocidade V_{ar} , mas também parte do mesmo é fundida com uma taxa M_R ; h representa a fração do eletrodo sólido que é fundido e, subsequentemente, aumenta a quantidade de material que forma o volume da gota, cujo fenômeno é comandado pela diferença dos dois fatores mencionados anteriormente.

O comprimento do eletrodo sólido (L_{ef}) utilizado para descrever o sistema é expresso como uma função de estado, de acordo com a Equação 4.25, a seguir.

$$L_{ef} = X_1 + X_4 + \left(\frac{3X_5}{4\pi\rho_e}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.25)$$

Onde o terceiro termo representa o raio da gota.

Devido às premissas com fins de modelagem do processo, a gotícula do metal fundido adquire um volume esférico, em que o raio da gota (vide Equações 4.26, 4.27) é determinado, conforme se segue:

$$V_d = \frac{m_d}{\rho_e} \quad (4.26)$$

$$\frac{4\pi r^3}{3} = \frac{m_d}{\rho_e}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \left(\frac{m_d}{\rho_e}\right)} \quad (4.27)$$

4.3 MODELAGEM PARA O PERÍODO DE CURTO – CIRCUITO

O período de curto-circuito tem início no fim do período de arco, apenas no momento em que o comprimento efetivo (L_{ef}) atinge a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP). A partir daí, a gota de metal fundido toca a poça de fusão e forma uma ponte metálica, dando início ao processo de transferência de metal para a poça.

Tal período apresenta considerável diferença em relação ao período do arco, uma vez que os fenômenos envolvidos na transferência de metal devem ser abordados a partir de uma perspectiva diferente, para descrever o comportamento do processo. E ainda, somente nesta fase se produz a transferência de massa, onde a gota já atingiu o seu tamanho máximo (na

fase anterior), e começa a diminuir pela ação das forças que sugam o material líquido para dentro da poça.

A complexidade dos fenômenos físicos envolvidos no período de curto-circuito requer um estudo rigoroso de alta complexidade, pouco abordado na literatura pela dificuldade que tal fato representa – razão pela qual no desenvolvimento do modelo deste período, fez-se necessário assumir certas hipóteses a fim de se aproximar ao comportamento real, que, por sua vez, permitisse a representação física e matemática do processo na referida fase.

Neste sentido, foram considerados os seguintes aspectos:

- A gota de metal fundido tem forma esférica, até o contato com a poça de fusão;
- A zona de contato entre a gota e a poça de fusão é igual à área do eletrodo;
- A superfície da poça permanece plana;
- A transferência de metal é estável.
- O comportamento da ponte metálica está ligado à evolução de dois raios principais;
e
- O volume de líquido na ponte é determinado pelas contribuições do efeito *Pinch* e a lei de Laplace.

4.3.1 Forças agindo sobre a gota no período de curto-circuito

Exceto pela força de gravidade (F_g), cuja natureza e contribuição permanecem constantes, as forças envolvidas no período de curto-circuito exibem uma mudança no comportamento em relação àquele apresentado na fase de arco. No contato da gota com a poça de fusão, a tensão superficial favorece sua transferência. A menor energia superficial da gota em relação à poça de fusão, ou seja, a menor área de superfície livre por volume, com o contato da gota com a poça, faz com que a força da tensão superficial puxe-a para dentro da poça, segundo os estudos realizados por Lancaster. Tal conceito é suportado por vários autores (Silva, 2005), (Planckaert et al., 2010a), porém, um relatório pormenorizado sobre o comportamento da gota no processo de transferência por curto-circuito é apresentado por (Bless, 1974).

A força eletromagnética calculada a partir da lei de Lorentz, de acordo com a Equação 4.28, a seguir, relaciona o campo magnético produzido pela ação da corrente e a densidade

da corrente (vide Equação 4.29, a seguir), que é resultante das contribuições geradas pela condutividade do eletrodo (σ) e o campo elétrico, originado pela diferença de potencial entre as partículas vizinhas dentro do condutor, atravessado pela corrente de soldagem. Portanto, a força eletromagnética pode ser representada pela Equação 4.30, a seguir.

$$\vec{F}_{em} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (4.28)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.29)$$

$$\vec{F}_{em} = \sigma \vec{E} \times \vec{B} \quad (4.30)$$

No momento do curto-circuito, a gota de metal fundido e a poça de fusão formam um único corpo através da formação da ponte metálica, onde a diferença de potencial entre as suas partículas (P_a e P_b) é mínima, gerando um campo elétrico extremamente pequeno, de modo que a contribuição da força eletromagnética axial pode ser negligenciada. No entanto, o aumento da corrente gerada durante tal período potencializa a contribuição da componente radial da força de Lorentz, que refreia a ponte metálica, gerando o efeito *Pinch* (J.-P. Planckaert et al., 2010b).

O comportamento das forças que agem sobre a gotícula é apresentado na Figura 4.12, a seguir, onde se mostra evidente que durante tal período, todas as forças contribuem para a transferência de massa. Assim, tem-se que a contribuição da força de gravidade (F_g) é a mesma durante o período de arco, enquanto que a contribuição da força de tensão superficial (F_s) e eletromagnética (F_{em}) foi alterada pelos fenômenos físicos característicos daquele período.

Em resumo, a força de tensão superficial a partir do momento do contato deixa de manter a forma esférica da gota, sugando o metal líquido para dentro da poça, pelo efeito da lei de Laplace (vide Equação 4.37). E ainda, a contribuição da força eletromagnética neste período pode ser considerada nula, uma vez que a ponte metálica não tem diferença de potencial. Por conseguinte, o campo elétrico é muito pequeno; com o aumento da corrente durante o curto-circuito, o efeito do empescoçamento, conhecido como efeito *Pinch* (vide Equação 4.34), aumenta consideravelmente a pressão exercida sobre a ponte de metal, causando seu estrangulamento progressivo até gerar a ruptura da ponte e começar um novo ciclo de formação da gota.

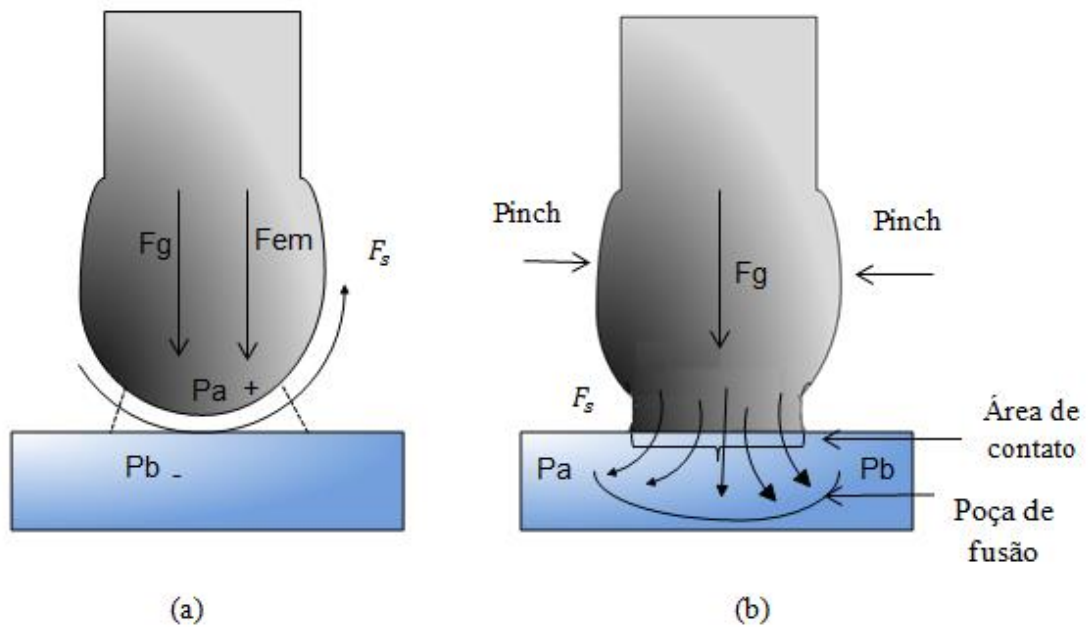


Figura 4.12: Comportamento das forças (a) no período de arco, (b) no período de curto-circuito.

4.3.2 Comportamento do sistema GMAW-S no período de curto-circuito

No momento de contato entre a gotícula metal fundido ainda ligado à extremidade do eletrodo e a poça de fusão, forma-se uma ponte metálica inicialmente esférica, a qual é descrita por dois raios principais (R_1 e R_2), conforme indicado na Figura 4.13, a seguir. Quando do estabelecimento da ponte, o metal líquido começa a fluir para a poça de fusão pela ação das forças gravitacional, eletromagnética e de tensão superficial (Choi et al., 2001).

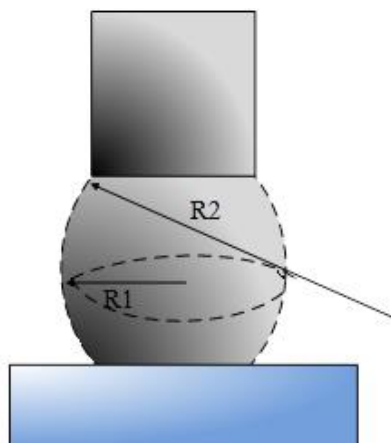


Figura 4.13: Raios principais da ponte metálica.

Os raios principais R_1 e R_2 , apresentados na figura 4.13, descrevem a geometria da ponte, e relacionam-se entre si. O raio R_2 comanda o comportamento de variação do raio R_1 , onde R_2 é inicialmente determinada pelo volume máximo atingido pela gota na fase crescimento, tornando-se dependente da massa final da gotícula obtida antes do contato com a poça, conforme a relação apresentada anteriormente na Equação 4.27. Do seu ponto máximo, R_2 aumenta progressivamente pela ação de forças que comprimem a ponte metálica até ao momento em que a curvatura é paralela ao eléctrodo, onde o raio R_2 tende para infinito, após disso, o raio diminui ao adquirir uma forma côncava na direção do centro da ponte metálica, onde atinge valores negativos; ao mesmo tempo, R_1 é calculado a cada momento, com base em três pontos marcados na curva de acordo à evolução do R_2 , conforme indicado na Figura 4.14, a seguir. Portanto, R_1 diminui progressivamente, atingindo valores próximos de zero, cujo valor foi fixado em 35×10^{-6} m (determinado experimentalmente) para evitar singularidades na simulação e reduzir o esforço computacional.

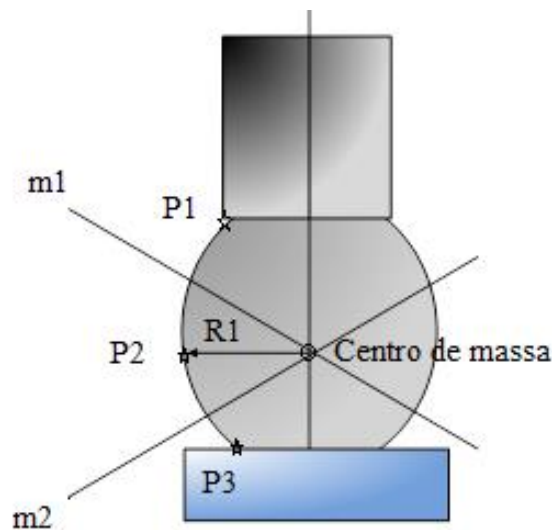


Figura 4.14: Cálculo do raio R_1 a partir de três pontos na curva de raio R_2 .

Na figura anterior, m_1 e m_2 correspondem às mediatrizes obtidas a partir dos pontos (P_1 , P_2) e (P_2 , P_3) respectivamente, as quais foram utilizadas para calcular o centro de massa em cada momento. A figura 4.15, a seguir, apresenta a evolução da ponte metálica a partir do momento em que a gota de metal atinge a distância entre o bico de contato- peça (DBCP) e toca poça de fusão, até a ruptura da ponte metálica que marca o início de um novo período.

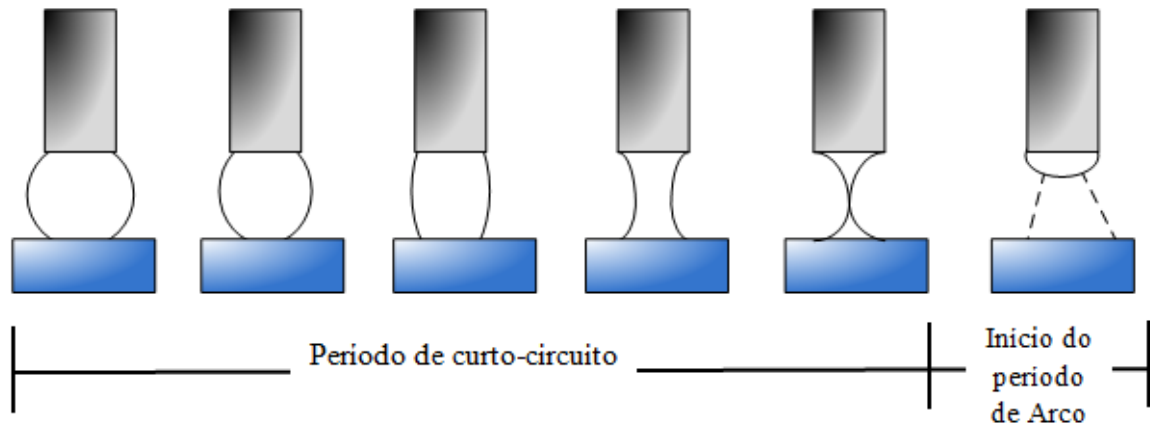


Figura 4.15: Evolução da ponte metálica

Após o estabelecimento da ponte metálica, tem-se uma pressão sobre a secção transversal da ponte, no centro do mesmo, pela ação do efeito *Pinch* e a tensão superficial, que atuam em função dos raios principais da gota, conforme evidenciado na Equação 4.31, a seguir.

$$P_{avg} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_1^2} + \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.31)$$

O primeiro termo corresponde à pressão exercida pelo efeito *Pinch*, que é produzido pela força de Lorentz – ao ser exercido sobre um condutor submetido a um campo magnético, esta é sempre orientada para dentro. De fato, em um material sólido ou líquido não pode ocorrer separação de cargas; assim, a força de Lorentz é expressa como uma “pressão magnética” que tende a apertar o condutor. Acredita-se que a variação espacial da pressão de Lorentz cria um forte fluxo na coluna arco e na poça (Bless, 1974). A magnitude da pressão de Lorentz é da mesma ordem de densidade de energia magnética, conforme evidenciado na Equação 4.32, a seguir.

$$U_M = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (4.32)$$

O campo magnético gerado ao aplicar a lei de Ampere ao condutor de simetria axial é dado pela Equação 4.33 a seguir.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_e} \quad (4.33)$$

De acordo com as equações apresentadas anteriormente, a pressão exercida sobre o condutor por efeitos da força de Lorentz é dada pela Equação 4.34, a seguir.

$$U_M = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_1^2} \quad (4.34)$$

O segundo termo da Equação 4.31, apresentada anteriormente, é gerado pela equação de Young-Laplace (vide Equações 4.35 a 4.37), que descreve a diferença de pressão através da interface entre dois fluidos estáticos, como, por exemplo, o ar e o metal fundido.

$$\Delta P = -\gamma \nabla \cdot \hat{n} \quad (4.35)$$

$$\Delta P = 2\gamma H_m \quad (4.36)$$

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.37)$$

Onde:

ΔP : é a diferença de pressão através da interface do fluido;

γ : é o módulo de tensão superficial;

\hat{n} : é a unidade normal que aponta para fora da superfície; e

H_m : é a curvatura média.

A velocidade do fluxo na parte central, no interior da ponte é calculada a partir da equação de Bernoulli, o que relaciona a pressão média exercida dentro da ponte (P_{avg}) e a altura do mesmo (H_d), de acordo com a Equação 4.38, a seguir. Devido à gravidade, tem-se a mudança de ângulo de soldagem; este termo é incluído na referida equação.

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_e} (P_{avg} + \rho_e g H_d \cos(\varphi))} \quad (4.38)$$

Na base da ponte metálica, isto é, a área de contato entre a gota e a poça de fusão, a transferência de massa dá lugar a uma velocidade v_{zc} , determinada pela lei de continuidade de fluidos (vide Equação 4.39), conforme indicado nas equações que se seguem.

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (4.39)$$

$$v(\pi R_1^2) = v_{zc}(\pi r_e^2) \quad (4.40)$$

$$v_{zc} = \frac{v R_1^2}{r_e^2} \quad (4.41)$$

Onde v_1 e A_1 representam a velocidade do fluxo e a área no centro da ponte; v_2 e A_2 correspondem à velocidade do fluxo e a área da zona de contato, conforme ilustrado na Figura 4.16, a seguir.

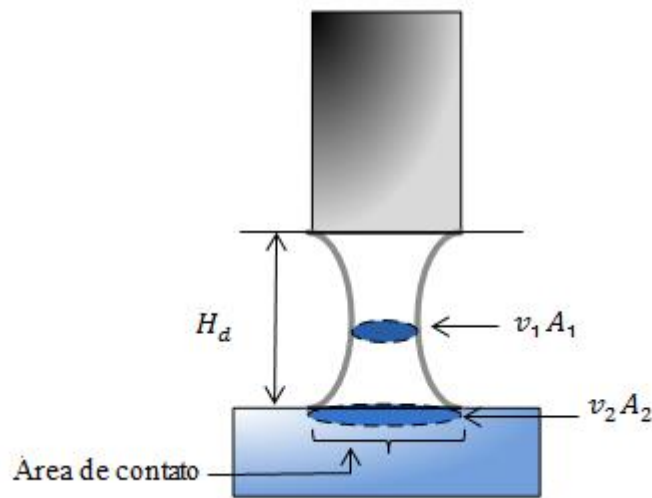


Figura 4.16: Esquema da lei de continuidade de fluidos na ponte metálica.

No modelo anteriormente proposto, o comportamento e a evolução do ângulo de condução (θ) é comandado pelo comprimento efetivo (L_{ef}), de acordo com a relação representada a seguir, onde se assume que o ângulo de condução é zero quando (L_{ef}) está na sua fase inicial, isto é, antes de iniciar o processo de formação de gota (9 mm aprx); quando o comprimento efetivo atinge a DBCP, o sistema entra na fase de curto-circuito e o ângulo de condução é 60, uma vez que a sua função será a de auxiliar a transferência do metal para a poça, de acordo com a Figura 4.4 apresentada em seções anteriores.

$$9 \times 10^{-3} \rightarrow 0^\circ$$

$$L_{ef} \quad \theta_t$$

$$12 \times 10^{-3} \rightarrow 60^\circ$$

A partir da relação apresentada anteriormente, tem-se a equação da evolução do ângulo de condução (θ), conforme evidenciado na Equação 4.42, a seguir.

$$19.91 \times 10^3 (L_{eft}) + 0.25 = \theta_t \quad (4.42)$$

Onde L_{eft} representa o comprimento efetivo instantâneo, e θ_t o ângulo de condução efetivo instantâneo durante a evolução do processo da soldagem.

4.3.3 Sistema elétrico no período de curto-circuito

O tratamento do sistema elétrico no período de curto-circuito é semelhante ao apresentado no período do arco, mas inclui algumas variações conforme a extinção do arco elétrico durante a transferência de massa. Uma vez que o referido arco não tem lugar nesta fase, todas as contribuições geradas por ele são canceladas, tais como: o comprimento de arco (l_a), a resistência do comprimento de arco (R_a), a constante de tensão de arco (U_o), e o fator de comprimento de arco (E_a).

Ao aplicar a lei de Kirchoff para o sistema de soldagem em curto-circuito, a tensão de soldadura é representada pela equação 4.43, a seguir.

$$L \frac{dI}{dt} + (R_f + R)I = U_{oc} \quad (4.43)$$

Onde U_{oc} representa a tensão de soldagem no circuito fechado, L_f e R_f correspondem à indutância e resistência da fonte respectivamente, R é a resistência dos condutores elétricos, e I é a corrente que flui através do circuito.

4.3.4 Equações do modelo GMAW-S para o período de curto-circuito

Com base no comportamento do sistema na fase de curto-circuito é criado um conjunto de equações de estado que descreve tal processo. Faz-se importante notar que foram utilizadas as mesmas variáveis de estado do período de arco, mas são completamente modificadas e adaptadas exclusivamente para representar os fenômenos deste período (vide Equações 4.44 a 4.49, a seguir).

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (4.44)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{X_5} (F_g - F_\gamma) \quad (4.45)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{L} [U_{oc} - \rho X_3 L_{ef} - X_3 R_s] \quad (4.46)$$

$$\dot{X}_4 = V_{al} - \frac{C_2 X_3^2 \rho X_4}{\pi r_e^2} \quad (4.47)$$

$$\dot{X}_5 = (C_2 X_3^2 \rho X_4 - \pi R_1^2 v_{zc}) \rho_e \quad (4.48)$$

$$\dot{X}_5 = \left(C_2 X_3^2 \rho X_4 - \left(\sqrt{\frac{2}{\rho_e} (P_{avg} + \rho_e g H \cos(\varphi))} \frac{R_1^2}{r_e^2} \right) \pi R_1^2 \right) \rho_e \quad (4.49)$$

O modelo apresentado anteriormente foi proposto para o processo de soldagem GMAW-S, de modo que a variação do ângulo de soldadura (φ) depende da velocidade de soldadura (v_{sold}) e o raio do tubo (r_{tb}), conforme a Equação 4.50, a seguir.

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{v_{sold}}{r_{tb}} \quad (4.50)$$

4.4 DESEMPENHO DO MODELO HÍBRIDO

No presente estudo, o processo de soldagem GMAW no modo de transferência por curto-circuito, foi abordado como um sistema híbrido, isto é, o processo foi dividido em duas fases, a saber: período de arco e período de curto-circuito, que se distinguem pelos fenômenos físicos envolvidos em cada uma delas.

O modelo é capaz de trocar consecutivamente o período de arco e o período de curto-circuito, com base nas condições de mudança que indicam o fim de um período e o começo de outro; de forma semelhante, seleciona o conjunto de equações para serem aplicados a cada caso, uma vez que o tratamento de cada período deve ser específico. É importante notar que o modelo foi implementado no *Simulink*, onde se fez a instalação de *tool box* especializados que respondessem às necessidades do mesmo.

O protótipo do modelo proposto apresenta um comportamento autônomo capaz de inferir a conduta de cada uma das variáveis de estado, a partir de um conjunto de parâmetros

iniciais que correspondem aos parâmetros utilizados no processo de soldagem experimental, para originar uma linha de base e compreender as dinâmicas envolvidas no processo, uma vez que as variáveis estudadas no modelo não se encontram diretamente acessíveis.

Para abranger o funcionamento do modelo proposto, a seguir, tem-se o seguinte esquema (vide Figura 4.17) do modelo GMAW híbrido. Dinâmica

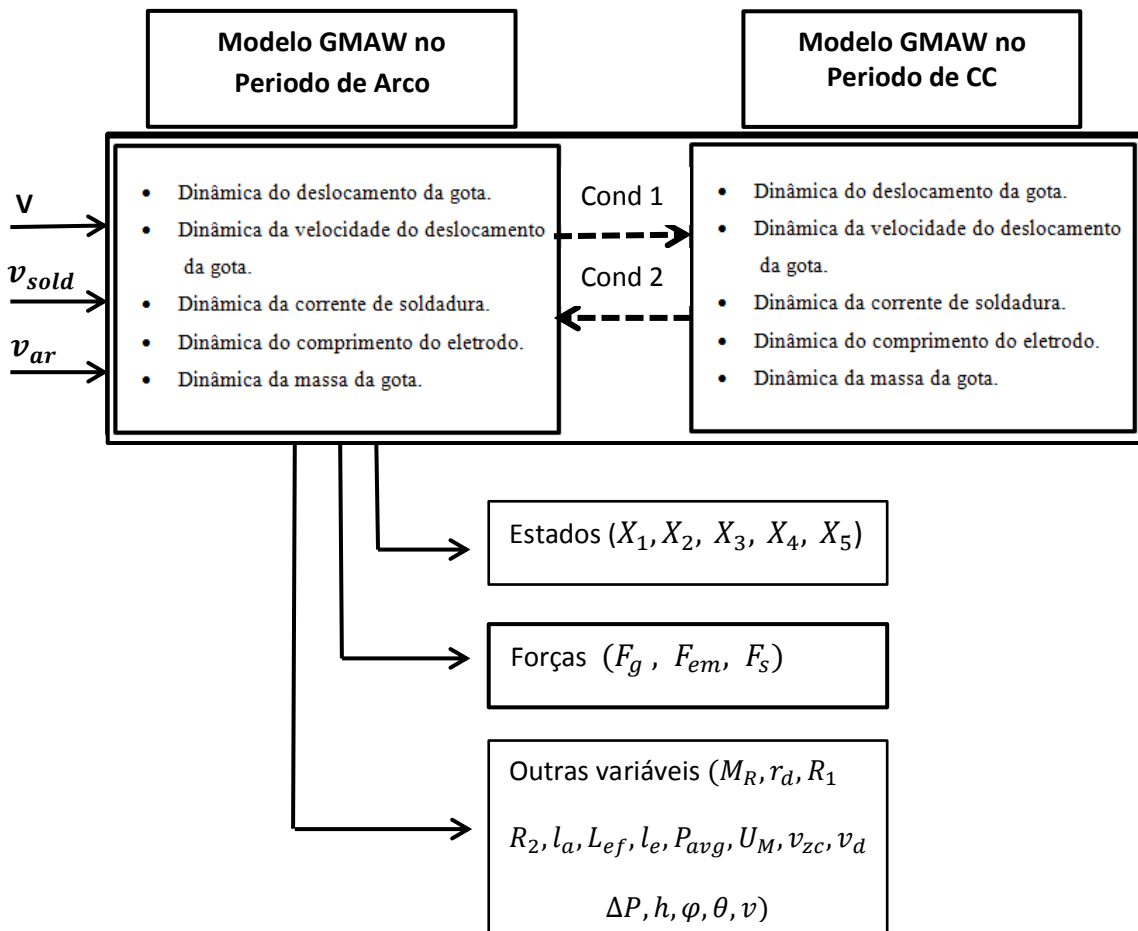


Figura 4.17: Esquema do modelo GMAW híbrido.

4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A bancada experimental foi composta por duas fases, a fim de avaliar a alteração no comportamento dinâmico do processo GMAW no modo de transferência por curto-circuito. O procedimento incluiu a realização de experimentos em soldagem orbital sem

regulação de parâmetros e experimentos com regulação de parâmetros, cujas informações são ampliadas e detalhadas nas seções subsequentes.

4.5.1 Experimentos sem regulação de parâmetros

Os experimentos nesta fase foram levantados a fim de validar o modelo proposto na etapa anterior e analisar o comportamento da transferência de massa ao longo do cordão de solda. Esta etapa visa a avaliar as alterações produzidas no processo pela variação do ângulo de soldagem (φ), ao associar o seu comportamento com as respostas dinâmicas do modelo diante variações nos parâmetros iniciais.

As provas foram realizadas em sentido horário na posição vertical descendente, em um percorrido de passe contínuo de φ : 0° - 180° , conforme evidenciado na Figura 2.12, indicada em capítulo anterior. Inicialmente, os parâmetros utilizados para o desenvolvimento dos testes foram tomados a partir da base de dados existente no laboratório de soldagem, para provas efetuadas na posição plana com placas semelhantes à espessura do tubo, conforme apresentado na Tabela 4.1, a seguir, onde se tem os parâmetros que geram ótimas características geométricas na solda para a soldagem na posição plana.

Tabela 4.1: Parâmetros ótimos de soldagem na posição plana.

Tensão de Soldagem (V)	Velocidade de Soldagem (v_{sold})	Velocidade de alimentação do arame (v_{ar})	DBCP
18 V	14 mm/s	6 m/min	12 mm

A partir dos resultados obtidos pela utilização dos parâmetros ideais para a soldagem na posição plana nos testes para a soldagem orbital, estabeleceu-se uma faixa de trabalho para localizar os parâmetros de soldagem que forneçam as melhores condições de regularidade na transferência de massa, além das decorrências visuais para o bom acabamento geométrico do cordão de solda, sem escoamento da poça.

Segundo Cayo (2013), o intervalo de variação dos parâmetros de corrente e tensão que permitem a transferência de massa por curto-circuito, varia aproximadamente desde 80 A até 200 A, no caso da corrente, e de 18 V até 22 V para a tensão. A partir do conhecimento

de intervalos máximos e mínimos que asseguram o modo de transferência por curto-circuito, foi planejado um conjunto de experimentos, que consistiu em vinte e quatro provas (com três repetições cada), onde foram feitas variações na tensão (V), na velocidade de alimentação do arame (v_{ar}) e na velocidade de soldagem (v_{sold}), conforme evidenciado na Tabela 4.2, a seguir.

Tabela 4.2: Planejamento experimental, sem regulamentação de parâmetros

Velocidade de alimentação de arame [m/min]	Velocidade de alimentação de arame [m/min]	Tensão de soldagem [V]	Velocidade de soldagem [mm/s]
5,5	6,0	18	14
			13
			12
5,5	6,0	18,5	14
			13
			12
5,5	6,0	19	14
			13
			12
5,5	6,0	20	14
			13
			12

Em cada experimento foram adquiridos sinais de corrente e tensão, que foram analisadas por um *software* criado em ambiente computacional “*Matlab*”, desenvolvido especificamente para avaliar a estabilidade da transferência de massa ao longo do cordão de solda. Neste sentido, faz-se importante destacar que as diretrizes tomadas em conta pelo programa para gerar os índices de estabilidade serão aprofundados na próxima seção.

Procedimento subsequente:

A partir dos resultados obtidos pelo planejamento experimental prévio, foram escolhidos os parâmetros que geraram os melhores resultados, visando simular o modelo híbrido proposto para, então, avaliar o desempenho dinâmico do processo por meio do estudo do

comportamento das variáveis de estado, pois, caso contrário, tal informação não é diretamente acessível (experimentalmente, através da aquisição de sinais).

Diante do exposto, pretende-se estabelecer a relação entre a dinâmica da gota nas fases de arco e curto-circuito, e a dinâmica de transferência de metal, a fim de gerar, no futuro, sistemas de controle aplicados à melhoria da estabilidade na transferência de metal, com base no controle dos fenômenos físicos que influenciam o processo de crescimento e transferência da gota, para obtenção de soldas de melhor qualidade na soldagem orbital.

4.5.2 Experimentos com a regra de regulação de parâmetros

A partir dos resultados dos experimentos sem a regulação de parâmetros, foram selecionados os parâmetros que produziram as melhores condições de estabilidade ao longo da solda, aos quais se aplicou a regra de ajuste em duas fases.

Na primeira fase, foram realizados experimentos exploratórios com diferentes fatores de regulação, para determinar o intervalo onde as soldas escolhidas apresentaram melhor desempenho na regularidade da transferência de metal. Após a realização da análise dos sinais obtidos na fase anterior, por meio do programa desenvolvido para a determinação de regularidade na transferência, foi escolhido um intervalo menor em relação ao fator de regulação associada com os melhores resultados, uma vez que apresentaram menor desvio padrão nos índices que determinam regularidade na transferência de massa. Neste sentido, faz-se importante esclarecer que a informação relativa à regra de regulação aplicada em tal etapa encontra-se melhor delineada nas seções a seguir.

Depois de conhecer os resultados da análise de estabilidade do conjunto de sinais da etapa anterior, procedeu-se o estabelecimento da nova gama de regulação, aplicada exclusivamente para cada solda, conforme o comportamento observado para cada fator regulação exploratório. As razões que levaram àquele tipo de determinação são apresentadas, em detalhes, em capítulo posterior.

Os parâmetros que foram selecionados para a fase de regulação são apresentados na Tabela 4.3, a seguir, onde se tem a indicação do fator de regulação (f) exploratório com os quais foram feitos.

Tabela 4.3: Parâmetros aplicados na fase exploratória de regulação

Solda	Velocidade de alimentação de arame [m/min]	Velocidade de soldagem [mm/s]	Tensão de soldagem [V]	Fator de regulação exploratório (f)
B14	5,5	13	18,5	15
				20
				25
				30

Depois de conhecer os resultados da análise de estabilidade do conjunto de sinais da etapa anterior, procedeu-se o estabelecimento da nova gama de regulação, aplicada exclusivamente para cada solda, conforme o comportamento observado para cada fator regulação exploratório. As razões que levaram àquele tipo de determinação são apresentadas, em detalhes, em capítulo posterior.

4.6 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

4.6.1 Bancada experimental

Os testes experimentais foram realizados utilizando o banco orbital de ensaios do laboratório de Soldagem do Grupo de Automatização e Controle (GRACO) da Universidade de Brasília (UnB), conforme ilustrado na Figura 4.18, a seguir.

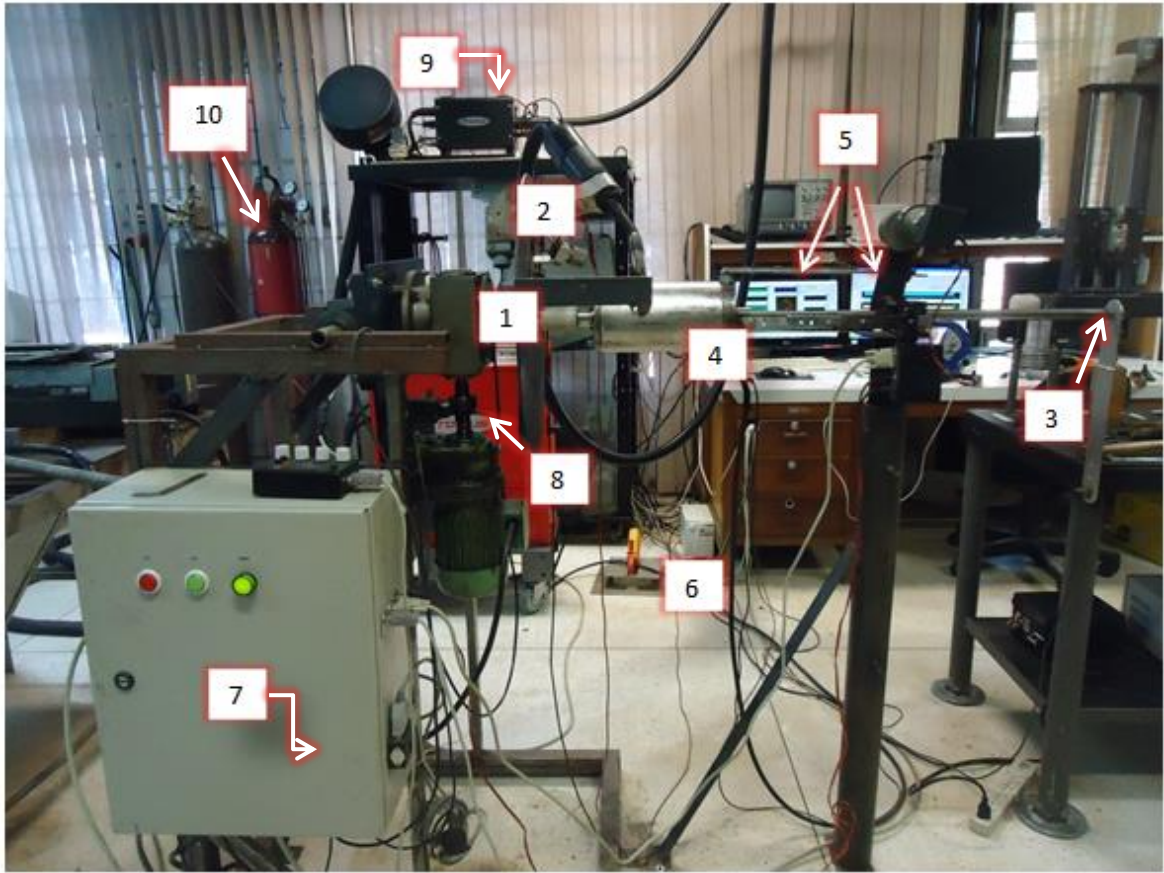


Figura 4.18: Montagem experimental para a realização dos testes.

Na figura acima, cada número corresponde a um determinado equipamento utilizado para a realização dos experimentos, cuja descrição é listada a seguir:

1. Equipamento para soldagem orbital.
2. Tocha.
3. Potenciômetro.
4. Corpo de prova
5. Sistema de aquisição de dados.
6. Sensor de efeito *Hall*.
7. Rob 5000.
8. Fonte de soldagem.
9. Alimentador de arame.
10. Cilindro de gás de proteção.

4.6.2 Equipamentos

Em seguida, são explicados resumidamente os dispositivos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento experimental das provas do processo de soldagem GMAW, no modo de transferência por curto-circuito.

4.6.2.1 Equipamento para soldagem orbital

O equipamento utilizado para soldagem orbital é ilustrado na figura 4.19, a seguir. Seu princípio de funcionamento tem por base o deslocamento da tocha sobre o corpo prova que permanece fixado no sistema de suporte.

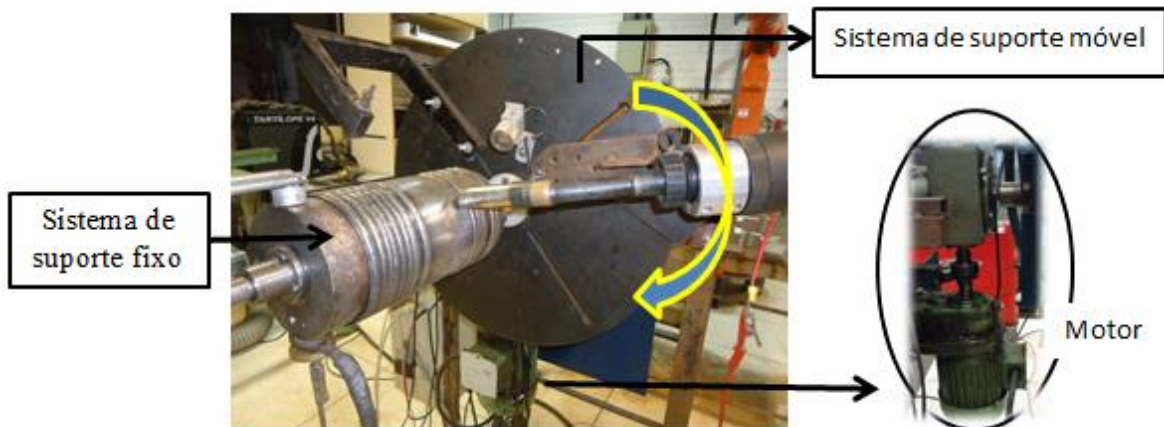


Figura 4.19: Planta experimental de soldagem orbital

Conforme ilustrado na figura anterior, a tocha está sujeita a um sistema de suporte móvel, cujo movimento de rotação é dirigido por um motor trifásico; portanto, a velocidade do motor é a velocidade de soldagem.

4.6.2.2 Fonte de soldagem e alimentador de arame

Foi utilizada uma fonte eletrônica da marca Fronius TransPuls Synergic 5000, em conjunto com o alimentador de arame do mesmo fabricante, evidenciados na Figura 4.20, a seguir. A unidade central de controle e de regulação da fonte é acoplada a um processador de sinal digital para controlar todo o processo de soldadura. No entanto, a fonte conta com uma

interface de acesso remoto (ROB 5000), que permite configurar o modo de operação direcionado para regular os parâmetros da fonte de energia (velocidade de alimentação de arame, tensão e indutância) através de *software*.

Todas as peças do alimentador de arame foram escolhidas especificamente para suportar o diâmetro do fio usado (1 mm), segundo as especificações do fabricante (Fronius, 2006).

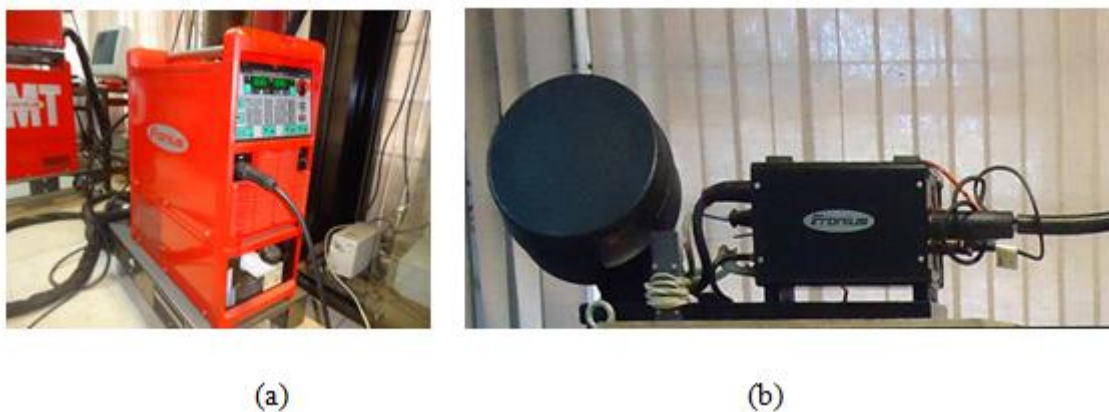


Figura 4.20: Equipamentos Fronius (a) Fonte de soldagem, (b) Alimentador de arame.

4.6.2.3 Rob 5000

É uma interface do robô projetada para soldagens automáticos (Fronius, 2008); tem entradas e saídas analógicas e digitais. A conexão com a fonte de energia se dá por meio de uma *interface* padrão LocalNet. Nas saídas analógicas, tem-se os valores médios da corrente de soldagem, tensão de soldagem, velocidade alimentação de arame, corrente do motor do alimentador de arame, e comprimento de arco.

4.6.2.4 Potenciômetro

Este sensor foi utilizado para medir o ângulo de soldadura (φ), uma vez que o seu eixo de rotação é comandado pelo deslocamento do suporte móvel da tocha. Portanto, indica a posição da tocha ao redor do tubo. Para garantir a precisão das leituras, o potenciômetro é inicialmente calibrado, considerando a posição zero do suporte móvel do equipamento de soldagem orbital.

4.6.2.5 *Sensor de efeito Hall*

Para a medição da corrente durante o processo da soldagem, utilizou-se uma pinça amperimétrica, cuja operação é conduzida por um sensor de *efeito Hall*, com sensibilidade de saída de 1 mV/A. O sinal é ligado a uma placa de aquisição de alta frequência de amostragem.

4.6.2.6 *Sistema de aquisição de dados*

A aquisição de dados pode ser classificada em duas categorias, a saber: para sinais de alta frequência e sinais de baixa frequência.

A primeira categoria composta por sinais de alta frequência inclui a tensão do arco e a corrente de soldagem; no primeiro caso, o voltímetro é conectado entre o eletrodo e a peça de trabalho a ser soldada – o sensor possui um sistema de isolamento, aplicado antes de ir para a placa de aquisição; para a medição da corrente de soldagem, tem-se um sensor de *efeito Hall*.

Os sinais de baixa frequência correspondem aos sinais fornecidos pelo Rob 5000. A aquisição dos referidos sinais, da segunda categoria, permite o monitoramento do processo e, por sua vez, permitem exercer o controle no processo na etapa de regulação de parâmetros, através da utilização das saídas analógicas disponíveis nos módulos de aquisição.

A aquisição de dados de baixa frequência se dá pelo uso da placa NI USB-6009 da *National Instruments* (ver figura 4.21). Esta apresenta as seguintes características:

- Oito canais de entrada analógicos;
- Dois canais de saída analógicos;
- Doze canais entrada/saída digital;
- Um contador de 32 bits;
- Conexão USB; e
- Compatibilidade com LabVIEW, LabWindows/CVI.



Figura 4.21: Placa de aquisição de dados USB-6009.

Para a conexão das placas de aquisição com a *interface* Rob 5000 para a regulação dos parâmetros da fonte, foi necessário condicionar/amplificar as saídas analógicas de tensão da placa (0-5 V), a fim de realizar a ligação com a interface de entrada de tensão do Rob 5000, cuja variação é entre 0-10 volts. Os canais digitais da placa foram utilizados para comandar a fonte de energia, marcando o início e o fim do processo de soldagem, bem como para ativar o deslocamento da tocha.

O *software* utilizado para comandar as placas de aquisição foi a plataforma de programação gráfica Labview 2010. Faz-se necessário destacar que foram utilizados dois computadores para gerenciar aquisição dos sinais de baixa e alta frequência, respectivamente; as suas características operacionais estão listadas como se segue:

Computador 1: (para sinais de baixa frequência) sistema operacional Windows Vista, 4GB de memória RAM e de 2.4 GHz de velocidade de processamento.

Computador 2: (para sinais de alta frequência) sistema operacional Windows XP, 1GB de memória RAM e 1.2 GHz de velocidade de processamento.

4.6.3 Materiais e insumos utilizados

Para a realização dos testes, foi utilizado, no presente estudo, o arame ASME AWS SFA-5.18 ER70S-6 com diâmetro de 1 mm; este tipo de eletrodo sólido com composição química e propriedades mecânicas, conforme apresentado na Tabela 4.4, a seguir (fornecidas pelo fabricante), é revestido com uma película fina de cobre que dificulta a oxidação e facilita a transferência elétrica no material.

Tabela 4.4: Composição química e propriedades mecânicas do eletrodo.

Composição Química									
AWS	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
ER70S-6	0,06	1,40	0,80	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,15
	-	-	-						
	0,15	1,85	1,15						
Propriedades Mecânicas									
Gás de proteção		Resistência à tração KSI(MPa)			Limite Elástico KSI(Mpa)		Resistência de impacto Mínimo Em Joules a °C		
CO2 o misturas		780(480)			58(400)		27-34°C		

A seguir, apresenta-se na figura 4.22, um esquema explicativo da classificação do eletrodo, de acordo com a norma AWS para processo de soldagem GMAW.

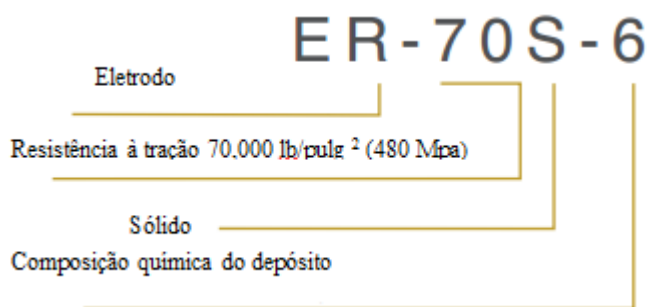


Figura 4.22: Esquema da classificação do eletrodo.

Como material de base para os testes da soldagem orbital, fez-se uso do tubo de aço AISI 1010, de 121.45 mm de diâmetro interno e 3.17 mm de espessura. O gás de proteção utilizado foi uma mistura gasosa Stargold Ar+4%CO₂, sendo adotada uma vazão de 13 l/min.

4.7 ESTUDO DA ESTABILIDADE NA DINÂMICA DE TRANSFERÊNCIA DE METAL

O foco da presente pesquisa tem por base o estudo das condições dinâmicas relacionadas com o processo de soldagem GMAW-S, razão pela qual o conhecimento da regularidade da transferência de metal fornece informações sobre o comportamento do sistema.

O modelo desenvolvido auxilia o estudo da dinâmica interna do processo nas fases de formação e transferência da gota. No entanto, um modelo matemático não pode representar com precisão os fenômenos complexos envolvidos no processo da soldagem, razão pela qual foi incluído o estudo da estabilidade na dinâmica da transferência de metal, para uma visão global que complemente o conhecimento obtido pela análise de experiências reais conduzidas, com os resultados gerados por ferramentas computacionais.

O processo de soldagem GMAW no modo de transferência por curto-circuito é considerado inerentemente instável de acordo com alguns autores, devido à sucessão de curtos-circuitos e períodos de arco (Gonçalves et al., 2008), além do fato de que a ocorrência dos curtos tem certo caráter aleatório, pela dispersão apresentada nos valores do intervalo de tempo entre a ocorrência de dois curtos-circuitos subsequentes, particularmente em condições de operação instáveis (Modenesi e Bracarense, 2007). No entanto, os oscilogramas de corrente e tensão constituem uma ferramenta viável para o estudo das condições operacionais deste tipo de transferência; assim, foram utilizados os critérios de estabilidade apresentados em (Souza, 2010), (Resende, 2007), (Souza, et al, 2011), (Gonçalves et al., 2008) e (Carneiro et al., 2011), cuja finalidade é a análise quantitativa da regularidade da transferência metálica.

Para quantificar a estabilidade da transferência no processo GMAW-S, utilizou-se o índice de regularidade (IV_{cc}) (equação 4.51), o qual tem por base a premissa de que a estabilidade da transferência está ligada à constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto. Neste sentido, a constância nos tempos é medida através de uma relação entre a média dos tempos de arco e curto-circuito, com o respectivo desvio padrão, em que os valores mais baixos do índice, dão uma boa indicação da estabilidade da transferência (menores valores, maior regularidade). Para complementação, também se levou em consideração a frequência de curto-circuito (F_{cc}) (vide equação 4.52), onde foram extraídos os curtos-circuitos incipientes com duração inferior a 2 ms, de acordo com as recomendações geradas nos estudos de Souza *et al.* (Souza, Lemos Rossi, et al., 2011). Da mesma forma, foi utilizado o fator Lis de regularidade (FL_T) (equação 4.53), que indica regularidade dos tempos de transferência aplicada a cada período (equação 4.54), ou seja, tem-se uma noção do comportamento dos tempos de curto-circuito (t_{cc}) e arco aberto (t_{ab}) com relação ao curto-circuito consecutivo. O desvio padrão do período de curto circuito (σT) foi utilizado para detectar irregularidades nos ciclos de transferência. Uma vez que o estudo sobre a regularidade da transferência é aplicado a condições de soldagem orbital, é importante

considerar fatores qualitativos da solda, o que constitui o não escorrimento do metal e a homogeneidade na geometria da poça solidificada ao longo da solda (Gonçalves et al., 2008).

$$IV_{CC} = \frac{\sigma t_{cc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma t_{ab}}{t_{ab}} \quad (4.51)$$

$$F_{CC} = \frac{1}{t_{ab} + t_{cc}} \quad (4.52)$$

$$FL_T = \frac{t_{cc}}{T} \times 100 \quad (4.53)$$

$$T = t_{ab} + t_{cc} \quad (4.54)$$

Para calcular os índices indicados anteriormente, desenvolveu-se um programa computacional em ambiente Matlab, a fim de analisar os sinais obtidos dos testes experimentais e determinar a estabilidade da transferência metálica ao longo do cordão de solda. O programa permitiu a definição da frequência de aquisição de sinais, bem como a determinação do intervalo amostral onde foram realizadas as análises (janela).

O programa é capaz de identificar os tempos de início e término do período de formação e crescimento da gota (fase de arco), e os tempos de início e fim do período da transferência de massa (fase de curto-circuito), para, subsequentemente, armazenar as informações em seus respectivos vetores e, assim, determinar o tempo de duração média do arco e do curto-circuito, com o seus respectivos desvio padrão. E ainda, o programa conta o número de curtos-circuitos encontrados na janela de análise, para determinar a sua frequência de ocorrência em uma determinada região de tubo. Neste sentido, faz-se importante destacar que foram descartados os curtos-circuitos incipientes, ou seja, de duração inferior a 2 ms, uma vez que, por sua curta existência, não são caracterizados como transferência de metal.

4.8 REGRA DE REGULAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

A necessidade da aplicação de uma regra de regulação de parâmetros para soldagem orbital surgiu após do estudo da estabilidade da transferência metálica, com a finalidade de mitigar os efeitos da variação do ângulo de soldagem, uma vez que para melhorar a qualidade da soldagem, faz-se necessária uma transferência de massa regular ao longo do cordão de solda.

Para a aplicação desta fase de regulação, foram tomadas em consideração as contribuições de Doodman (2010) e Cayo (2013), com base na redução dos efeitos causados pela variação da força da gravidade, originados pela variação do ângulo de soldagem (φ). Esta regra é aplicada tanto ao modelo híbrido como à planta de testes experimentais, para estabelecer a diferença no comportamento dinâmico do processo, respeito à fase desenvolvida sem regulação.

Lembrando que, no processo de soldagem GMAW-S a transferência de metal é gerada exclusivamente fase curto-circuito, a regra da regulação é estabelecida a partir das equações que regem esta fase.

A partir do conjunto de equações apresentadas na descrição do modelo para o período de curto-circuito, verificou-se que as forças de maior impacto no processo da transferência de massa são a força de gravidade, de tensão superficial (lei de Laplace) e a força gerada pelo efeito *Pinch*. Por conseguinte, a força média total (\hat{F}_{TT}) exercida na transferência de massa corresponde à Equação 4.55, a seguir. Importante notar por simplificação da regra de regulação, a tensão superficial não se levou em conta pela desconsideração dos efeitos da mudança de posição no seu aporte.

$$\hat{F}_{TT} = \left(\frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 \hat{R}_1^1} + \gamma \left(\frac{1}{\hat{R}_1} + \frac{1}{\hat{R}_2} \right) \right) \pi r_e^2 + \hat{m}_g g \cos(\varphi) \quad (4.55)$$

A transferência de massa deve ser regular em todos os ângulos, o que requer que a força total de transferência aplicado ao longo da solda, seja a mesma força aplicada na posição inicial, isto é, a zero grau ($\varphi = 0^\circ$), conforme evidenciado na Equação 4.56, a seguir.

$$\hat{F}_{TT} = \hat{F}_{TT0}, \quad \forall \varphi \quad (4.56)$$

O desenvolvimento da anterior igualdade é apresentado na Equação 4.57, a seguir.

$$\left(\frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 \hat{R}_1^1} + \gamma \left(\frac{1}{\hat{R}_1} + \frac{1}{\hat{R}_2} \right) \right) \pi r_e^2 + \hat{m}_g g \cos(\varphi) = \left(\frac{\mu_0 I_0^2}{8\pi^2 \hat{R}_1^1} + \gamma \left(\frac{1}{\hat{R}_1} + \frac{1}{\hat{R}_2} \right) \right) \pi r_e^2 + \hat{m}_g g \cos(0) \quad (4.57)$$

A partir da equação da regulação das forças apresentada anteriormente, é possível observar que o balanço das forças pode ser regulado somente pelo ajuste contínuo da corrente de soldagem em função da posição (φ); portanto, a partir desta, é possível obter a equação para a regulação da corrente de referência conforme a Equação 4.58, a seguir.

$$I_{ref} = \left(I_0^2 + \hat{m}_g g (1 - \cos(\varphi)) \frac{8\pi\hat{R}_1^2}{\mu_0 r_e^2} \right)^{0.5} \quad (4.58)$$

Com o ajuste da corrente, faz-se importante considerar a adaptação de outros parâmetros a fim de obter condições estáveis em todos os ângulos, um dos quais é a tensão de soldagem (V), cuja relação com a corrente e os valores iniciais para ($\varphi = 0$), é expressa pela Equação 4,59, a seguir.

$$\frac{V}{I} = \frac{V_0}{I_0}, \quad \forall \varphi \quad (4.59)$$

Portanto, a tensão de soldadura de referência pode ser expressa através da Equação 4.60, a seguir.

$$V_{ref} = \frac{IV_0}{I_0} \quad (4.60)$$

Substituindo na Equação 4.60, a corrente de referência da Equação 4.58, apresentada anteriormente, obtém-se a equação para o ajuste da tensão de referência, conforme se segue:

$$V_{ref} = \frac{V_0}{I_0} \left(I_0^2 + \hat{m}_g g (1 - \cos(\varphi)) \frac{8\pi\hat{R}_1^2}{\mu_0 r_e^2} \right)^{0.5} \quad (4.61)$$

A velocidade de soldadura (v_{sold}) é outro parâmetro para ser ajustado, uma vez que após a variação da tensão e corrente de soldagem, é induzida uma alteração na contribuição do aporte térmico (H), cuja relação de regulação é dada pela Equação 4.62, a seguir.

$$H = \frac{VI}{v_{sold}} = \frac{V_0 I_0}{v_{sold0}} \quad (4.62)$$

A partir da relação apresentada anteriormente, obtém-se que a velocidade de soldagem de referência pode ser expressa conforme evidenciado nas Equações 4.63 e 4.64, a seguir.

$$v_{soldref} = v_{sold0} \frac{V_{ref} I_{ref}}{V_0 I_0} = v_{sold0} \left(\frac{I_{ref} V_0}{I_0} \right) \frac{I_{ref}}{V_0 I_0} = v_{sold0} \frac{I_{ref}^2}{I_0^2} \quad (4.63)$$

$$v_{soldref} = v_{sold0} \left(1 + \left(\frac{1}{I_0^2} \right) \frac{8\pi\hat{R}_1^2}{\mu_0 r_e^2} \hat{m}_g g (1 - \cos(\varphi)) \right) \quad (4.64)$$

A velocidade de alimentação de arame está ligada à uniformidade da taxa de deposição (D), através da relação da Equação 4.65, a seguir, conforme as variações da posição de

soldagem (φ), sendo possível extrair a velocidade de alimentação de arame de referência, conforme se segue na Equação 4.66, a seguir.

$$D = \frac{var}{v_{sold}} = \frac{var_0}{v_{sold0}}, \quad \forall \varphi \quad (4.65)$$

$$var_{ref} = \frac{var_0}{v_{sold0}} \left(1 + \left(\frac{1}{l_0^2} \right) \frac{8\pi \hat{R}_1^2}{\mu_0 r_e^2} \hat{m}_g g (1 - \cos(\varphi)) \right) \quad (4.66)$$

5 RESULTADOS

No presente capítulo têm-se as respostas obtidas a partir das simulações do modelo híbrido proposto e dos experimentos com e sem regulação de parâmetros. A apresentação dos resultados será abordada em cinco grupos, sendo este capítulo dividido em cinco partes. Na primeira parte, faz-se evidente a validação do modelo, a partir dos testes experimentais sobre soldagem orbital em condições normais de operação (srp). Na segunda parte, foram analisados os resultados sobre a influência dos parâmetros de soldagem na estabilidade da transferência de metal. Feitas as análises, foram estabelecidas as melhores condições para a soldagem orbital e, a partir de tais condições, estudou-se a dinâmica do processo GMAW-S através das simulações realizadas no modelo híbrido. Conseqüentemente, na quarta etapa, analisou-se o comportamento em relação à estabilidade na transferência de metal, a partir dos experimentos realizados com regulação de parâmetros (crp). Finalmente, na última etapa, tem-se a apresentação dos resultados obtidos pelas simulações do modelo híbrido, incluindo a regra de regulação, com o objetivo de observar o comportamento dinâmico do processo GMAW-S sob condições reguladas na soldagem. Diante do exposto, vale destacar que a análise dos resultados deu-se de forma quantitativa e qualitativa, levando-se em conta as respostas de estabilidade na transferência de metal e o aspecto visual dos cordões de solda em termos da simetria e presença do escoamento da poça.

5.1 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO

Com base no procedimento experimental descrito no quarto capítulo do presente estudo, realizou-se a validação do modelo proposto, através da comparação da corrente de soldagem gerada durante o processo experimental, sem a regulação de parâmetros e da corrente produzida pelo modelo.

Faz-se importante destacar que todas as provas foram executadas na posição vertical descendente (0° - 180°), mantendo fixo o ângulo de ataque em 15° , a DBCP em 12 mm, e a vazão de gás em 13 l/min.

A tabela 5.1, a seguir, apresenta os parâmetros utilizados nos experimentos da primeira fase (srp), com os seus respectivos valores médios de corrente e tensão, realizados dentro da região da transferência de massa por curto-circuito.

Tabela 5.1: Testes iniciais sem regulação de parâmetros

Experimento	Tensão de soldagem [V]	Velocidade de alimentação de arame [m/min]	Velocidade de soldagem [mm/s]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]
A2	18	6,0	13	201,0013	12,9294
A3	18,5	6,0	13	198,7878	13,2227
A4	18,5	6,0	12	200,6628	13,2186
B1	18	6,0	14	189,6892	12,9539
B2	18	6,0	12	179,8670	13,5805
B3	18.5	6,0	14	179,8753	13,8238
B4	19	6,0	14	179,8668	14,4118
B5	19	6,0	13	198,2478	13,9152
B6	19	6,0	12	202,0389	13,8554
B7	20	6,0	14	200,3985	14,6549
B8	20	6,0	13	202,5421	14,6073
B9	20	6,0	12	202,6890	14,5499
B10	18	5,5	14	186,0441	13,3010
B11	18	5,5	13	187,1833	13,1931
B12	18	5,5	12	188,3468	13,0460
B13	18,5	5,5	14	187,0073	13,4024
B14	18,5	5,5	13	187,3889	13,4476
B15	18,5	5,5	12	186,2186	13,4362
B16	19	5,5	14	184,6374	13,8861
B17	19	5,5	13	183,2596	13,8602
B18	19	5,5	12	172,8964	13,8671
B19	20	5,5	14	181,3988	14,5430
B20	20	5,5	13	181,4891	14,5834
B21	20	5,5	12	182,3160	14,6631

Antes da validação do modelo proposto, fez-se necessário a atribuição de valores adequados para as constantes e para os parâmetros requeridos pelo modelo, a fim de originar um verdadeiro ponto de comparação com as provas realizadas no laboratório de soldagem. Para tanto, foram utilizados os resultados dos testes descritos anteriormente, por meio de uma metodologia comparativa para ajustar as constantes do modelo, de acordo com a lógica do esquema apresentado na Figura 5.1, a seguir, ao qual o nível de erro permitido foi comandado pela faixa de variação tolerada pelo desvio padrão da corrente obtida experimentalmente. Vale esclarecer que, inicialmente, o modelo foi criado com as constantes adotadas por outros autores que foram tomados aqui como referência (Doodman, 2010b), (Planckaert, 2008), (Planckaert et al., 2010a).

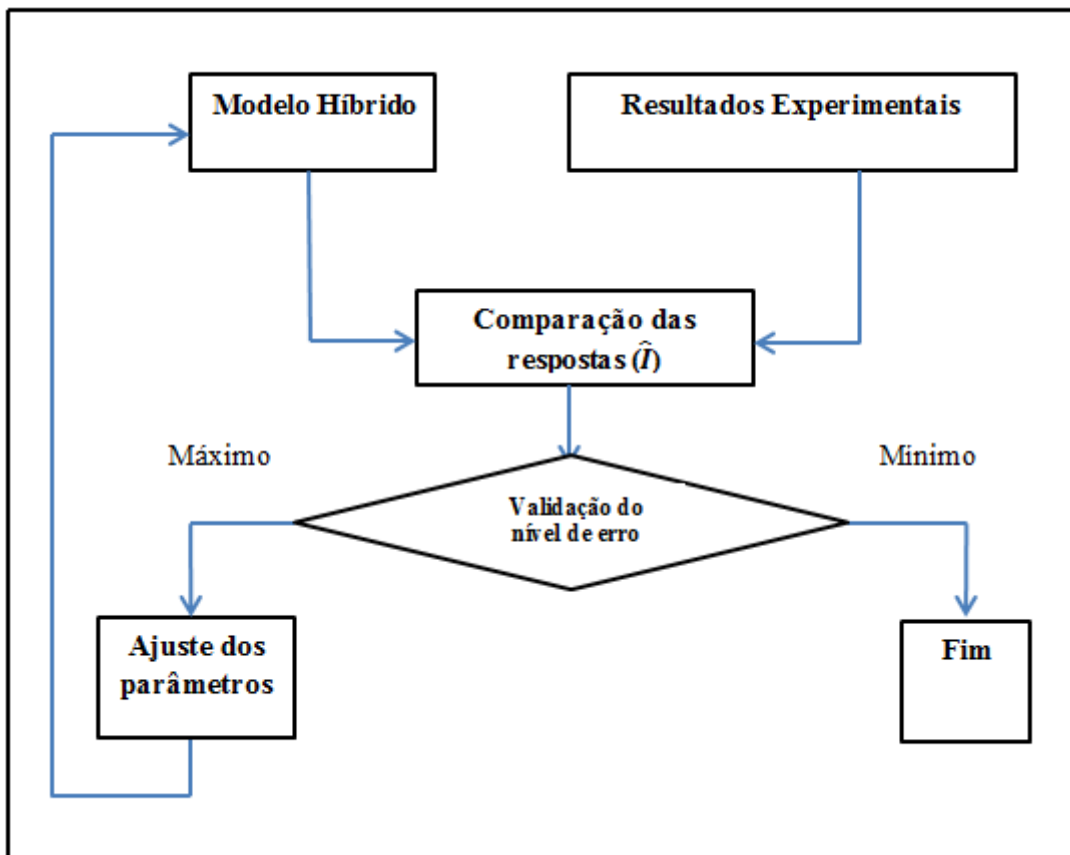


Figura 5.1: Esquema de ajuste dos parâmetros do modelo híbrido

As constantes do modelo encontradas pelo método descrito anteriormente foram utilizadas para executar as simulações. Os parâmetros estabelecidos e suas respectivas unidades são apresentados na Tabela: 5.2, a seguir.

Tabela 5.2: Parâmetros do modelo híbrido

Símbolo	Grandeza	Valor [Unidades]
g	Aceleração da gravidade	9.8 [m/s ²]
γ	Módulo de tensão superficial	1.2 [Nm ⁻¹]
r_e	Raio do eletrodo	0.5 [mm]
μ_0	Permeabilidade magnetica	$4\pi 10^{-7}$ [N/A ²]
$DBCP$	Distância bico de contato peça	12 [mm]
ρ_e	Densidade do eletrodo	7569 [kg/m ³]
C_1	Constante de aquecimento por arco	2.96×10^{-4} [m ³ /As]
C_2	Constante de aquecimento por efeito jule	0.0537 [m ³ /VAs]
ρ	Resistividade linear	8.64e-13 [V/Am]
L	Indutância	$0.75e^{-3}$ [H]
R_s	Resistência de fonte de soldadura	$2e^{-3}$ [V/A]
U_0	Constante tensão do arco	12 [V]
R_a	Resistência do Arco	$35e^{-3}$ [V/A]
E_a	Fator comprimento do arco	1500 [V/m]

O modelo híbrido desenvolvido permite a introdução de parâmetros de soldagem iniciais (tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem) para a obtenção de um ponto de comparação entre os dados experimentais e simulados. Tal ação é utilizada para realizar o processo de validação.

Após o ajuste das constantes do modelo, procedeu-se a validação do mesmo, via comparação do valor médio da corrente obtida nos testes experimentais e no modelo híbrido proposto.

O resultado da validação do modelo pela comparação das respostas da corrente média é apresentado em dois grupos, conforme apresentado nas Figuras 5.2 e 5.3, a seguir. O primeiro corresponde aos resultados dos experimentos feitos com velocidade de alimentação de arame de 5,5 m/min, e o segundo grupo se dá para velocidades de alimentação de arame de 6 m/min. Faz-se importante destacar que em cada um grupos, a velocidade de soldagem apresentou variação de 14 mm/s, 13 mm/s e 12 mm/s, respectivamente. Diante do exposto, é possível notar que os resultados entregues pelo modelo híbrido do processo GMAW-S para soldagem orbital encontram-se dentro da faixa de variação permitida, o que indica que o modelo proposto fornece sinais que acompanham o comportamento do processo, reagindo proporcionalmente à variação dos parâmetros de entrada.

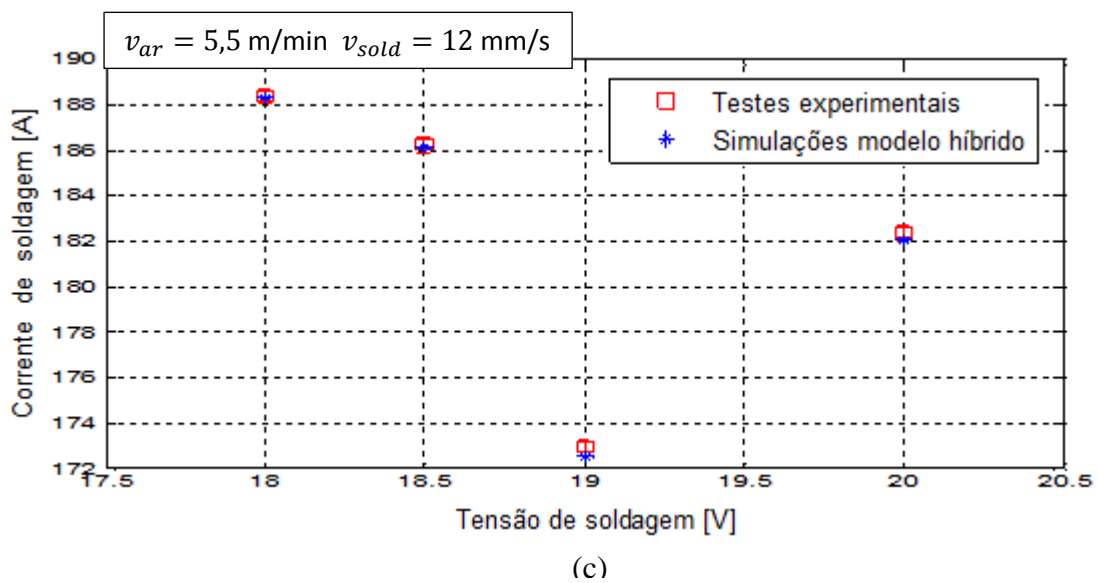
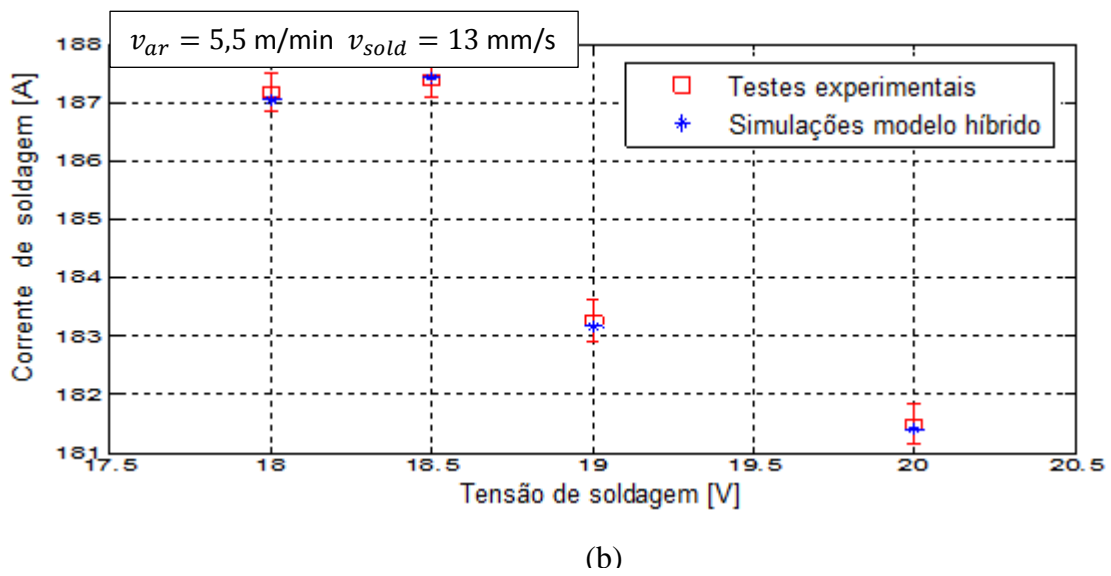
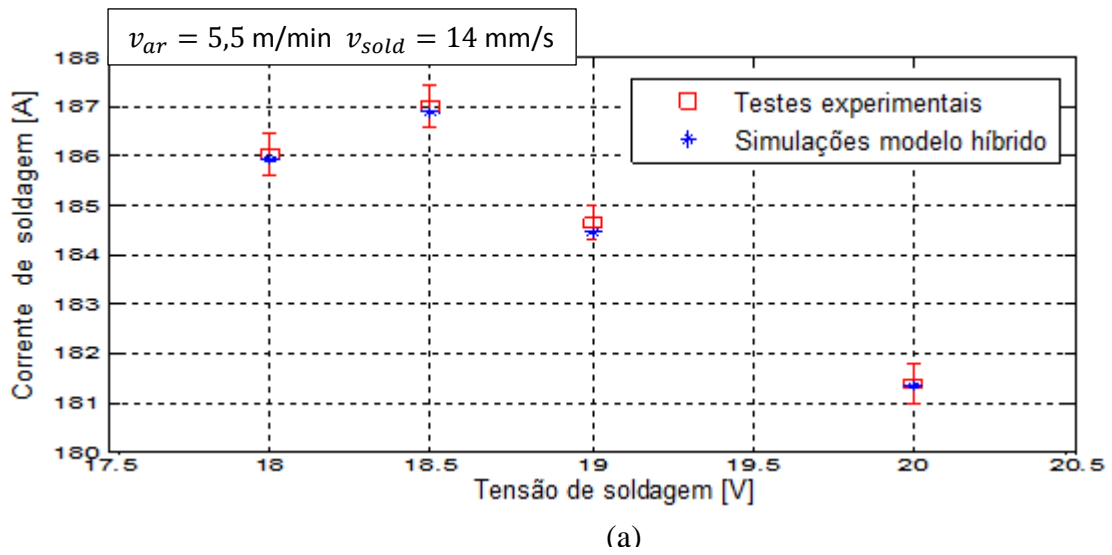
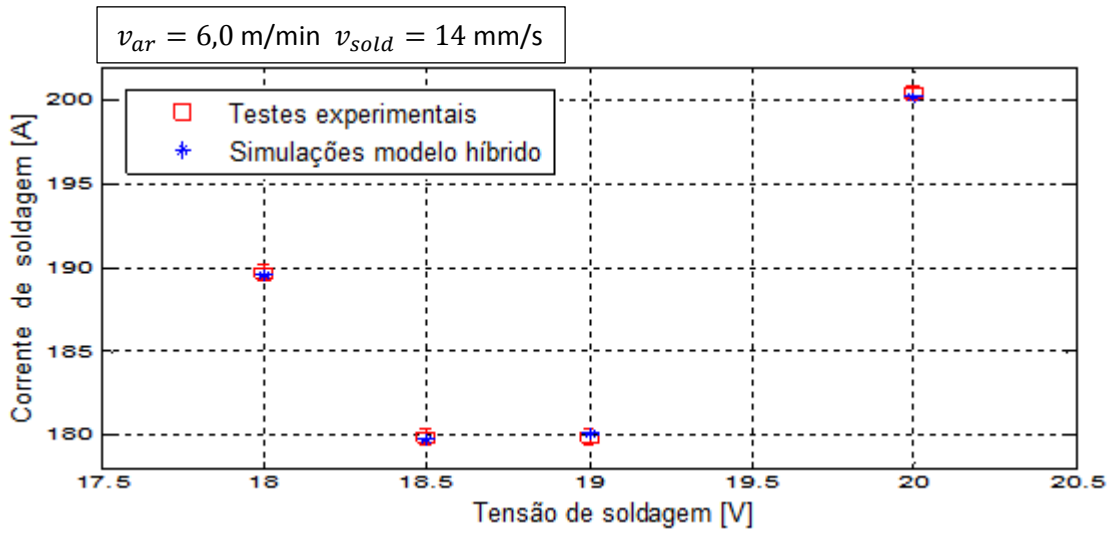
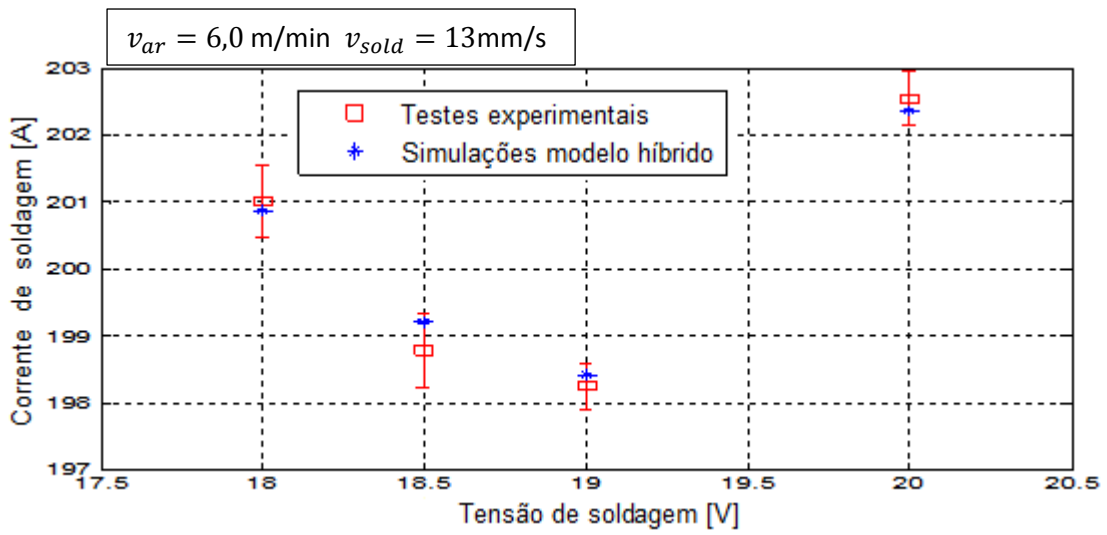


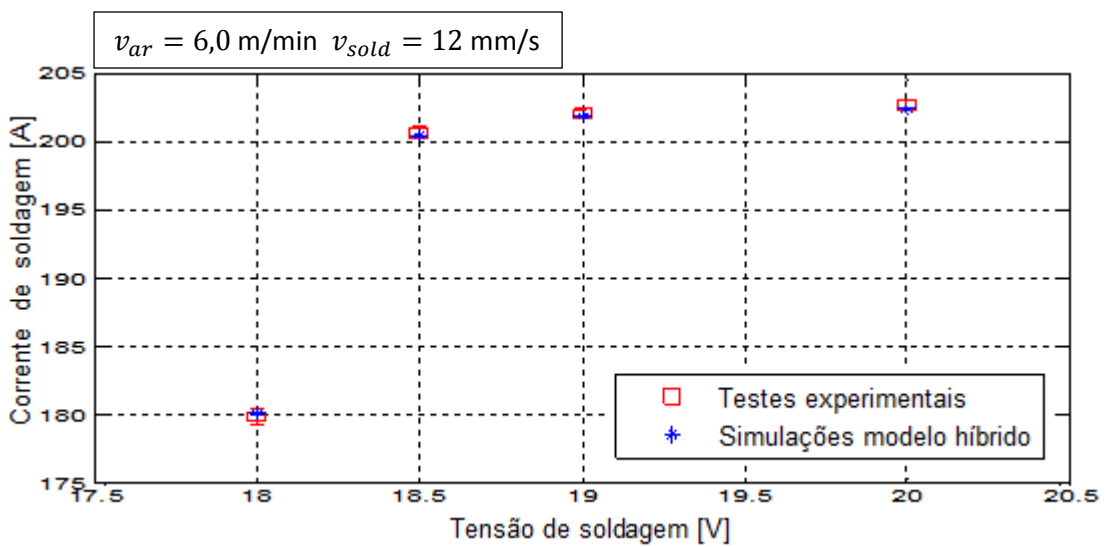
Figura 5.2: Validação do modelo híbrido para experimentos com $v_{ar} = 5,5$ e (a) $v_{sold} = 14$ mm/s, (b) $v_{sold} = 13$ mm/s, (c) $v_{sold} = 12$ mm/s.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.3: Validação do modelo híbrido para experimentos com $v_{ar} = 6,0$ e (a) $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$, (b) $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$, (c) $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

5.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS SEM REGULAÇÃO DE PARÂMETROS

O conjunto de experimentos sem regulação de parâmetros foi realizado seguindo a configuração de parâmetros de entrada, conforme se tem na Tabela 5.1, apresentada anteriormente. O objetivo dos referidos experimentos foi avaliar a influência dos parâmetros de soldagem na estabilidade da transferência de metal ao longo do cordão de solda. Assim, o estudo da estabilidade na solda foi dividido por áreas e realizado cada 20°, tal como indicado na Figura 5.4, a seguir.

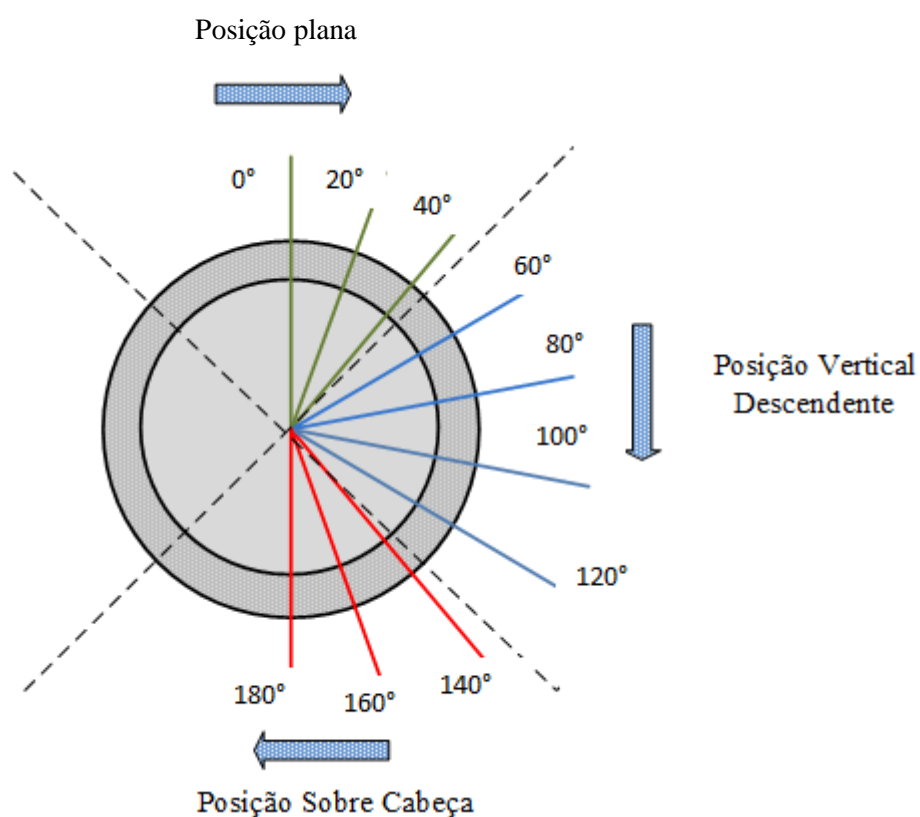


Figura 5.4: Divisão do tubo de acordo com a posição de soldagem.

Na figura 5.4 apresentada anteriormente, é possível notar que durante o processo de soldagem, foram adotadas diversas posições em torno do tubo (plana, vertical descendente e sobre cabeça) que geram mudanças abruptas na forma da deposição de material no mesmo, pela sua geometria circular. Esta razão foi a principal motivação para o estudo da estabilidade da transferência ao longo da mesma solda, tendo em vista que, ao contrário da

soldagem em posição plana, na soldagem orbital tem-se continuamente a geometria do corpo de prova e, assim, os diversos fenômenos físicos que atuam sobre a gota.

Nos capítulos anteriores foram apresentados vários estudos realizados na análise de estabilidade no processo GMAW-S. No entanto, todos tiveram foco exclusivamente para a soldagem na posição plana. Portanto, a abordagem do presente estudo é a primeira do gênero, mas é claramente influenciada pelos mesmos critérios aplicados na soldagem na posição plana, com a diferença de que o estudo e a comparação da estabilidade na transferência foram realizados sobre a mesma solda.

5.2.1 Resultados da análise da estabilidade na transferência metálica nas soldas sem regulação de parâmetros

Para fazer a análise da estabilidade da transferência de metal, cada sinal de tensão da solda foi dividido por janelas (descartando as instabilidades iniciais e finais), a fim de conhecer o comportamento e a variação dos índices a cada 20°, conforme evidenciado na Figura 5.5, a seguir, o que apoia e acolhe as recomendações apresentadas por Souza (2010), de repartir a amostra em comprimentos de 3 a 5 s, para avaliar a variação dos índices ao longo da solda.

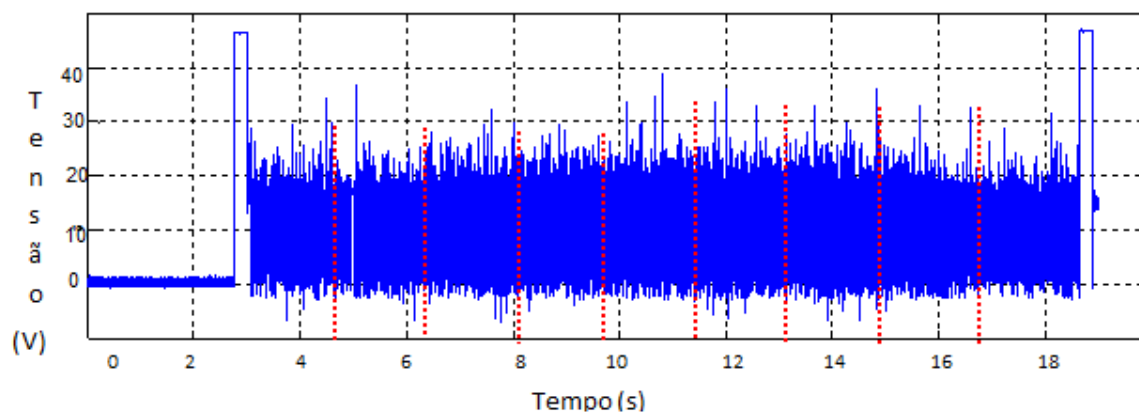


Figura 5.5: Divisão do sinal de tensão para a análise de estabilidade de transferência.

Na figura apresentada anteriormente, a faixa de cada janela foi cuidadosamente escolhida, tendo em vista os parâmetros de entrada e o tempo demandado pela tocha para percorrer uma determinada seção do tubo.

Os experimentos nesta etapa foram realizados com a variação dos parâmetros em torno dos parâmetros ótimos na soldagem em posição plana, tal como exposto nas secções anteriores (vide Tabela 4.1), onde cada solda foi marcada com um código preservado ao longo do presente estudo, conforme indicado na Tabela 5.1, apresentada anteriormente. O resultado da avaliação da estabilidade na transferência de metal para cada uma das soldas é condensado em uma respectiva tabela, conforme evidenciado abaixo (tabela 5.3 – tabela 5.26).

As características relativas à regularidade dos curtos-circuitos são quantificadas pelo índice de regularidade (IV_{cc}), pela frequência de curto-circuito (F_{cc}), pelo índice de regularidade dos tempos de transferência (FL_T) e pelo fator de curto circuito ($f1_{cc}$), considerados como critérios de avaliação do comportamento da transferência metálica.

A seguir, têm-se os resultados da análise da estabilidade na transferência para cada cordão de solda, com a respectiva imagem obtida nas provas (Figura 5.6 – 5.29).

Parâmetros da solda A2: $V = 18 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

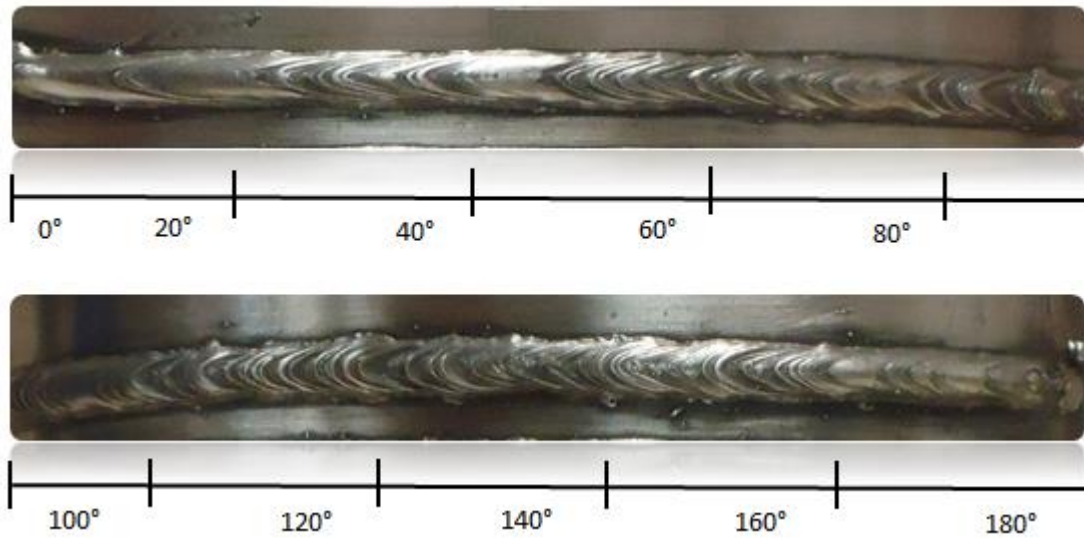


Figura 5.6: Visual da solda A2 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.3: Índices de estabilidade para cada secção da solda A2.

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0317	0,0055	0,0120	0,0013	0,2872	22,8550	27,4596	0,0438
$20^\circ - 40^\circ$	0,0074	3,4264 e-04	0,0041	1,3784e- 04	0,0799	86,9995	36,0526	0,0115
$40^\circ - 60^\circ$	0,0079	4,1904 e-04	0,0045	1,9224e- 04	0,0955	80,4581	36,3003	0,0124
$60^\circ - 80^\circ$	0,0102	7,0647 e-04	0,0059	3,8523e- 04	0,1348	62,1285	36,3917	0,0161
$80^\circ - 100^\circ$	0,0092	2,3638 e-04	0,0055	3,3172e- 04	0,1345	67,8945	37,3979	0,0147
$100^\circ - 120^\circ$	0,0162	0,0017	0,0086	6,3999e- 04	0,1781	40,3531	34,7391	0,0248
$120^\circ - 140^\circ$	0,0140	0,0013	0,0077	5,9672e- 04	0,1675	45,9934	35,4368	0,0217
$140^\circ - 160^\circ$	0,0099	7,1618 e-04	0,0052	3,1221e- 04	0,1324	66,2325	34,4409	0,0151
$160^\circ - 180^\circ$	0,0101	1,2770 e-04	0,0039	9,9890e- 05	0,0813	71,2913	27,8865	0,0140

Parâmetros da solda A3: $V = 18,5 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

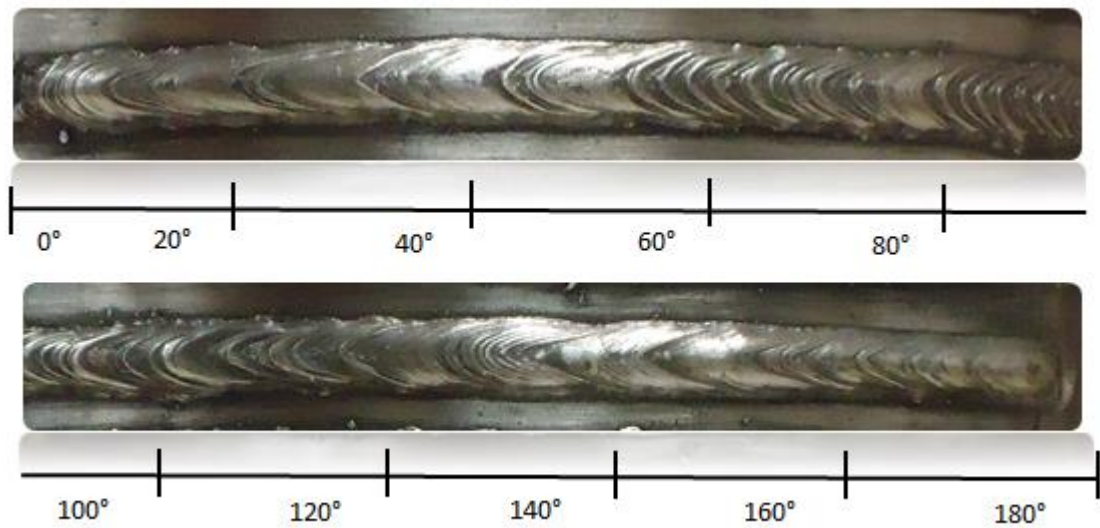


Figura 5.7: Visual da solda A3 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.4: Índices de estabilidade para cada secção da solda A3.

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0109	8,8414 e-04	0,0053	3,7045e- 04	0,1505	61,6086	32,9100	0,0162
$20^\circ - 40^\circ$	0,0076	3,6002 e-04	0,0037	7,6776e- 05	0,0680	88,2871	33,0421	0,0113
$40^\circ - 60^\circ$	0,0078	4,7029 e-04	0,0047	2,2120e- 04	0,1076	80,0750	37,2349	0,0125
$60^\circ - 80^\circ$	0,0089	5,3998 e-04	0,0052	2,7516e- 04	0,1135	70,8250	36,8206	0,0141
$80^\circ - 100^\circ$	0,0169	0,0019	0,0084	7,5580e- 04	0,2040	39,4904	33,2193	0,0253
$100^\circ - 120^\circ$	0,0145	0,0014	0,0079	6,5023e- 04	0,1823	44,6506	35,2269	0,0224
$120^\circ - 140^\circ$	0,0105	7,1175 e-04	0,0058	3,9029e- 04	0,1352	61,4176	35,6563	0,0163
$140^\circ - 160^\circ$	0,0087	3,9400 e-04	0,0037	4,7024e- 05	0,0579	80,6279	29,5869	0,0124
$160^\circ - 180^\circ$	0,0130	8,4108 e-04	0,0046	2,1136e- 04	0,1102	56,6850	26,3035	0,0176

Parâmetros da solda A4: $V = 18,5 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$

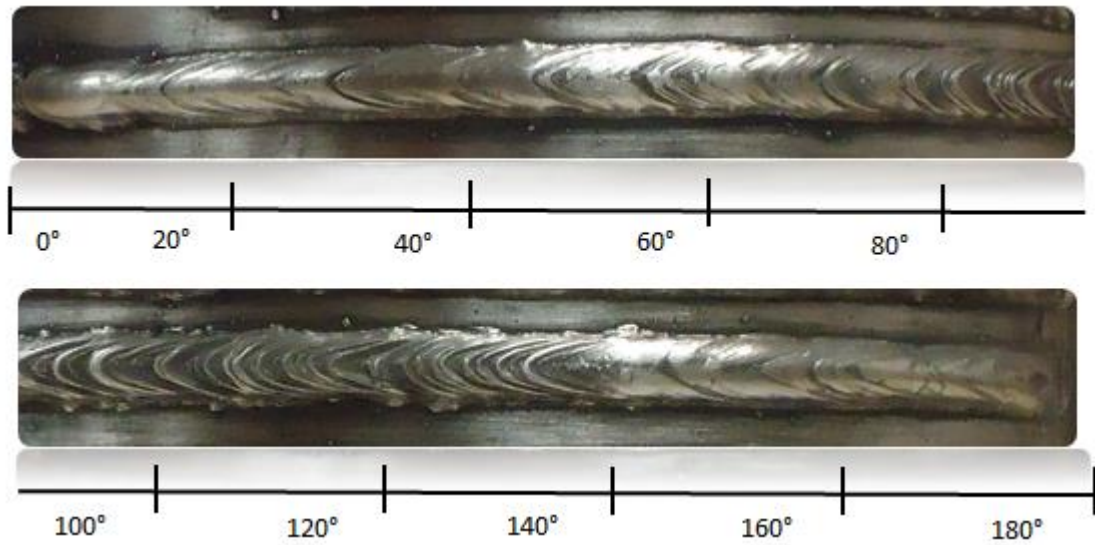


Figura 5.8: Visual da solda A4 ao longo do tubo (0°- 180°).

Tabela 5.5: Índices de estabilidade para cada secção da solda A4

φ (°)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0°-20°	0,0086	4,1965 e-04	0,0036	7,1928e- 05	0,0687	81,8353	29,4455	0,0122
20°-40°	0,0074	3,3478 e-04	0,0036	6,3140e- 05	0,0626	90,7187	32,4571	0,0110
40°-60°	0,0065	2,3535 e-04	0,0035	5,0932e- 05	0,0511	100,797 5	34,8858	0,0099
60°-80°	0,0075	3,1056 e-04	0,0040	9,2185e- 05	0,0646	87,1073	34,9481	0,0115
80°-100°	0,0135	0,0013	0,0074	5,9084e- 04	0,1748	48,0684	35,3303	0,0208
100°-120°	0,0148	0,0013	0,0076	5,4886e- 04	0,1613	44,6839	34,0518	0,0224
120°-140°	0,0176	0,0017	0,0079	6,2652e- 04	0,1731	39,1832	31,0053	0,0255
140°-160°	0,0097	5,5051 e-04	0,0045	1,9006e- 04	0,0994	70,7054	31,6996	0,0141
160°-180°	0,0128	7,1470 e-04	0,0040	1,0479e- 04	0,0824	59,7475	23,6513	0,0167

Parâmetros da solda B1: $V = 18 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$

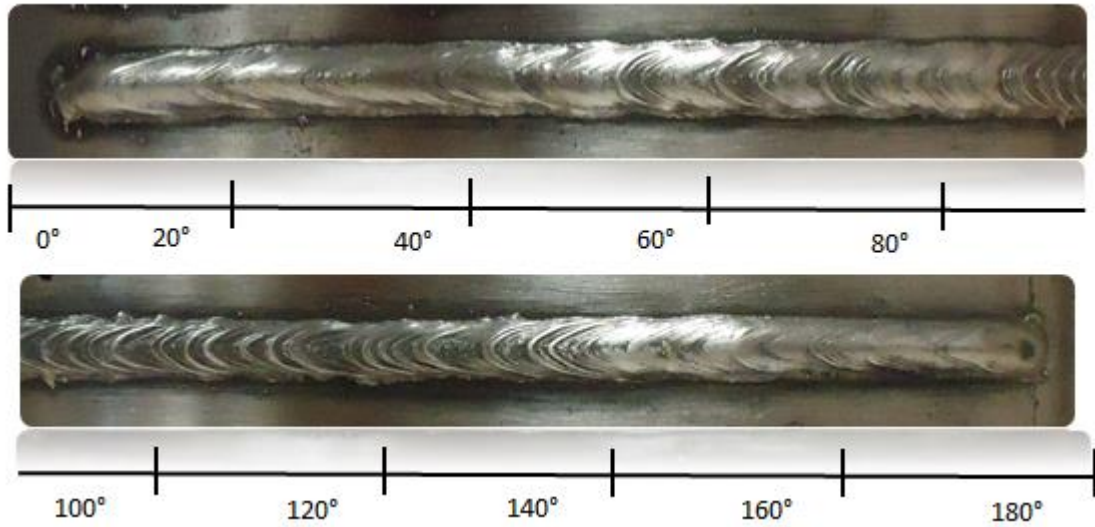


Figura 5.9: Visual da solda B1 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.6: Índices de estabilidade para cada secção da solda B1

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0081	3,7410 e-04	0,0035	6,0380e- 05	0,0631	85,7507	30,4158	0,0117
$20^\circ - 40^\circ$	0,0067	3,0692 e-04	0,0036	6,4534e- 05	0,0640	97,4449	35,0146	0,0103
$40^\circ - 60^\circ$	0,0072	3,5142 e-04	0,0038	9,1490e- 05	0,0730	91,0149	34,7787	0,0110
$60^\circ - 80^\circ$	0,0070	3,3158 e-04	0,0040	1,1197e- 04	0,0754	90,9746	36,3542	0,0110
$80^\circ - 100^\circ$	0,0086	5,1799 e-04	0,0051	3,0208e- 04	0,1188	72,6670	37,3792	0,0138
$100^\circ - 120^\circ$	0,0181	0,0025	0,0081	7,6962e- 04	0,2317	38,2139	30,8203	0,0262
$120^\circ - 140^\circ$	0,0138	0,0013	0,0067	5,4141e- 04	0,1749	48,8811	32,6444	0,0205
$140^\circ - 160^\circ$	0,0094	4,9001 e-04	0,0044	1,6075e- 04	0,0886	72,4905	32,0746	0,0138
$160^\circ - 180^\circ$	0,0109	5,6055 e-04	0,0039	1,2440e- 04	0,0828	67,2182	26,4595	0,0149

Parâmetros da solda B2: $V = 18 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

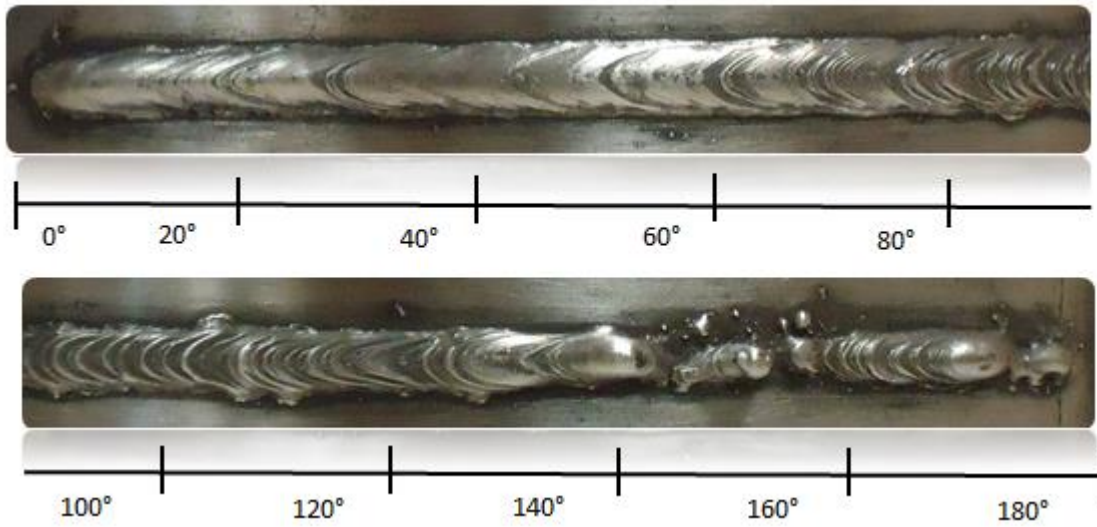


Figura 5.10: Visual da solda B2 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.7: Índices de estabilidade para cada secção da solda B2

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0086	3,7084 e-04	0,0035	4,9690e- 05	0,0573	82,5961	29,2390	0,0121
$20^\circ - 40^\circ$	0,0069	2,8301 e-04	0,0038	7,9386e- 05	0,0621	93,8044	35,5668	0,0107
$40^\circ - 60^\circ$	0,0061	2,4376 e-04	0,0035	5,6022e- 05	0,0558	103,787 4	36,8027	0,0096
$60^\circ - 80^\circ$	0,0083	4,3885 e-04	0,0053	2,7522e- 04	0,1051	73,7516	38,9501	0,0136
$80^\circ - 100^\circ$	0,0186	0,0020	0,0098	8,3099e- 04	0,1938	35,2420	34,4819	0,0284
$100^\circ - 120^\circ$	0,0158	0,0015	0,0088	6,8168e- 04	0,1720	40,5266	35,7896	0,0247
$120^\circ - 140^\circ$	0,0203	0,0027	0,0081	7,1616e- 04	0,2217	35,2075	28,6589	0,0284
$140^\circ - 160^\circ$	0,0274	0,0055	0,0203	0,0024	0,3173	20,9864	42,4974	0,0476
$160^\circ - 180^\circ$	0,0257	0,0042	0,0099	0,0010	0,2663	28,0379	27,8941	0,0357

Parâmetros da solda B3: $V = 18,5 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$.

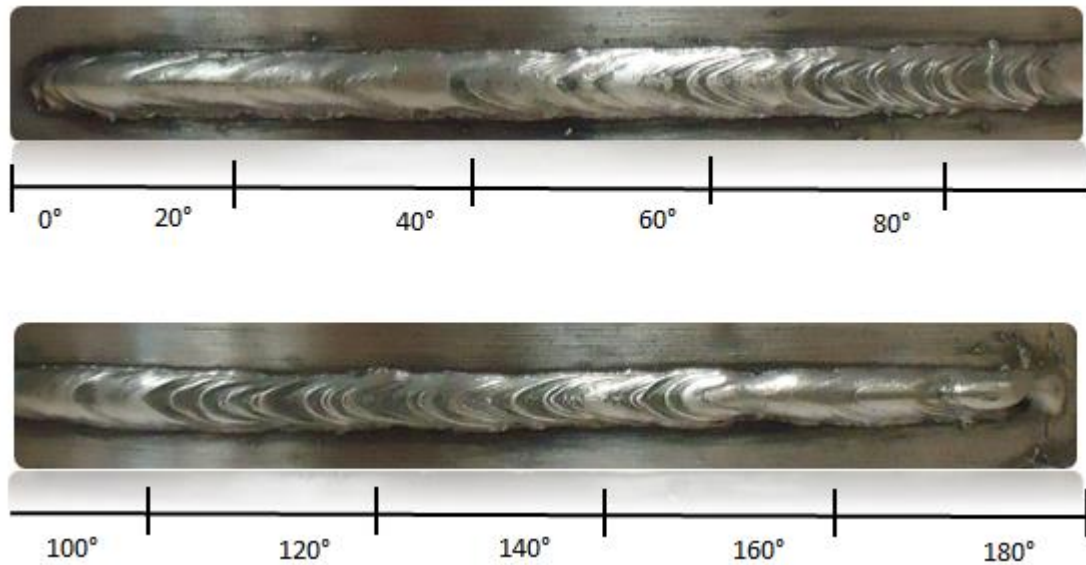


Figura 5.11: Visual da solda B3 ao longo do tubo (0°- 180°).

Tabela 5.8: Índices de estabilidade para cada secção da solda B3

φ (°)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0°-20°	0,0093	4,4209 e-04	0,0034	3,1154e- 05	0,0565	78,5225	26,6977	0,0127
20°-40°	0,0081	3,7764 e-04	0,0038	8,2719e- 05	0,0686	84,2660	31,6224	0,0119
40°-60°	0,0072	3,3863 e-04	0,0038	9,6942e- 05	0,0723	90,5646	34,6386	0,0110
60°-80°	0,0124	0,0011	0,0065	5,4765e- 04	0,1697	52,9537	34,5635	0,0189
80°-100°	0,0102	7,4771 e-04	0,0049	2,4395e- 04	0,1233	66,3361	32,3737	0,0151
100°-120°	0,0128	0,0011	0,0056	3,9974e- 04	0,1596	54,3644	30,4692	0,0184
120°-140°	0,0186	0,0022	0,0077	6,7354e- 04	0,2075	38,0207	29,3796	0,0263
140°-160°	0,0135	0,0012	0,0055	3,9853e- 04	0,1599	52,5217	28,8965	0,0190
160°-180°	0,0162	0,0012	0,0044	1,9419e- 04	0,1194	48,4936	21,2137	0,0206

Parâmetros da solda B4: $V = 19 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$.

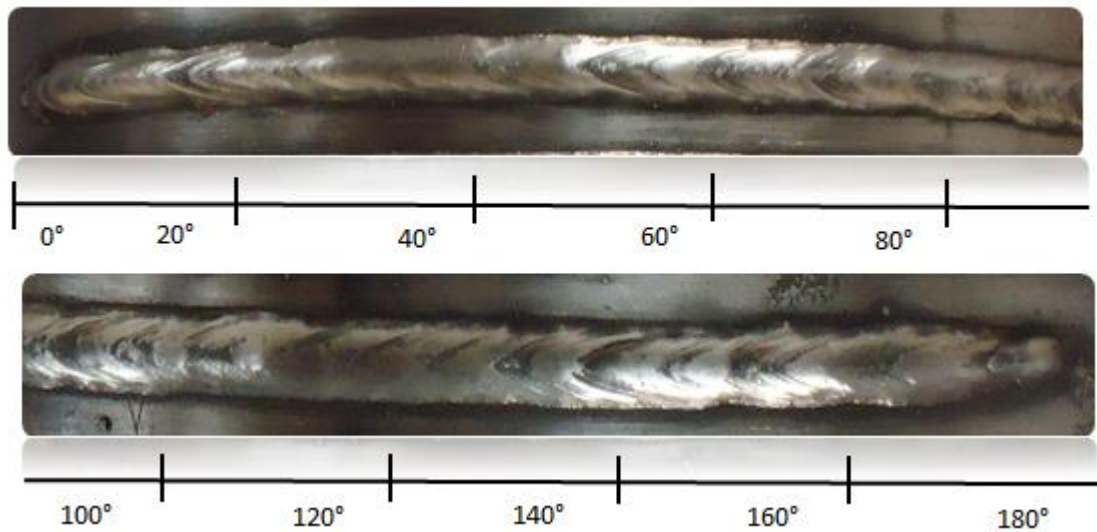


Figura 5.12: Visual da solda B4 ao longo do tubo (0°- 180°).

Tabela 5.9: Índices de estabilidade para cada secção da solda B4

φ (°)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0°-20°	0,0114	8,0147 e-04	0,0039	1,1780e- 04	0,0999	64,9941	25,6673	0,0154
20°-40°	0,0082	4,0941 e-04	0,0034	4,1149e- 05	0,0623	86,5369	29,4116	0,0116
40°-60°	0,0080	4,0231 e-04	0,0035	4,0997e- 05	0,0618	86,6860	30,4160	0,0115
60°-80°	0,0074	3,1284 e-04	0,0036	4,3619e- 05	0,0543	90,9355	32,3095	0,0110
80°-100°	0,0070	2,8340 e-04	0,0035	4,2893e- 05	0,0528	95,1935	33,6422	0,0105
100°-120°	0,0072	2,9980 e-04	0,0036	5,1100e- 05	0,0558	92,3655	33,7080	0,0108
120°-140°	0,0070	2,7152 e-04	0,0037	3,8052e- 05	0,0494	94,0065	34,6039	0,0106
140°-160°	0,0086	4,2954 e-04	0,0037	4,6185e- 05	0,0624	81,3132	30,0639	0,0123
160°-180°	0,0173	0,0015	0,0040	8,9391e- 05	0,1092	47,0029	18,8203	0,0213

Parâmetros da solda B5: $V = 19 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

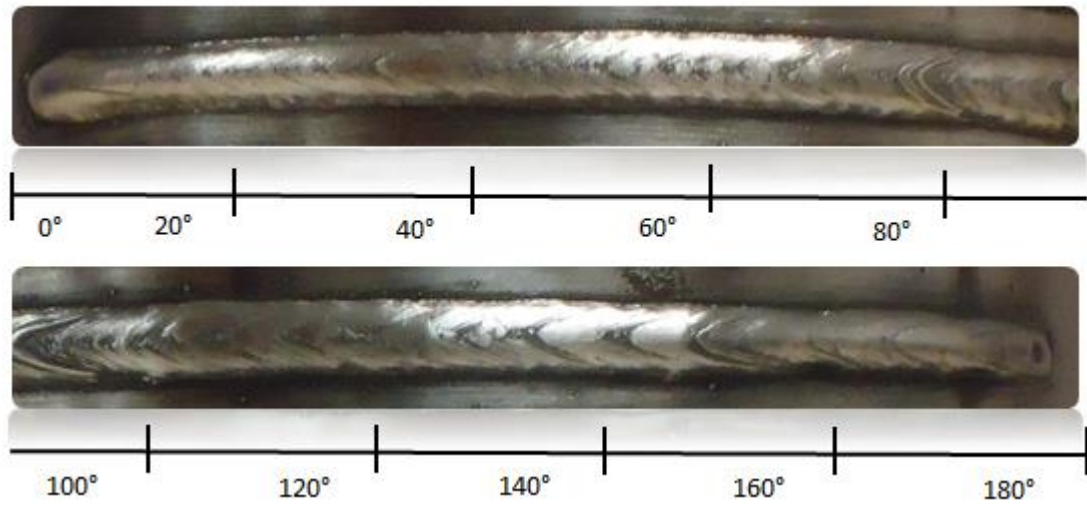


Figura 5.13: Visual da solda B5 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.10: Índices de estabilidade para cada secção da solda B5

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0100	4,6032 e-04	0,0037	4,0601e -05	0,0570	72,8928	27,2162	0,0137
$20^\circ - 40^\circ$	0,0075	2,8082 e-04	0,0035	3,5316e -05	0,0475	90,7678	32,1079	0,0110
$40^\circ - 60^\circ$	0,0060	1,5142 e-04	0,0035	3,8202e -05	0,0361	105,1477	37,1850	0,0095
$60^\circ - 80^\circ$	0,0061	1,5704 e-04	0,0038	4,4087e -05	0,0372	100,3995	38,6395	0,0100
$80^\circ - 100^\circ$	0,0063	2,0611 e-04	0,0042	9,1080e -05	0,0544	95,2079	39,8921	0,0105
$100^\circ - 120^\circ$	0,0075	3,0924 e-04	0,0047	1,4296e -04	0,0718	82,1825	38,6532	0,0122
$120^\circ - 140^\circ$	0,0062	1,5417 e-04	0,0038	4,3984e -05	0,0365	100,0803	37,8224	0,0100
$140^\circ - 160^\circ$	0,0084	4,1859 e-04	0,0039	8,2044e -05	0,0704	80,7077	31,8326	0,0124
$160^\circ - 180^\circ$	0,0108	5,2266 e-04	0,0040	6,5437e -05	0,0647	67,4973	26,9157	0,0148

Parâmetros da solda B6: $V = 19 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

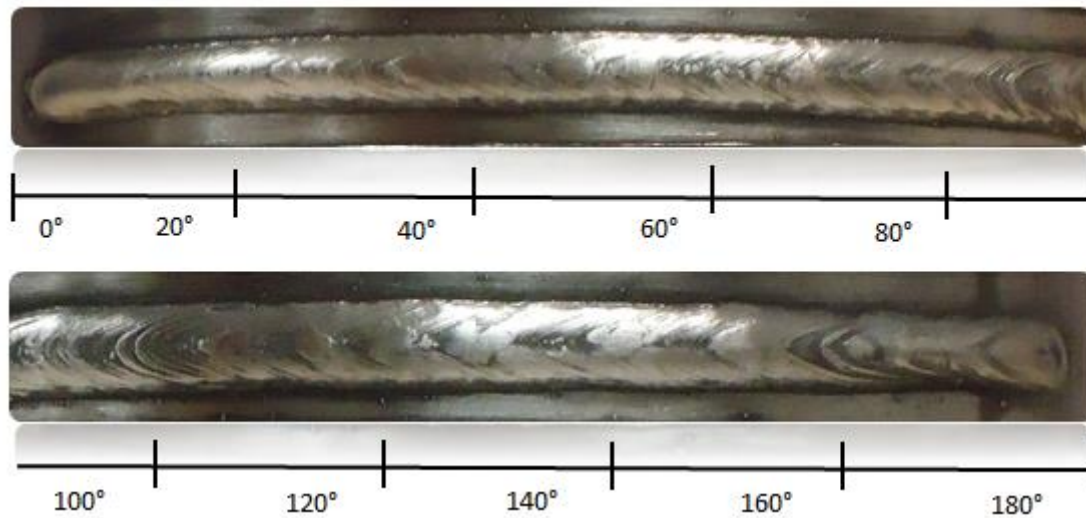


Figura 5.14: Visual da solda B6 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.11: Índices de estabilidade para cada secção da solda B6

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0093	3,9687 e-04	0,0036	3,7875e -05	0,0534	77,8615	27,7424	0,0128
$20^\circ - 40^\circ$	0,0072	2,6899 e-04	0,0035	3,2821e -05	0,0470	93,8843	32,8418	0,0107
$40^\circ - 60^\circ$	0,0064	1,7364 e-04	0,0036	3,5863e -05	0,0374	100,8143	35,8403	0,0099
$60^\circ - 80^\circ$	0,0062	1,8021 e-04	0,0038	5,2661e -05	0,0430	100,3089	37,9238	0,0100
$80^\circ - 100^\circ$	0,0068	2,2618 e-04	0,0042	1,1330e -04	0,0600	90,6638	38,4947	0,0110
$100^\circ - 120^\circ$	0,0068	2,1968 e-04	0,0044	1,0386e -04	0,0560	89,3789	39,0176	0,0112
$120^\circ - 140^\circ$	0,0068	1,9024 e-04	0,0039	4,9721e -05	0,0408	93,4650	36,9011	0,0107
$140^\circ - 160^\circ$	0,0075	2,7793 e-04	0,0038	4,1200e -05	0,0477	88,2518	33,5357	0,0113
$160^\circ - 180^\circ$	0,0156	0,0014	0,0052	3,2588e -04	0,1537	47,8585	25,1174	0,0209

Parâmetros da solda B7: $V = 20 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$.

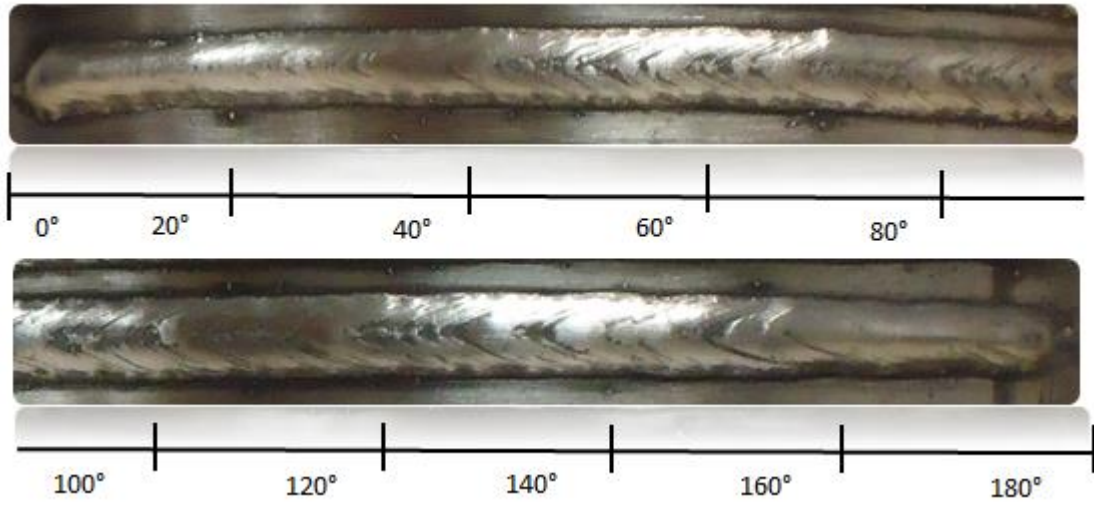


Figura 5.15: Visual da solda B7 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.12: Índices de estabilidade para cada secção da solda B7

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0157	8,1160 e-04	0,0041	6,6488e -05	0,0677	50,3623	20,8408	0,0199
$20^\circ - 40^\circ$	0,0099	4,5114 e-04	0,0037	4,5932e -05	0,0579	73,4051	27,2426	0,0136
$40^\circ - 60^\circ$	0,0079	3,1012 e-04	0,0037	3,8465e -05	0,0496	86,2438	31,4901	0,0116
$60^\circ - 80^\circ$	0,0071	2,3431 e-04	0,0038	5,6274e -05	0,0476	91,2652	35,0273	0,0110
$80^\circ - 100^\circ$	0,0069	2,2911 e-04	0,0038	4,1346e -05	0,0440	93,2779	35,3619	0,0107
$100^\circ - 120^\circ$	0,0077	2,9257 e-04	0,0037	4,9913e -05	0,0512	87,3087	32,3568	0,0115
$120^\circ - 140^\circ$	0,0079	3,0033 e-04	0,0039	5,4465e -05	0,0520	84,8016	32,7221	0,0118
$140^\circ - 160^\circ$	0,0107	5,6879 e-04	0,0038	5,5473e -05	0,0676	68,8264	26,3868	0,0145
$160^\circ - 180^\circ$	0,0170	9,6876 e-04	0,0041	5,0455e -05	0,0693	47,3919	19,3234	0,0211

Parâmetros da solda B8: $V = 20 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

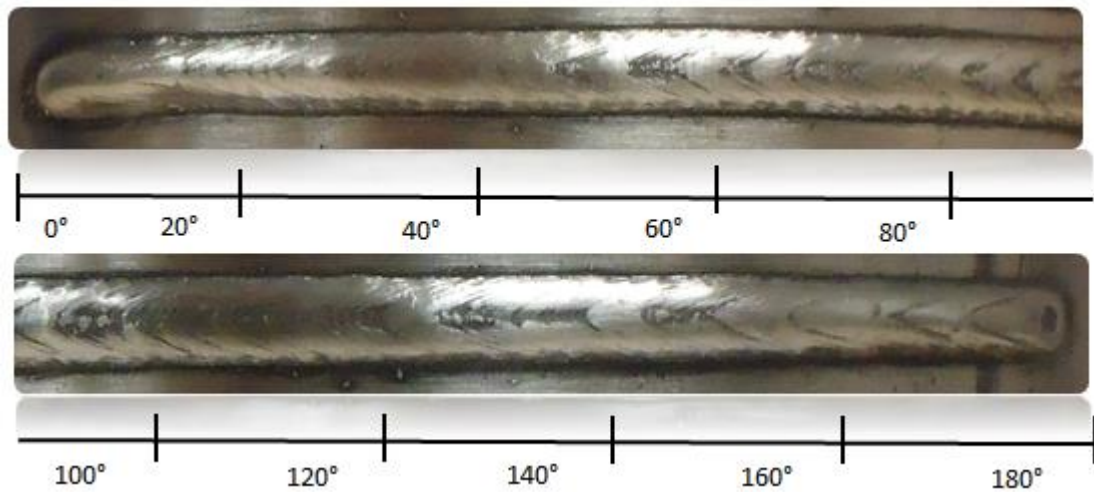


Figura 5.16: Visual da solda B8 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.13: Índices de estabilidade para cada secção da solda B8

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0124	6,1703 e-04	0,0039	4,6865e -05	0,0617	61,3100	23,8309	0,0163
$20^\circ - 40^\circ$	0,0090	3,7538 e-04	0,0036	4,1510e -05	0,0531	79,2468	28,3213	0,0126
$40^\circ - 60^\circ$	0,0080	3,0735 e-04	0,0037	3,3957e -05	0,0476	85,5719	31,2908	0,0117
$60^\circ - 80^\circ$	0,0078	2,8186 e-04	0,0038	4,5066e -05	0,0483	86,7978	32,6516	0,0115
$80^\circ - 100^\circ$	0,0072	2,2697 e-04	0,0038	4,4085e -05	0,0430	90,7511	34,5342	0,0110
$100^\circ - 120^\circ$	0,0075	2,6658 e-04	0,0040	5,5507e -05	0,0496	87,1724	34,9416	0,0115
$120^\circ - 140^\circ$	0,0085	3,1514 e-04	0,0039	4,0656e -05	0,0478	81,2435	31,3465	0,0123
$140^\circ - 160^\circ$	0,0135	6,1176 e-04	0,0038	3,8556e -05	0,0557	58,0860	21,8713	0,0172
$160^\circ - 180^\circ$	0,0187	9,1332 e-04	0,0041	4,1063e -05	0,0590	43,9970	17,8643	0,0227

Parâmetros da solda B9: $V = 20 \text{ V}$, $v_{ar} = 6,0 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

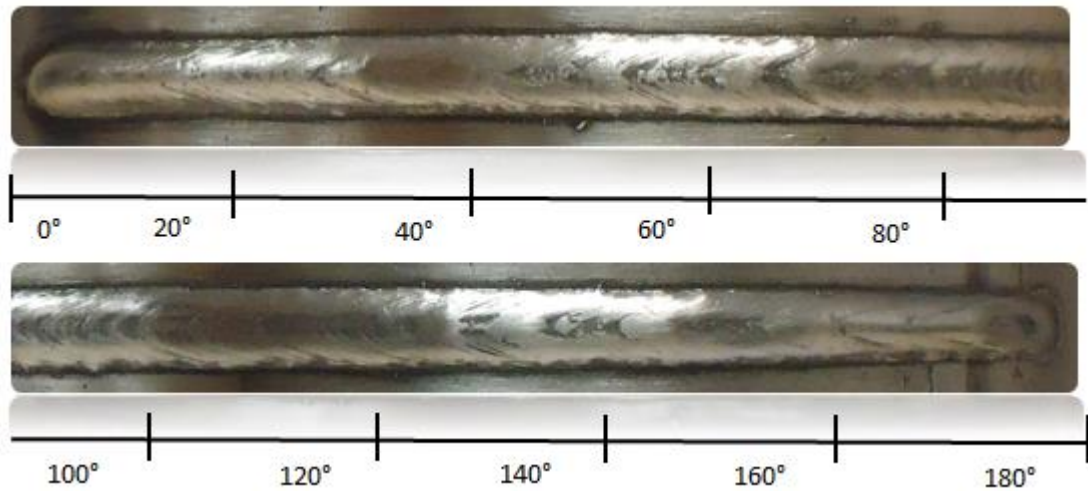


Figura 5.17: Visual da solda B9 ao longo do tubo (0° - 180°).

Tabela 5.14: Índices de estabilidade para cada secção da solda B9

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	$\sigma_{t_{ab}}$	t_{cc} [s]	$\sigma_{t_{cc}}$	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0° - 20°	0,0123	5,5713 e-04	0,0038	4,2753e -05	0,0566	62,1279	23,7394	0,0161
20° - 40°	0,0086	3,4066 e-04	0,0036	4,3695e -05	0,0514	81,4669	29,5752	0,0123
40° - 60°	0,0075	2,2631 e-04	0,0037	3,8555e -05	0,0407	89,5011	33,2149	0,0112
60° - 80°	0,0069	1,8380 e-04	0,0038	4,2427e -05	0,0378	93,3897	35,4220	0,0107
80° - 100°	0,0068	1,7480 e-04	0,0039	4,1818e -05	0,0362	92,9220	36,5525	0,0108
100° - 120°	0,0072	2,2156 e-04	0,0039	4,9641e -05	0,0433	89,5394	35,3315	0,0112
120° - 140°	0,0082	2,8804 e-04	0,0041	6,2012e -05	0,0503	81,3209	33,3318	0,0123
140° - 160°	0,0116	5,3009 e-04	0,0040	4,6365e -05	0,0576	64,4399	25,5612	0,0155
160° - 180°	0,0193	6,5905 e-04	0,0041	3,7657e -05	0,0433	42,6775	17,4358	0,0234

Parâmetros da solda B10: $V = 18 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$.

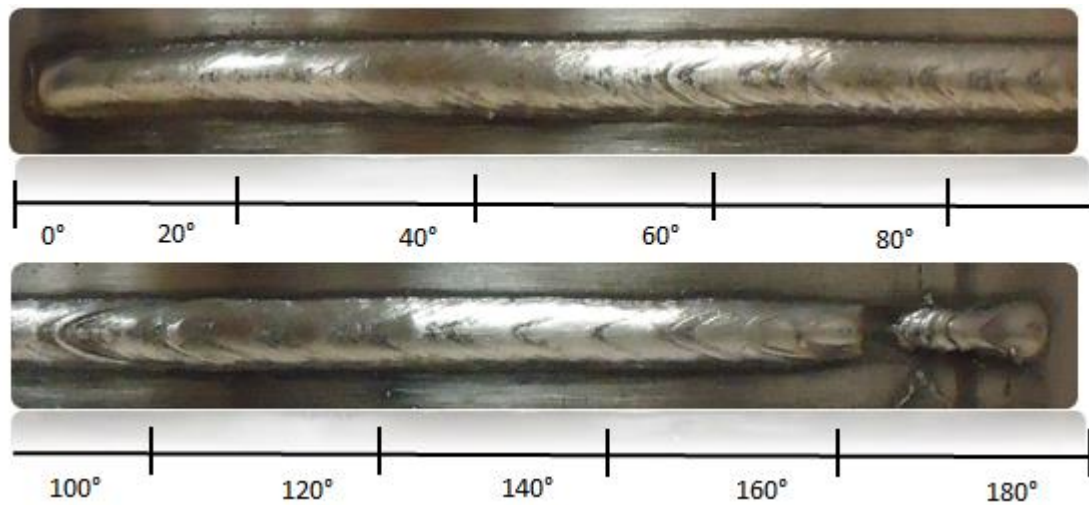


Figura 5.18: Visual da solda B10 ao longo do tubo (0° - 180°).

Tabela 5.15: Índices de estabilidade para cada secção da solda B10

φ (°)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0°-20°	0,0107	2,6252 e-04	0,0034	2,6402e -05	0,0323	70,9916	24,3907	0,0141
20°-40°	0,0078	2,8188 e-04	0,0034	2,3317e -05	0,0431	89,4447	30,5209	0,0112
40°-60°	0,0068	2,7534 e-04	0,0035	4,1089e -05	0,0520	96,6756	34,0281	0,0103
60°-80°	0,0058	1,9021 e-04	0,0034	2,7593e -05	0,0406	107,9205	37,0066	0,0093
80°-100°	0,0061	2,0638 e-04	0,0037	5,4081e -05	0,0484	102,1007	37,2946	0,0098
100°-120°	0,0069	2,7146 e-04	0,0039	8,4895e -05	0,0612	92,7610	36,3659	0,0108
120°-140°	0,0067	2,4729 e-04	0,0034	3,1427e -05	0,0461	98,7214	34,0072	0,0101
140°-160°	0,0109	3,1771 e-04	0,0037	5,7203e -05	0,0447	68,6580	25,4478	0,0146
160°-180°	0,0291	0,0058	0,0095	0,0015	0,3621	25,9368	24,5601	0,0386

Parâmetros da solda B11: $V = 18 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

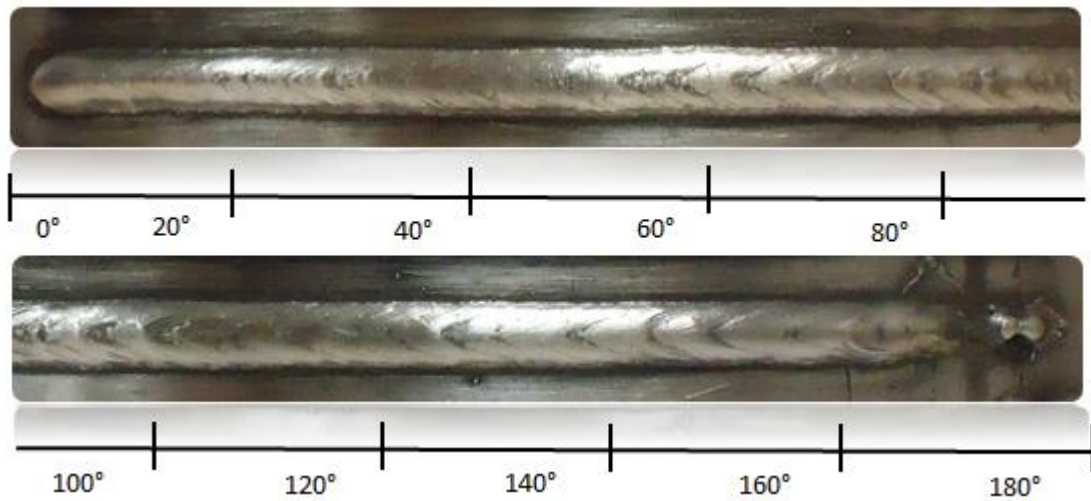


Figura 5.19: Visual da solda B11 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.16: Índices de estabilidade para cada secção da solda B11

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0092	2,7873 e-04	0,0033	2,2496e -05	0,0372	80,1016	26,6717	0,0125
$20^\circ - 40^\circ$	0,0075	2,5939 e-04	0,0034	2,9528e -05	0,0431	91,4813	31,1889	0,0109
$40^\circ - 60^\circ$	0,0058	1,6462 e-04	0,0034	2,8124e -05	0,0369	109,5099	36,9419	0,0091
$60^\circ - 80^\circ$	0,0060	1,8462 e-04	0,0035	4,1160e -05	0,0426	105,3669	37,1771	0,0095
$80^\circ - 100^\circ$	0,0061	2,0399 e-04	0,0037	5,1017e -05	0,0474	102,3332	37,9741	0,0098
$100^\circ - 120^\circ$	0,0062	1,9789 e-04	0,0035	3,3767e -05	0,0418	103,7312	36,1637	0,0096
$120^\circ - 140^\circ$	0,0067	2,4326 e-04	0,0035	3,2300e -05	0,0457	98,4491	34,3579	0,0102
$140^\circ - 160^\circ$	0,0091	2,8923 e-04	0,0036	3,9753e -05	0,0429	78,8483	28,5206	0,0127
$160^\circ - 180^\circ$	0,0255	0,0038	0,0072	8,6078e -04	0,2678	30,5765	21,9819	0,0327

Parâmetros da solda B12: $V = 18 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

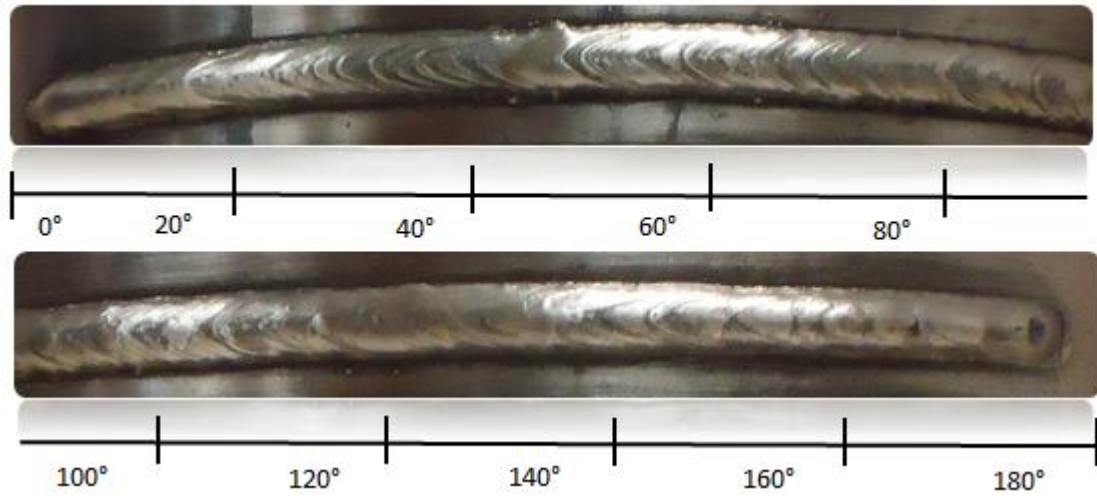


Figura 5.20: Visual da solda B12 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.17: Índices de estabilidade para cada secção da solda B12

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0085	3,0748 e-04	0,0033	2,6486e -05	0,0442	84,7376	28,2105	0,0118
$20^\circ - 40^\circ$	0,0099	3,7116 e-04	0,0043	1,5522e -04	0,0736	70,3489	30,1855	0,0142
$40^\circ - 60^\circ$	0,0073	3,4999 e-04	0,0042	1,2670e -04	0,0774	86,2258	36,6266	0,0116
$60^\circ - 80^\circ$	0,0064	2,5518 e-04	0,0037	5,9488e -05	0,0559	98,8497	36,6133	0,0101
$80^\circ - 100^\circ$	0,0065	2,2012 e-04	0,0039	6,0538e -05	0,0494	96,2039	37,1809	0,0104
$100^\circ - 120^\circ$	0,0060	1,7212 e-04	0,0036	4,0462e -05	0,0399	104,1352	37,2573	0,0096
$120^\circ - 140^\circ$	0,0064	2,2474 e-04	0,0037	4,6351e -05	0,0475	98,8746	36,2722	0,0101
$140^\circ - 160^\circ$	0,0073	2,8795 e-04	0,0038	7,3510e -05	0,0586	89,7877	34,0240	0,0111
$160^\circ - 180^\circ$	0,0099	2,7604 e-04	0,0035	2,6570e -05	0,0354	74,3972	26,1043	0,0134

Parâmetros da solda B13: $V = 18,5 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$.

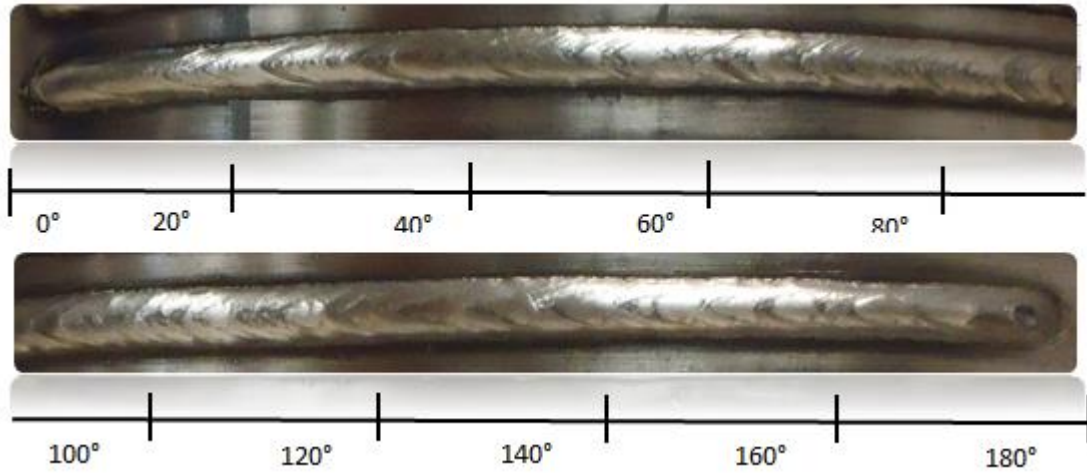


Figura 5.21: Visual da solda B13 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.18: Índices de estabilidade para cada secção da solda B13

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0100	4,4676 e-04	0,0035	3,7012e -05	0,0554	74,2955	25,9522	0,0135
$20^\circ - 40^\circ$	0,0084	3,8128 e-04	0,0035	3,9313e -05	0,0568	84,4408	29,2002	0,0118
$40^\circ - 60^\circ$	0,0072	3,0557 e-04	0,0035	3,9857e -05	0,0538	93,2869	33,0818	0,0107
$60^\circ - 80^\circ$	0,0061	2,1841 e-04	0,0034	3,5618e -05	0,0461	104,9195	35,7998	0,0095
$80^\circ - 100^\circ$	0,0066	2,5892 e-04	0,0036	3,4989e -05	0,0488	97,8643	34,9588	0,0102
$100^\circ - 120^\circ$	0,0066	2,4492 e-04	0,0036	4,1840e -05	0,0490	98,5877	35,2944	0,0101
$120^\circ - 140^\circ$	0,0064	2,3161 e-04	0,0036	3,6884e -05	0,0463	99,9312	35,7795	0,0100
$140^\circ - 160^\circ$	0,0091	3,5813 e-04	0,0037	3,5922e -05	0,0492	78,1714	29,1717	0,0128
$160^\circ - 180^\circ$	0,0120	4,2708 e-04	0,0037	3,1050e -05	0,0440	63,7932	23,3451	0,0157

Parâmetros da solda B14: $V = 18,5 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

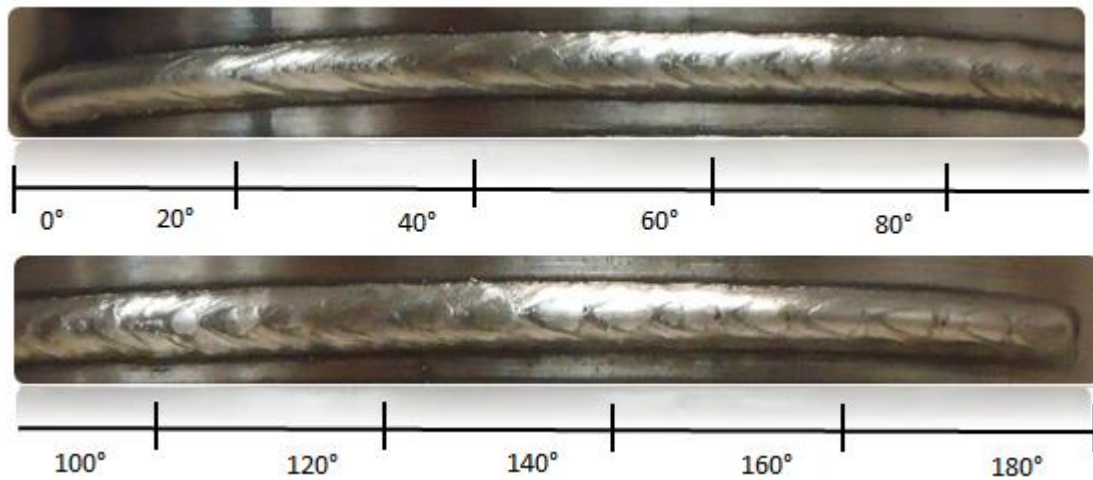


Figura 5.22: Visual da solda B14 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.19: Índices de estabilidade para cada secção da solda B14

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0097	3,7605 e-04	0,0034	2,5473e -05	0,0460	75,9241	26,0004	0,0132
$20^\circ - 40^\circ$	0,0076	2,8433 e-04	0,0034	3,2349e -05	0,0467	90,3887	31,0151	0,0111
$40^\circ - 60^\circ$	0,0069	2,5407 e-04	0,0034	3,1402e -05	0,0463	97,4490	33,1900	0,0103
$60^\circ - 80^\circ$	0,0063	2,0105 e-04	0,0035	2,7684e -05	0,0398	101,9714	35,5749	0,0098
$80^\circ - 100^\circ$	0,0064	2,0384 e-04	0,0035	3,8026e -05	0,0429	101,2168	35,6728	0,0099
$100^\circ - 120^\circ$	0,0058	1,6467 e-04	0,0035	2,9332e -05	0,0365	106,7273	37,8132	0,0094
$120^\circ - 140^\circ$	0,0068	2,3937 e-04	0,0036	3,7848e -05	0,0457	96,1026	34,6650	0,0104
$140^\circ - 160^\circ$	0,0106	3,9078 e-04	0,0037	2,9290e -05	0,0449	70,1342	25,9847	0,0143
$160^\circ - 180^\circ$	0,0130	3,6275 e-04	0,0036	3,2751e -05	0,0371	60,4154	21,6941	0,0166

Parâmetros da solda B15: $V = 18,5 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

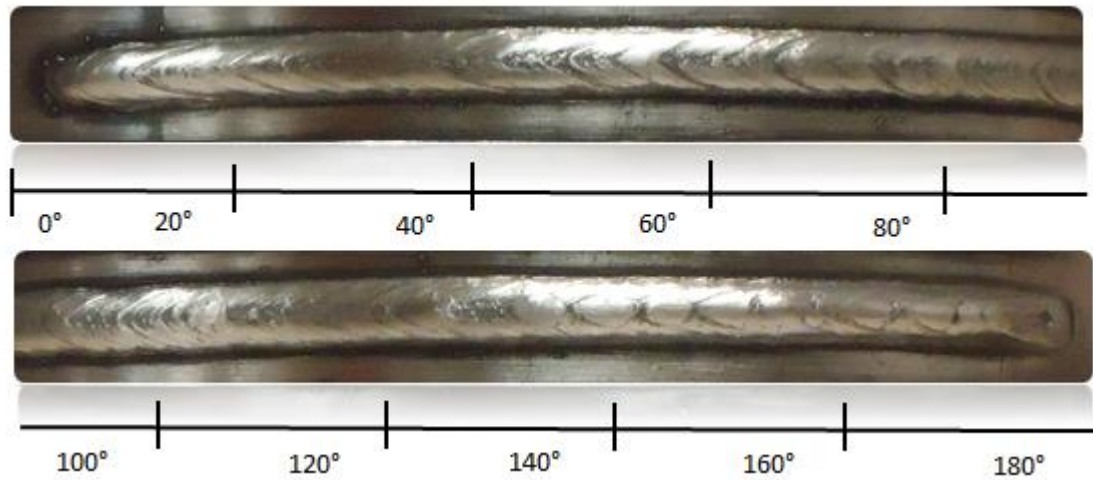


Figura 5.23: Visual da solda B15 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.20: Índices de estabilidade para cada secção da solda B15

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0082	3,3627 e-04	0,0034	2,6889e -05	0,0491	86,5103	29,3589	0,0116
$20^\circ - 40^\circ$	0,0066	2,3113 e-04	0,0035	2,8919e -05	0,0433	98,9984	34,5626	0,0101
$40^\circ - 60^\circ$	0,0068	2,6422 e-04	0,0035	3,9525e -05	0,0500	96,8536	33,9543	0,0103
$60^\circ - 80^\circ$	0,0069	2,4827 e-04	0,0035	3,1596e -05	0,0448	95,7163	33,7151	0,0104
$80^\circ - 100^\circ$	0,0067	2,0776 e-04	0,0036	3,7268e -05	0,0412	96,6354	34,9145	0,0103
$100^\circ - 120^\circ$	0,0066	2,2052 e-04	0,0036	3,2818e -05	0,0426	98,1077	35,4306	0,0102
$120^\circ - 140^\circ$	0,0077	2,9169 e-04	0,0036	3,2045e -05	0,0467	88,2905	31,9317	0,0113
$140^\circ - 160^\circ$	0,0113	2,9073 e-04	0,0036	3,1808e -05	0,0346	67,1286	24,0544	0,0149
$160^\circ - 180^\circ$	0,0135	3,2431 e-04	0,0037	2,7513e -05	0,0315	58,1099	21,3238	0,0172

Parâmetros da solda B16: $V = 19 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$.

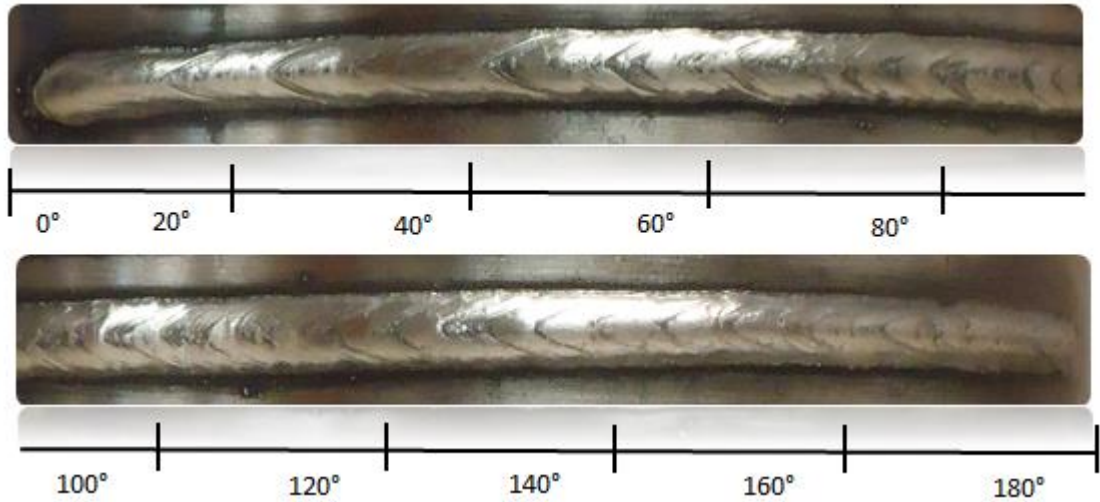


Figura 5.24: Visual da solda B16 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.21: Índices de estabilidade para cada secção da solda B16

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0133	5,1262 e-04	0,0035	2,8982e -05	0,0467	59,3716	20,7870	0,0168
$20^\circ - 40^\circ$	0,0097	4,0104 e-04	0,0036	3,6399e -05	0,0512	74,8244	27,1472	0,0134
$40^\circ - 60^\circ$	0,0075	2,8518 e-04	0,0035	3,6764e -05	0,0487	91,0927	32,0521	0,0110
$60^\circ - 80^\circ$	0,0067	2,3568 e-04	0,0036	3,1935e -05	0,0439	96,8268	34,9222	0,0103
$80^\circ - 100^\circ$	0,0078	2,9228 e-04	0,0036	3,0564e -05	0,0459	87,7301	31,3657	0,0114
$100^\circ - 120^\circ$	0,0084	3,4844 e-04	0,0036	3,8600e -05	0,0522	83,2836	30,1903	0,0120
$120^\circ - 140^\circ$	0,0122	4,4916 e-04	0,0038	3,1341e -05	0,0451	62,5905	23,4999	0,0160
$140^\circ - 160^\circ$	0,0156	6,1468 e-04	0,0038	4,4373e -05	0,0512	51,6989	19,4576	0,0193
$160^\circ - 180^\circ$	0,0183	9,5745 e-04	0,0038	4,4864e -05	0,0642	45,2826	17,2631	0,0221

Parâmetros da solda B17: $V = 19 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

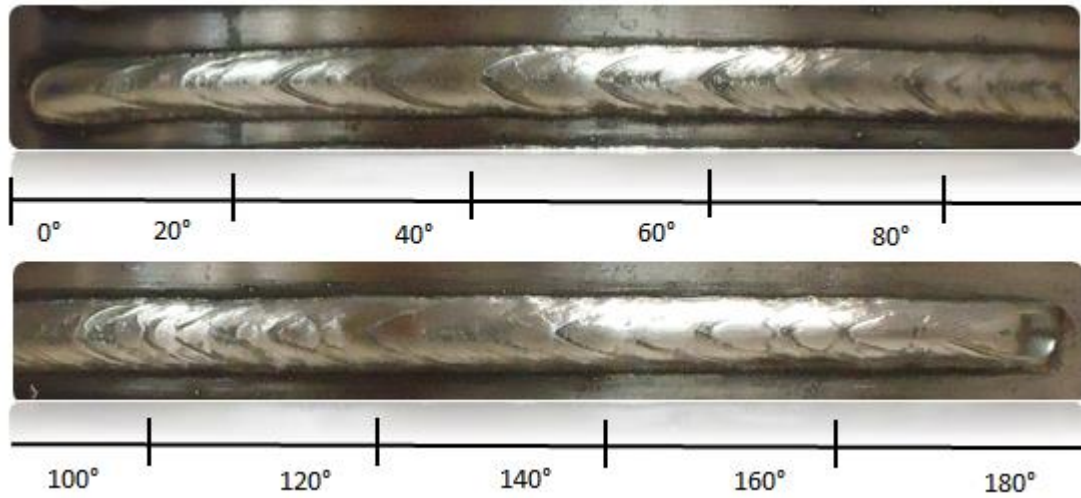


Figura 5.25: Visual da solda B17 ao longo do tubo (0°- 180°).

Tabela 5.22: Índices de estabilidade para cada secção da solda B17

φ (°)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0°-20°	0,0116	5,0173 e-04	0,0035	3,1508e -05	0,0522	66,2078	22,9126	0,0151
20°-40°	0,0092	4,2464 e-04	0,0036	3,9103e -05	0,0572	78,3949	27,8825	0,0128
40°-60°	0,0078	3,6086 e-04	0,0035	3,5130e -05	0,0560	87,9687	31,0090	0,0114
60°-80°	0,0068	2,6558 e-04	0,0036	3,5913e -05	0,0491	96,4104	34,4740	0,0104
80°-100°	0,0070	2,7503 e-04	0,0036	4,2062e -05	0,0511	94,5572	33,9529	0,0106
100°-120°	0,0070	2,7497 e-04	0,0036	4,0911e -05	0,0508	94,4434	34,2849	0,0106
120°-140°	0,0070	2,6958 e-04	0,0037	3,3138e -05	0,0475	93,6207	34,4820	0,0107
140°-160°	0,0108	4,5882 e-04	0,0037	4,2264e -05	0,0541	69,1802	25,6046	0,0145
160°-180°	0,0133	5,3011 e-04	0,0037	3,6057e -05	0,0498	59,0593	21,7043	0,0169

Parâmetros da solda B18: $V = 19 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

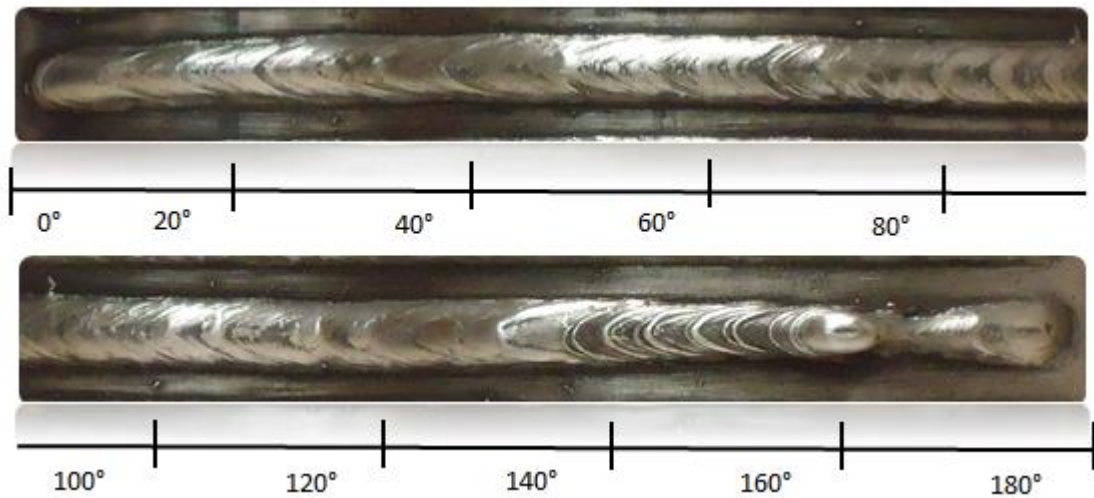


Figura 5.26: Visual da solda B18 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.23: Índices de estabilidade para cada secção da solda B18

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0100	4,0943 e-04	0,0035	3,2867e -05	0,0505	74,3276	25,8554	0,0135
$20^\circ - 40^\circ$	0,0086	3,7105 e-04	0,0036	3,6581e -05	0,0534	82,1491	29,4598	0,0122
$40^\circ - 60^\circ$	0,0074	3,0116 e-04	0,0035	3,2449e -05	0,0497	91,2783	32,0878	0,0110
$60^\circ - 80^\circ$	0,0084	4,0200 e-04	0,0038	5,9240e -05	0,0635	81,9181	31,4565	0,0122
$80^\circ - 100^\circ$	0,0073	2,9354 e-04	0,0036	3,5704e -05	0,0500	91,5803	32,8429	0,0109
$100^\circ - 120^\circ$	0,0077	3,1438 e-04	0,0036	3,6680e -05	0,0507	87,9090	31,9348	0,0114
$120^\circ - 140^\circ$	0,0081	2,9699 e-04	0,0035	2,7998e -05	0,0445	85,8281	30,3767	0,0117
$140^\circ - 160^\circ$	0,0232	0,0032	0,0053	4,1105e -04	0,2139	35,1240	18,6462	0,0285
$160^\circ - 180^\circ$	0,0265	0,0038	0,0061	5,6306e -04	0,2343	30,6840	18,7096	0,0326

Parâmetros da solda B19: $V = 20 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 14 \text{ mm/s}$.

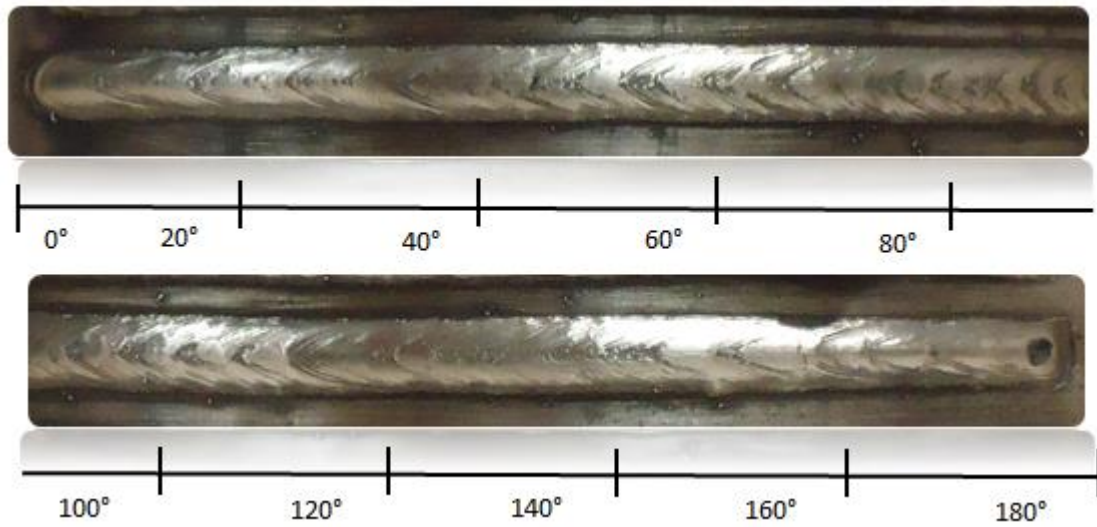


Figura 5.27: Visual da solda B19 ao longo do tubo (0° - 180°).

Tabela 5.24: Índices de estabilidade para cada secção da solda B19

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0° - 20°	0,0184	8,3105 e-04	0,0038	3,6987e -05	0,0551	45,1868	16,9676	0,0221
20° - 40°	0,0159	6,9277 e-04	0,0038	3,8429e -05	0,0536	50,7179	19,4366	0,0197
40° - 60°	0,0106	5,4442 e-04	0,0038	5,0514e -05	0,0648	69,5319	26,6346	0,0144
60° - 80°	0,0094	4,8885 e-04	0,0037	4,2924e -05	0,0635	76,0691	28,4951	0,0131
80° - 100°	0,0091	3,9428 e-04	0,0039	4,5917e -05	0,0554	77,3998	29,9382	0,0129
100° - 120°	0,0087	3,6369 e-04	0,0038	3,9700e -05	0,0521	79,7739	30,2157	0,0125
120° - 140°	0,0100	5,2297 e-04	0,0037	4,6558e -05	0,0648	72,8742	27,1013	0,0137
140° - 160°	0,0149	7,1444 e-04	0,0040	4,1615e -05	0,0586	53,1271	21,0966	0,0188
160° - 180°	0,0183	0,0010	0,0039	3,7633e -05	0,0650	45,1600	17,5120	0,0221

Parâmetros da solda B20: $V = 20 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 13 \text{ mm/s}$.

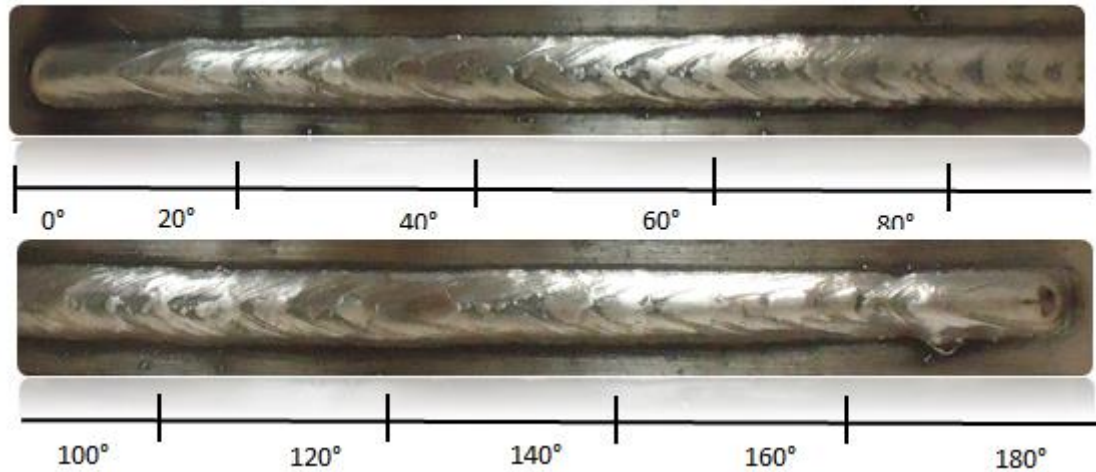


Figura 5.28: Visual da solda B20 ao longo do tubo (0° - 180°).

Tabela 5.25: Índices de estabilidade para cada secção da solda B20

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
0° - 20°	0,0168	7,0773 e-04	0,0037	3,7538e- 05	0,0523	48,7854	18,2723	0,0205
20° - 40°	0,0115	5,7132 e-04	0,0038	4,1666e- 05	0,0606	65,3867	24,5284	0,0153
40° - 60°	0,0099	5,1424 e-04	0,0038	5,7154e- 05	0,0669	72,9537	27,4886	0,0137
60° - 80°	0,0094	4,3759 e-04	0,0038	4,8243e- 05	0,0595	76,0879	28,7612	0,0131
80° - 100°	0,0085	3,5120 e-04	0,0038	4,5728e- 05	0,0535	81,4508	31,1574	0,0123
100° - 120°	0,0097	4,3385 e-04	0,0039	3,6850e- 05	0,0544	73,8812	28,5643	0,0135
120° - 140°	0,0101	4,9528 e-04	0,0039	4,2638e- 05	0,0600	71,5054	27,6065	0,0140
140° - 160°	0,0134	6,6381 e-04	0,0039	4,3403e- 05	0,0605	57,6423	22,5454	0,0173
160° - 180°	0,0223	0,0015	0,0040	6,0770e- 05	0,0812	37,9365	15,3159	0,0264

Parâmetros da solda B21: $V = 20 \text{ V}$, $v_{ar} = 5,5 \text{ m/min}$, $v_{sold} = 12 \text{ mm/s}$.

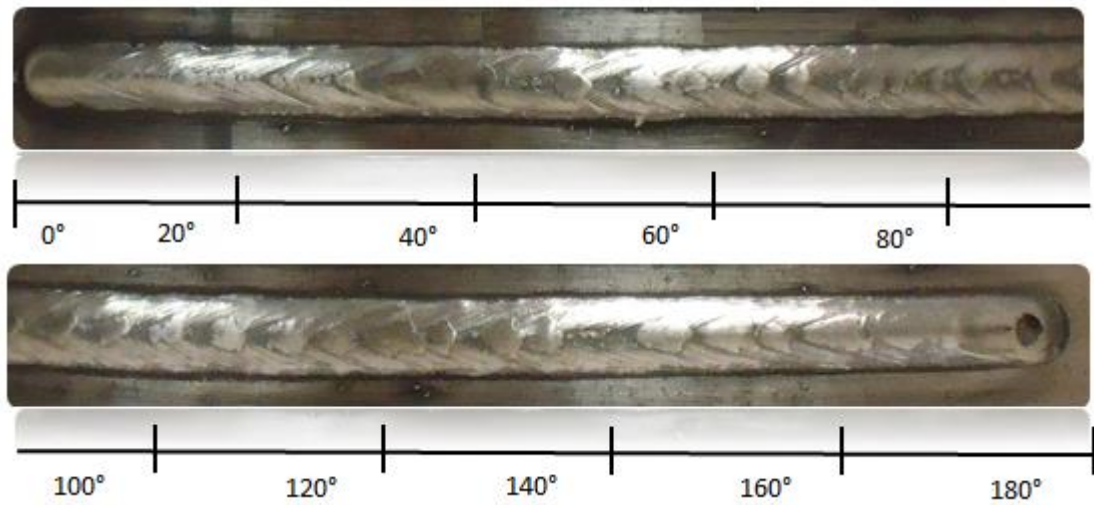


Figura 5.29: Visual da solda B21 ao longo do tubo ($0^\circ - 180^\circ$).

Tabela 5.26: Índices de estabilidade para cada secção da solda B21

φ ($^\circ$)	t_{ab} [s]	σt_{ab}	t_{cc} [s]	σt_{cc}	IV_{cc}	F_{cc} [Hz]	FL_T	T
$0^\circ - 20^\circ$	0,0142	6,0958 e-04	0,0037	3,7272e -05	0,0530	55,8525	20,8124	0,0179
$20^\circ - 40^\circ$	0,0116	5,1446 e-04	0,0038	4,3447e -05	0,0558	64,9786	24,7232	0,0154
$40^\circ - 60^\circ$	0,0091	4,0827 e-04	0,0038	4,6918e -05	0,0570	77,2868	29,3870	0,0129
$60^\circ - 80^\circ$	0,0088	3,9413 e-04	0,0038	4,1985e -05	0,0558	79,1813	30,4038	0,0126
$80^\circ - 100^\circ$	0,0087	3,5320 e-04	0,0038	4,6896e -05	0,0529	80,0137	30,1617	0,0125
$100^\circ - 120^\circ$	0,0081	2,9026 e-04	0,0039	3,4425e -05	0,0450	83,9438	32,3565	0,0119
$120^\circ - 140^\circ$	0,0103	4,5293 e-04	0,0040	4,6140e -05	0,0557	70,1833	27,9362	0,0142
$140^\circ - 160^\circ$	0,0147	5,1333 e-04	0,0041	3,8081e -05	0,0443	53,3523	21,7855	0,0187
$160^\circ - 180^\circ$	0,0165	6,4481 e-04	0,0040	3,7230e -05	0,0483	48,7305	19,6283	0,0205

Após a obtenção dos índices de estabilidade para cada seção da solda, plotou-se cada qual a fim de determinar seu padrão de comportamento. É importante destacar que a análise dos índices foi realizada em duas categorias, que dependem da velocidade de alimentação do arame com foram realizados os testes.

Inicialmente, tem-se a plotagem do índice IV_{cc} em função do ângulo de soldagem (φ), para as soldas (A2- B9) realizadas com v_{ar} de 6 m/min, conforme evidenciado na Figura 5.30, a seguir.

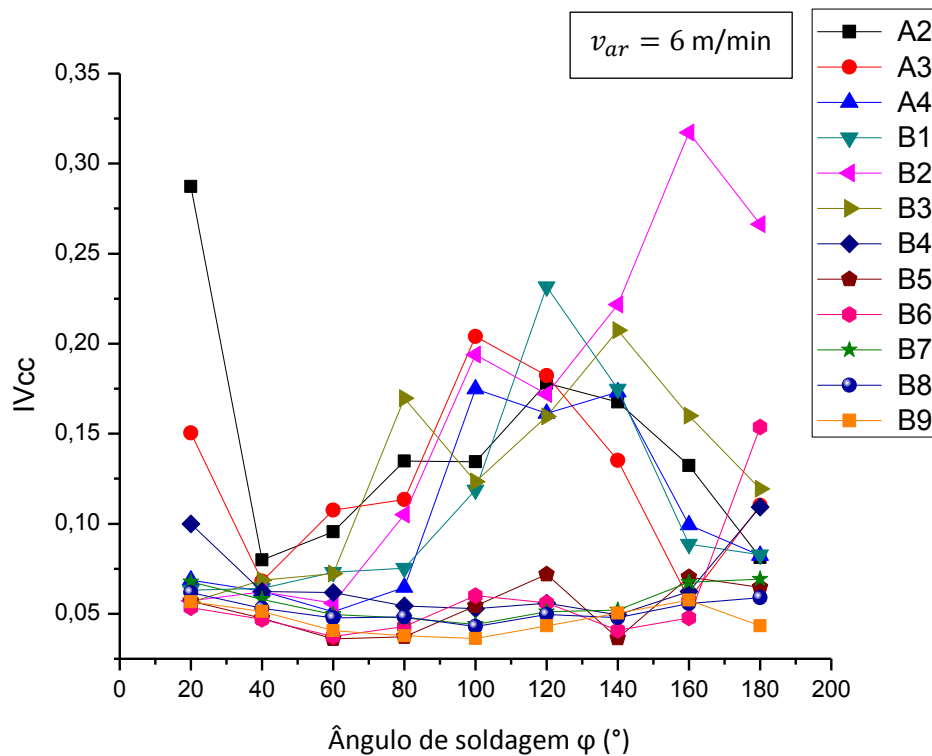


Figura 5.30: IV_{cc} em função do ângulo de soldagem para as soldas (A2 - B9).

Faz-se importante salientar que o índice IV_{cc} tem por base a premissa de que a estabilidade do processo de transferência metálica por curto-circuito está ligada à constância dos tempos em arco aberto e em curto-circuito, e que os valores mais baixos indicam maior estabilidade (Souza, 2010). Pode ser estabelecido com base na Figura 5.30, apresentada anteriormente, e que as soldas A2, A3, A4, B1, B2, e B3 podem ser descartadas, uma vez que a variação dos dados é maior em relação às soldaduras B4 –B9, além do fato de que os valores mais baixos indicam maior estabilidade, cuja qualidade é visivelmente bem sucedida nas soldas (B4, B5, B6, B7, B8 e B9). No entanto, também foi plotado o desvio-

padrão do índice (σIV_{cc}) para cada uma das soldas neste grupo, a fim de ter uma visão conforme a realidade, para interpretação dos dados.

A Figura 5.31, a seguir, apresenta o desvio-padrão do índice de regularidade (σIV_{cc}) em relação à tensão de soldagem. Nesta, é possível notar a análise se destina a estabelecer o grau de variação do índice de uma solda em respeito às outras. No entanto, mantêm-se a convenção de cor para identificar cada experimento.

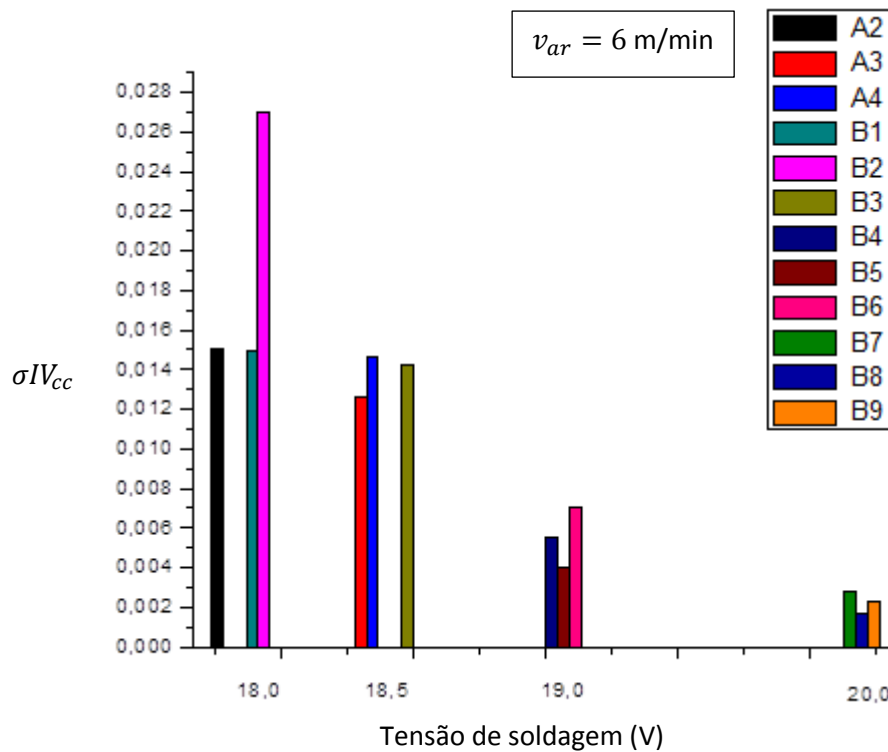


Figura 5.31: Desvio padrão σIV_{cc} em fusão da tensão de soldagem das soldas (A2-B9).

Conforme a figura apresentada anteriormente, é possível verificar que a hipótese proposta inicialmente para descartar Soldas A2 - B3 é suportada pelos resultados do desvio padrão do índice de regularidade IV_{cc} , o que indica que houve uma dispersão maior dos dados em tais soldas.

Por enquanto e de acordo com os resultados obtidos, as soldas que se qualificam para a escolha dos parâmetros que produzem melhores resultados em termos de estabilidade são (B4 – B9). No entanto, faz-se importante continuar a análise dos outros índices escolhidos.

Na frequência de curto-circuito (F_{cc}) acredita-se que quanto maior é o número de curtos-circuitos, o processo torna-se mais estável (Adolfsson *et al.*, 1999). Mesmo assim, alguns

autores observam que a estabilidade máxima do processo é gerada quando o desvio padrão da frequência de curto-circuito é mínimo (Hermans e Ouden, 1999), (Dobignies, 2008). Assim, tem-se a seguir a apresentação dos gráficos para a frequência de curto-circuito (F_{cc}) e o desvio padrão da frequência de curto-circuito (σF_{cc}) para o grupo de soldas (A2 – B9) nas Figuras 5.32 e 5.33, respectivamente.

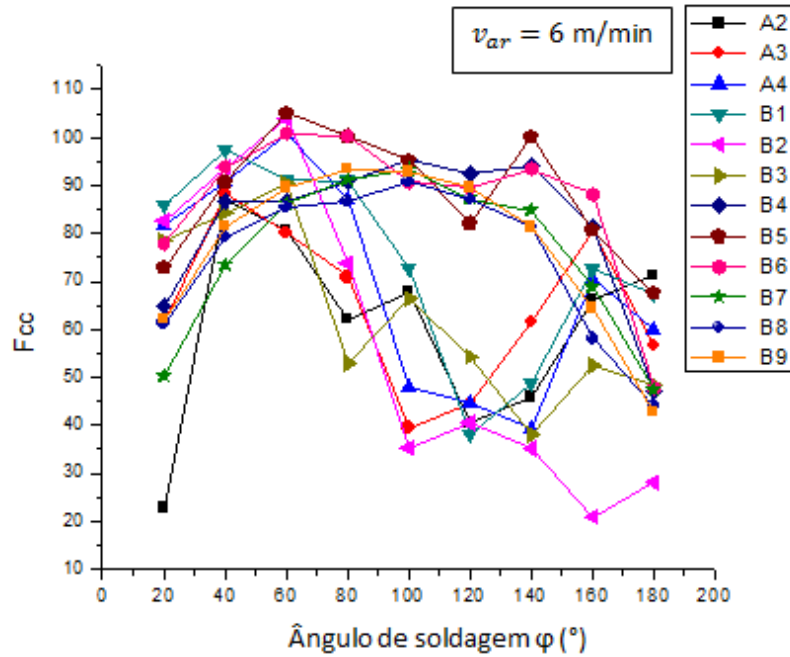


Figura 5.32: F_{cc} em função do ângulo de soldagem para as soldas (A2 - B9).

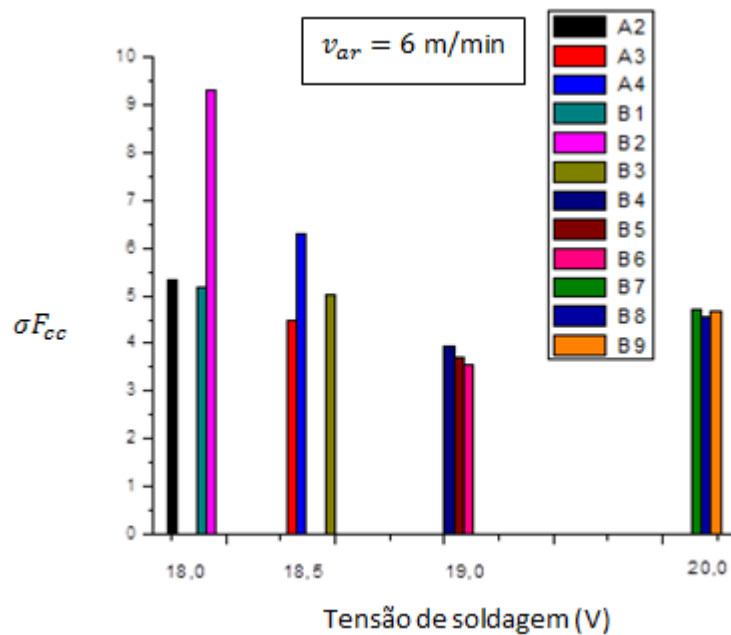


Figura 5.33: Desvio padrão σF_{cc} em função da tensão de soldagem das soldas (A2-B9).

Considerando-se a premissa levantada inicialmente, é possível observar na Figura 5.32 que a maior quantidade de curtos-circuitos ocorre nas soldas (B4 - B9), o que poderia indicar que o processo exibe um comportamento mais estável, de acordo com os parâmetros com que as soldas foram feitas, descartando, por este índice, novamente as soldas (A2 - B3). A Figura 5.33 destaca que o desvio-padrão atinge os seus valores mínimos coincidentemente para o grupo de soldas (B4 - B9), suportando a hipótese inicialmente proposta e confirmando os resultados obtidos por Hermans e Ouden (1999), onde se sustenta que o desvio padrão da frequência de curto-circuito atinge um valor mínimo para o qual o pico da frequência é mais pronunciado.

Do mesmo modo, o gráfico que mostra a frequência de curtos-circuitos em função do ângulo de soldagem (vide Figura 5.32) permite observar que as soldas que foram classificadas como estáveis através deste parâmetro, seguem um padrão de comportamento que tenta replicar o trajeto do tubo, indicando, assim, que a área mais crítica para o processo é a vertical descendente, uma vez que requer o aumento do número de curtos-circuitos para compensar os fenômenos físicos que atuam mais fortemente sobre a gota nesta zona.

Outro índice escolhido para estudar a estabilidade da transferência metálica foi o fator Lis (FL_T), que indica a simetria dos períodos de transferência entre curtos-circuitos consecutivos. A figura 5.34, a seguir, evidencia a relação entre o fator em questão, com ângulo de soldagem (ϕ), onde é possível observar que no início, o fator apresenta um nível baixo, e, na medida em que acrescenta o ângulo de soldagem, o fator também aumenta gradativamente, até atingir o seu máximo pico, no mais crítico da solda (em torno de 90°-100°), e, em seguida, começa a decair na última etapa da solda.

Tal comportamento era esperado, uma vez que na posição vertical descendente, o número de curtos-circuitos incrementa e, assim, sua frequência de ocorrência. Por conseguinte, os tempos de arco e curto-circuito diminuem, produzindo curtos períodos de formação e transferência de gota, o que se reflete no aumento do índice em questão. Ao deixar a zona, isto é, quando o processo de soldadura está sendo realizado nas posições plana e sobre cabeça, os períodos de arco curto-circuito têm maior duração, o que significa que os valores do fator são mais baixos.

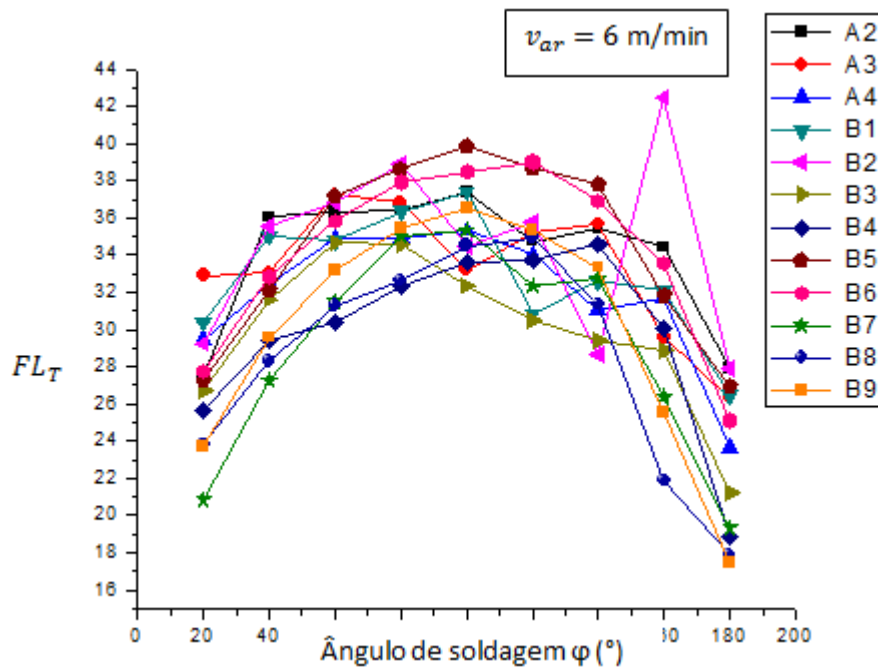


Figura 5.34: FL_T em função do ângulo de soldagem para as soldas (A2 - B9).

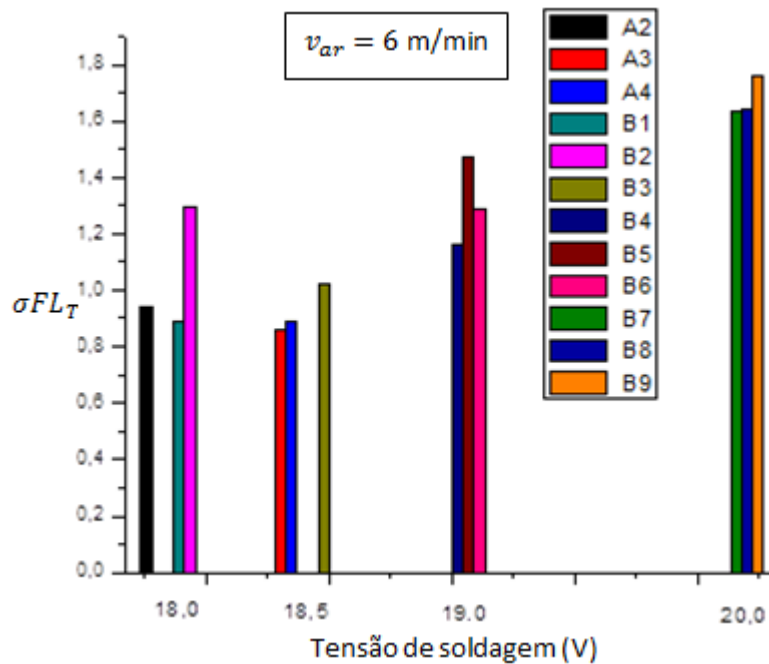


Figura 5.35: Desvio padrão σFL_T em função da tensão de soldagem das soldas (A2-B9).

Seguindo a premissa apresentada anteriormente, as soldas que apresentam o comportamento esperado pelo fator Lis (FL_T) são o conjunto de soldas A4, B3, B4, B5, B6, B8, B9, que tentam replicar um trajeto semicircular. Por outro lado, as soldas A2, A3,

B1, B2, B7 apresentam uma pequena diferença em relação ao comportamento padrão estabelecido por este fator, ao apresentar mudanças inesperadas na zona crítica. Porém, a última palavra é dada pela análise do desvio padrão do fator Lis (σFL_T) (vide figura 5.35), onde os valores mais elevados indicam que os períodos de arco e curto-circuito variam de acordo com o comportamento esperado pelo fator (FL_T). Conforme a análise do desvio-padrão do fator (σFL_T) é possível estabelecer o fato de que as soldas que apresentam um melhor comportamento para o fator de regularidade FL_T são: B5, B7, B8 e B9.

O período de transferência é composto pela soma dos tempos de arco e curto-circuito; portanto, se os tempos de formação e transferência da gota para a poça de fusão se dão regularmente com tempos simétricos, o período tenta seguir um comportamento de caminho linear ao longo da solda. A Figura 5.36, a seguir, evidencia o período de transferência em função do ângulo de soldagem, onde é possível observar que as soldas (A2 – B3) apresentam acentuada diferença nos períodos de transferência ao longo da solda, uma vez que contêm acréscimos e quedas abruptas que indicam a ocorrência de tempos de arco e curto-circuito pequenos, seguidos de períodos de formação e transferência da gota com maior duração. Portanto, geram indícios de irregularidade na transferência.

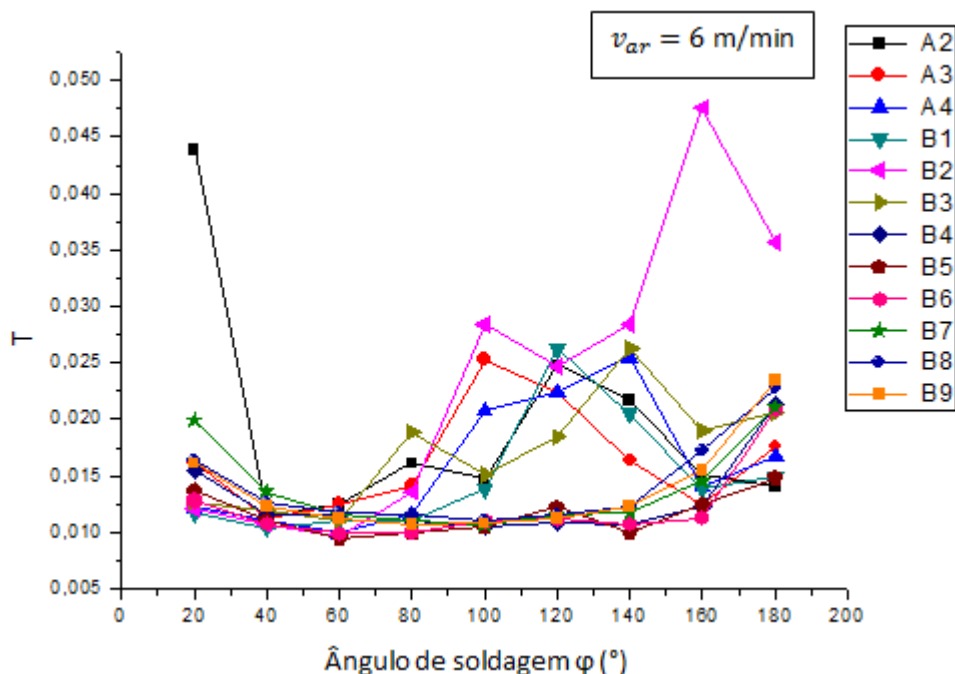


Figura 5.36: Período de curto circuito em função do ângulo de soldagem para as soldas com $v_{ar}=6$ m/min.

O grupo de soldas (B4 – B9) têm períodos de transferência mais regulares, uma vez que seu comportamento é mais próximo do procurado para este índice. No entanto, apresentam pequenas variações nos períodos de transferência nas fases inicial e final da solda, os quais se dão devido às instabilidades inerentes a estas áreas.

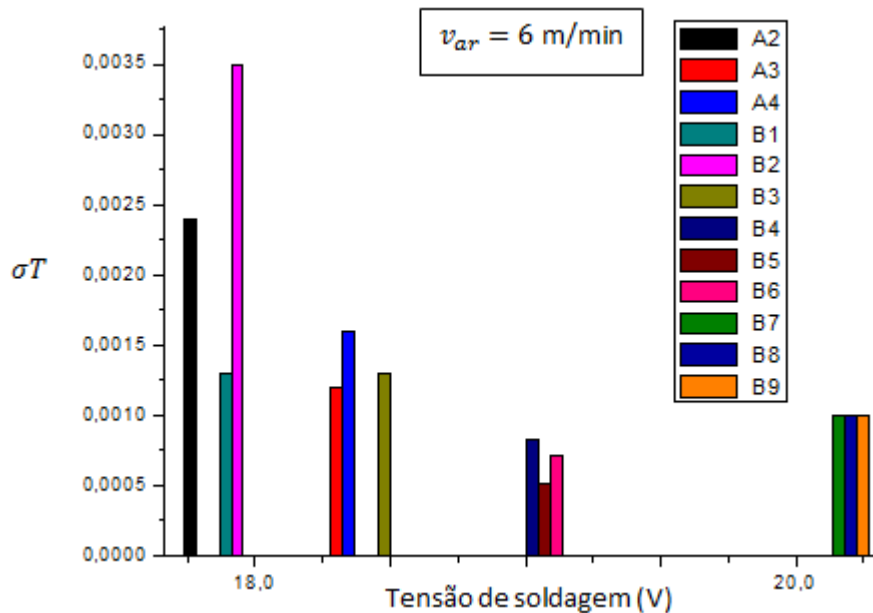


Figura 5.37: Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $v_{ar}=6$ m/min.

Na figura 5.37, apresentada anteriormente, tem-se o desvio-padrão do período de transferência para cada solda feita nesta etapa. Segundo os estudos de Dutra et al. (1995), o desvio do período de transferência está relacionado diretamente com a regularidade do processo e, portanto, com a uniformidade de deposição. Assim, 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 (Silva, 2006). Com base na premissa acima, as soldas que tiveram períodos de transferência mais regulares são B5, B6, B4, B7, B8 e B9, dispostos em ordem decrescente (maior – menor), de acordo com o nível de regularidade apresentado no experimento; porém, as três últimas encontram-se no mesmo nível.

Depois da análise dos índices de estabilidade de transferência metálica para as soldas realizadas com velocidade de alimentação de arame $v_{ar} = 6$ m/min, analisou-se as soldas da segunda categoria, efetuadas com $v_{ar} = 5,5$ m/min. Neste sentido, faz-se importante destacar que serão utilizados os mesmos critérios para a análise das soldas da primeira

categoria ($v_{ar} = 6$ m/min). Portanto, a presente seção será limitada à escolha das soldas que apresentam o melhor desempenho de acordo com o índice de estudo.

A Figura 5.38, a seguir, ilustra o padrão de comportamento do índice (IV_{CC}) em função do ângulo de soldagem ($\varphi = 0^\circ$ - 180°) para cada uma das soldas do grupo (B10-B21). Como dito anteriormente, os valores mais baixos do índice representam uma maior estabilidade na transferência; assim, inicialmente, podem ser recusadas as soldas B10, B11 e B18. No entanto, o desvio-padrão do índice (σIV_{CC}) fornece informações mais precisas para a escolha das soldas com a transferência mais estável.

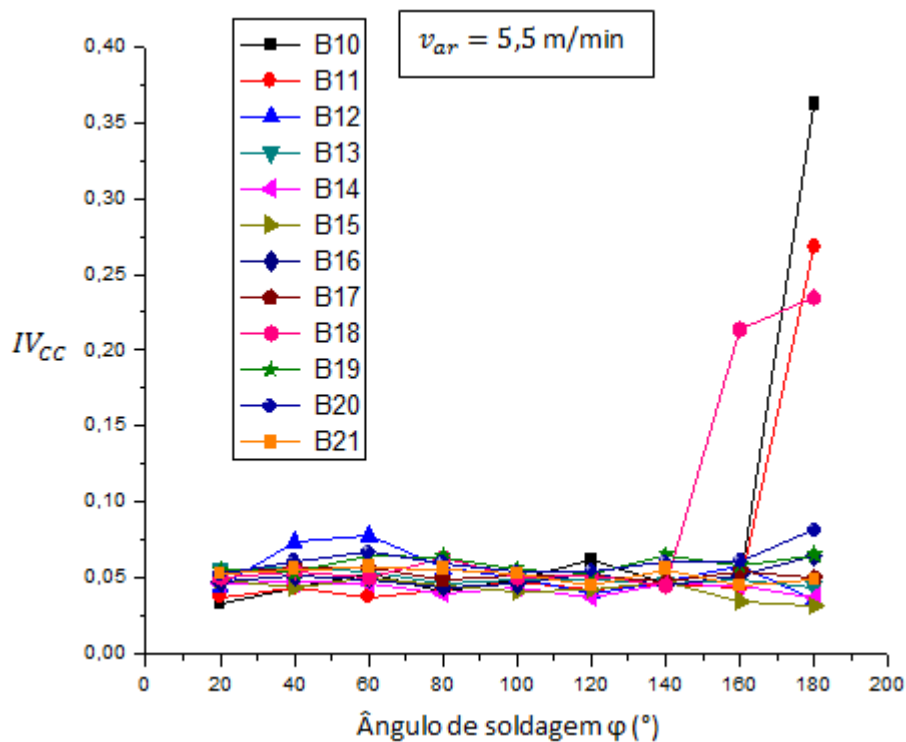


Figura 5.38: Índice de regularidade de transferência em função do ângulo de soldagem para soldas com $v_{ar} = 5,5$ m/min.

A figura 5.39, a seguir, apresenta o desvio-padrão do índice de regularidade (σIV_{CC}) para cada um dos ensaios realizados na segunda categoria, e uma vez que o valor inferior representa a transferência mais estável, é possível estabelecer que as soldas com melhor comportamento na transferência correspondem às B17, B14, B13, B21, B16, B15, B19 e B20, que são organizadas por ordem decrescente de estabilidade.

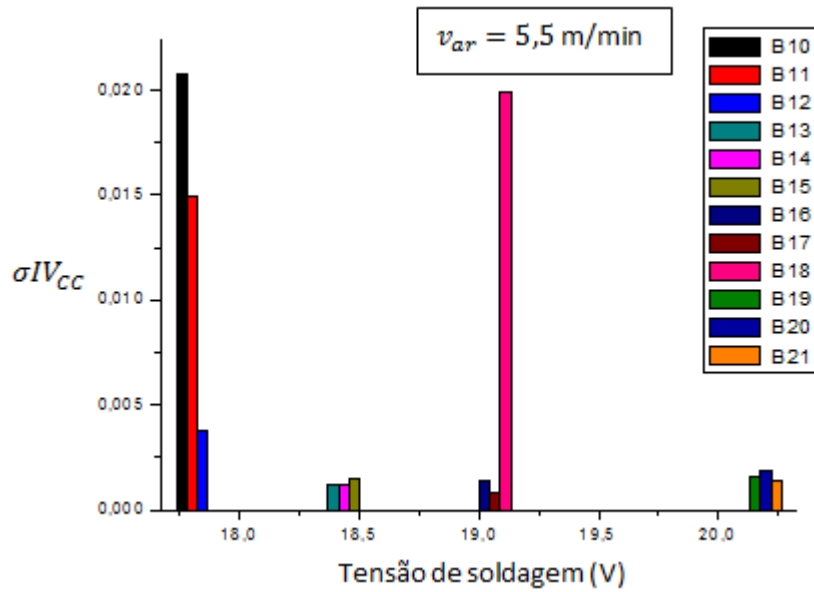


Figura 5.39: Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $v_{ar}=5,5 \text{ m/min}$.

Abaixo se tem a frequência de curto-circuito (F_{cc}) em função do ângulo de soldagem para as soldas (B10 – B21) realizadas com $v_{ar}=5,5 \text{ m/min}$ (vide Figura 5.40).

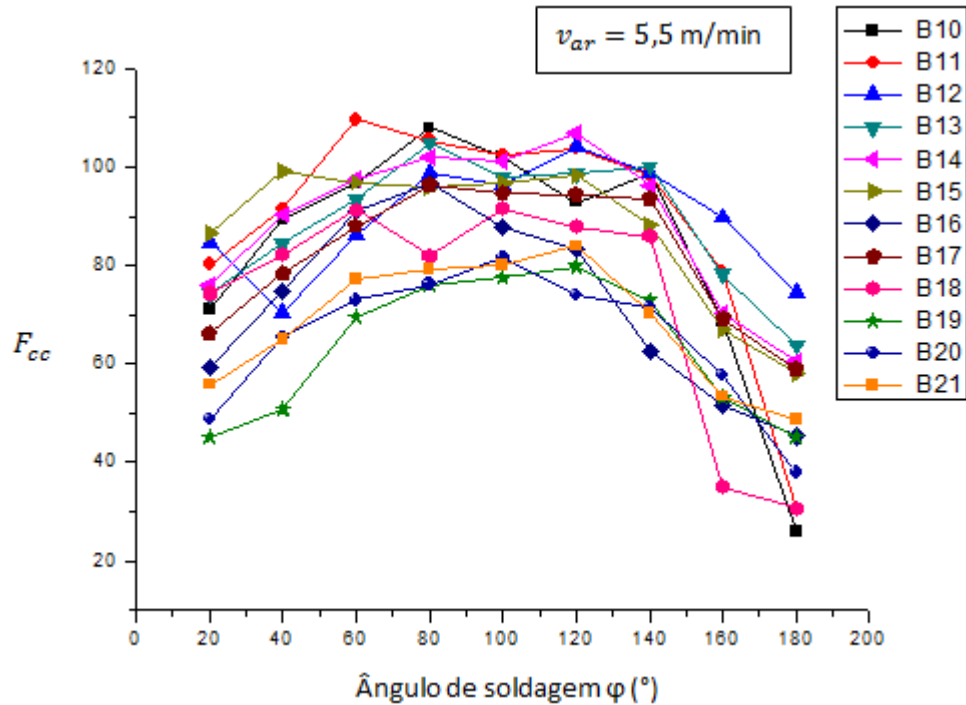


Figura 5.40: Frequência de curto circuito em função do ângulo de soldagem para soldas com $v_{ar}=5,5 \text{ m/min}$.

Na figura apresentada anteriormente, é possível perceber que as soldas B10, B11, B12, B13, B16 e B18 podem ser descartadas porque possuem irregularidades no padrão de comportamento exigido pelo índice em questão, devido ao fato de que no ponto crítico (em torno de 90°), a frequência de curto-circuito decai, ao invés de aumentar para compensar os efeitos provocados pela força gravitacional e outros fenômenos físicos envolvidos. As outras soldas tentam seguir um comportamento semicircular; portanto, podem ser classificadas por este índice.

A Figura 5.41, a seguir, ilustra o desvio padrão da frequência de curto-circuito (σF_{CC}), onde são esperados valores baixos para indicar a estabilidade do processo. De acordo com o referido critério, são eliminadas as soldas B10, B11, B16 e B18; no entanto, é necessário concluir a análise por meio de todos os índices antes de efetuar uma decisão sobre a referida questão.

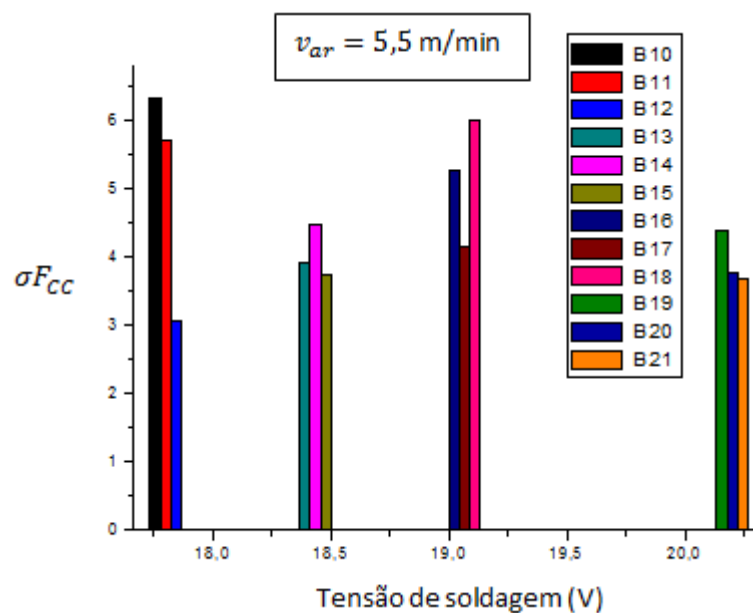


Figura 5.41: Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $v_{ar}=5,5$ m/min.

Ao analisar o fator Lis (FL_T) para este grupo de Soldas (vide Figura 5.42, a seguir), é possível observar que a maioria das soldas tenta seguir um caminho semicircular; porém, os experimentos B15 e B18 apresentam nas soldas notáveis mudanças. A Figura 5.43, a seguir, mostra o desvio padrão deste índice e confirma que o comportamento de soldas foi semelhante, pelo que é necessário proceder a uma análise conjunta das respostas obtidas

com os outros índices, a fim de determinar os parâmetros que geram boas condições para a estabilidade de transferência.

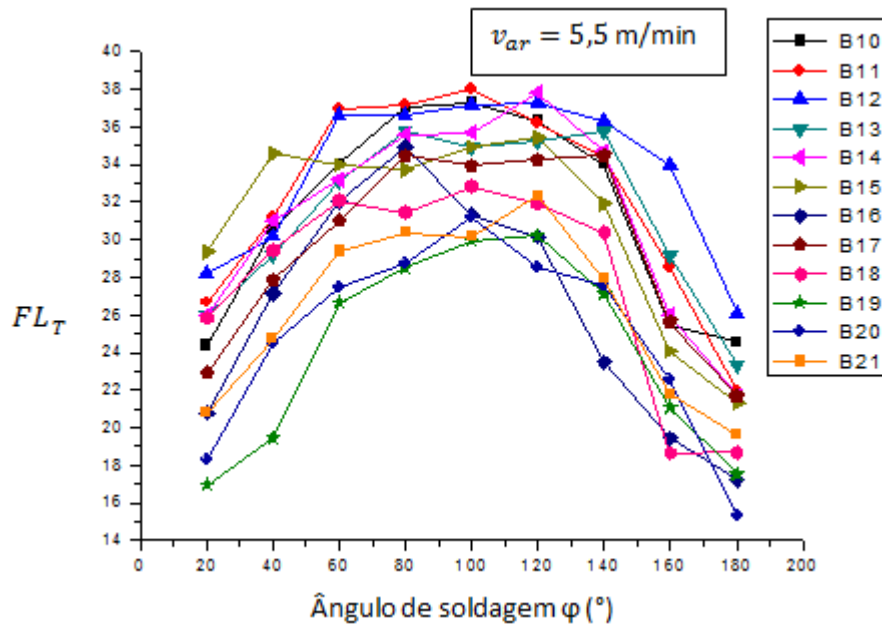


Figura 5.42: (FL_T) em função do ângulo de soldagem para soldas com $v_{ar}=5,5$ m/min.

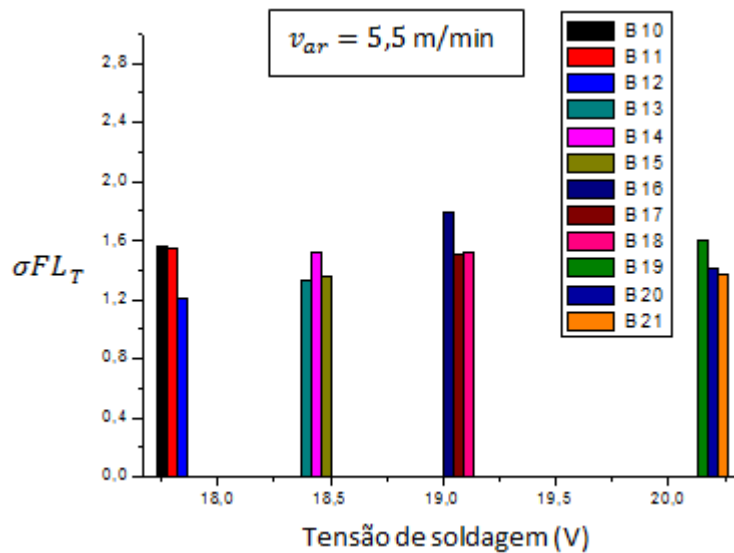


Figura 5.43: Desvio padrão do fator (σFL_T) para as soldas com $v_{ar}=5,5$ m/min.

Por fim, analisou-se o comportamento do período de transferência para cada solda da segunda categoria. A Figura 5.44, a seguir, apresenta o comportamento dos períodos de transferência em função do ângulo de soldagem, onde foi possível perceber que as soldas

B10, B11 e B18, mostraram irregularidades no período de transferências na última seção da solda (140°-180°). A figura 5.45, a seguir, confirma tal informação através do desvio padrão, evidenciando que as melhores condições de estabilidade geradas pela regularidade dos períodos de arco e curto-circuito são apresentadas pelas soldas B12, B13, B14, B15 e B17.

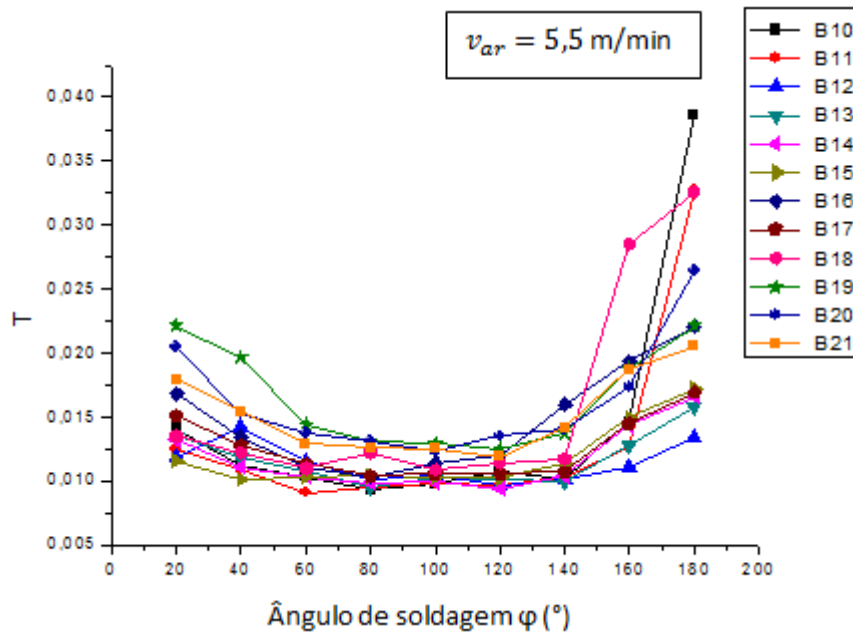


Figura 5.44: Período de transferência em função do ângulo de soldagem para soldas com $v_{ar} = 5,5$ m/min.

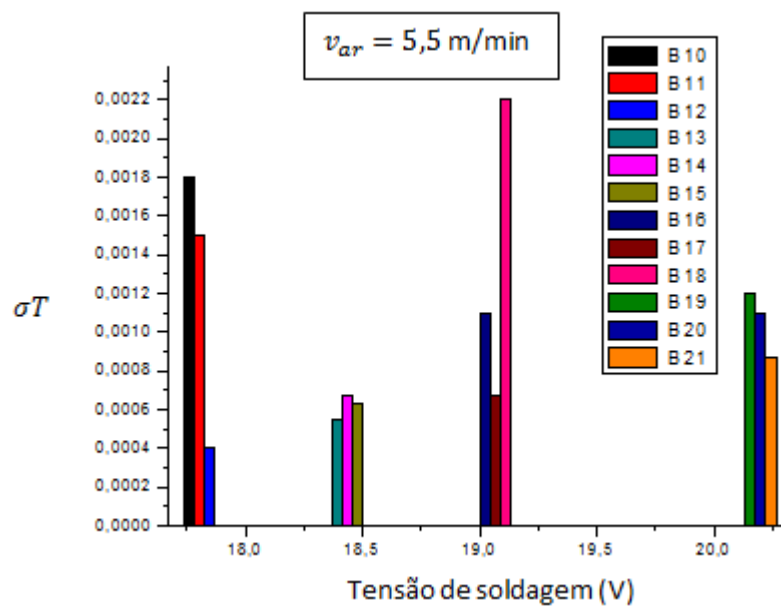
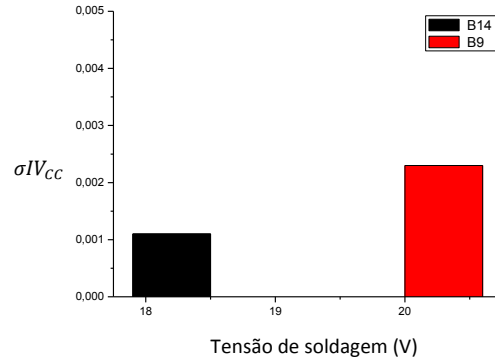
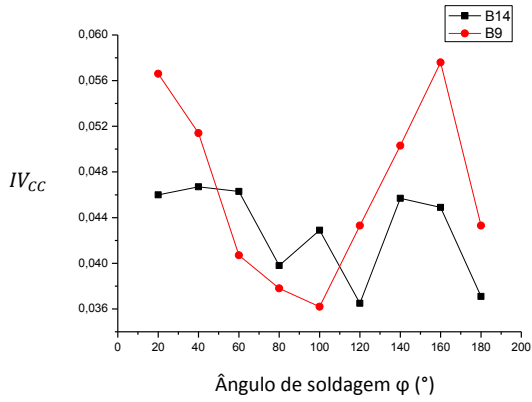
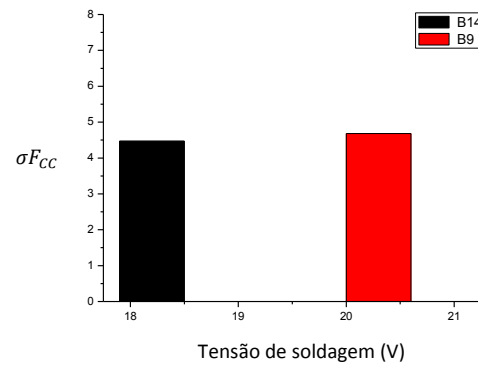
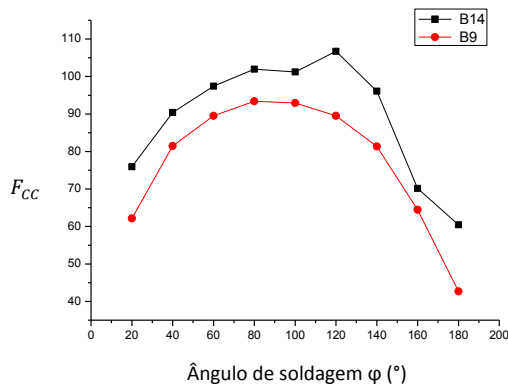


Figura 5.45: Desvio padrão do período de transferência para as soldas com $v_{ar} = 5,5$ m/min.

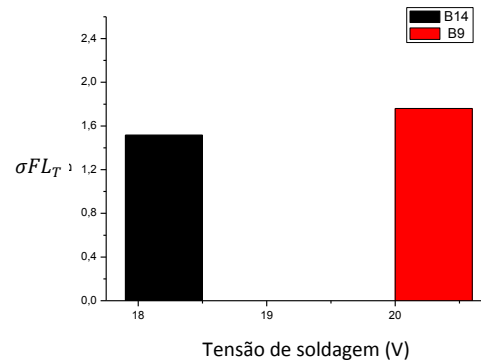
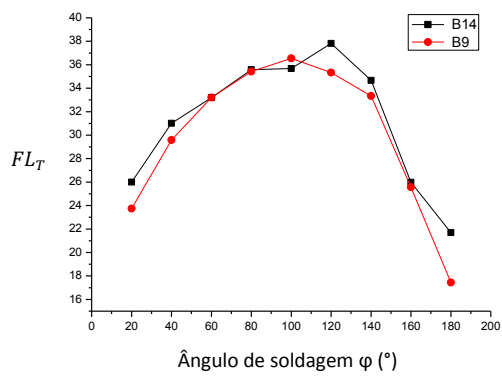
Depois da conclusão do processo de descarte das soldas pela análise dos índices de estabilidade, através da inspeção visual do cordão, foram escolhidas as soldas B9 e B14 para cada categoria, respectivamente. Abaixo, tem-se o comportamento das duas soldas, a fim de determinar qual produziu melhores condições de estabilidade na transferência.



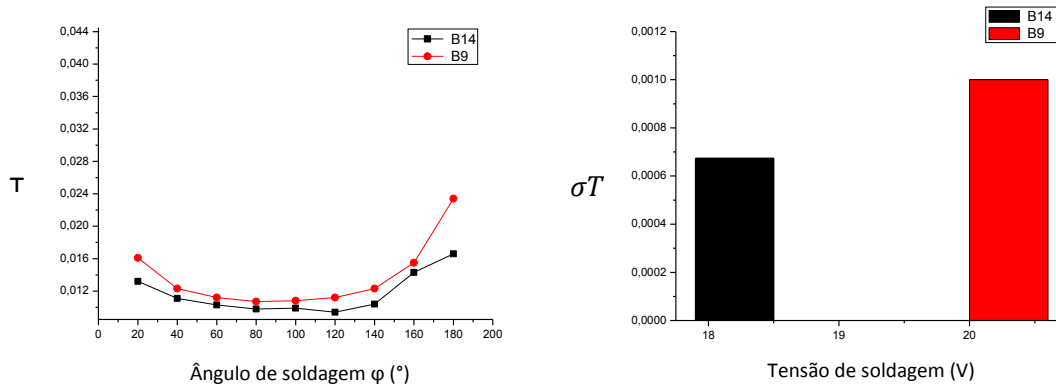
(a)



(b)



(c)



(a)

Figura 5.46: Índice de regularidade e desvio padrão (a) IV_{cc} , (b) F_{cc} , (c) FL_T , (d) T , das soldas selecionadas B9 e B14.

A partir da Figura 5.46, apresentada anteriormente, é possível determinar que a solda que apresentou melhores condições em relação à estabilidade na transferência foi B14, uma vez que tem mínimo desvio padrão no índice regularidade (IV_{cc}), como na frequência de curtos-circuitos e os períodos de transferência, no entanto, a solda B9 também oferece boas condições estabilidade na transferência, uma vez que seus valores não encontram-se longe da solda escolhida.

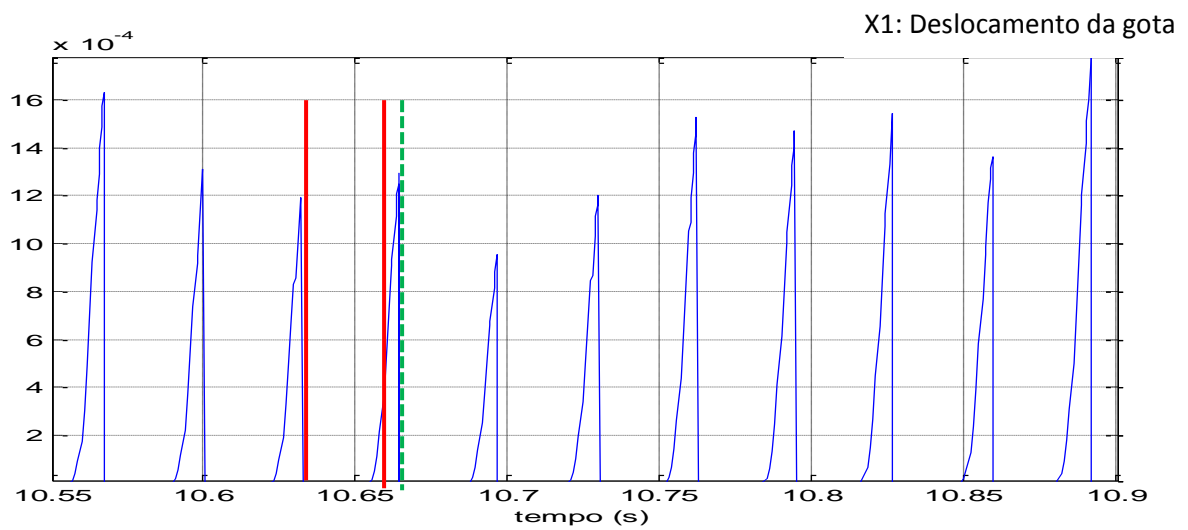
5.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO SEM REGULACAO DE PARAMETROS

Os dados de entrada para a simulação do modelo híbrido correspondem aos parâmetros que produziram os melhores resultados na estabilidade da transferência metálica das provas sem regulação de parâmetros, obtidas experimentalmente (vide Tabela 5.27, a seguir).

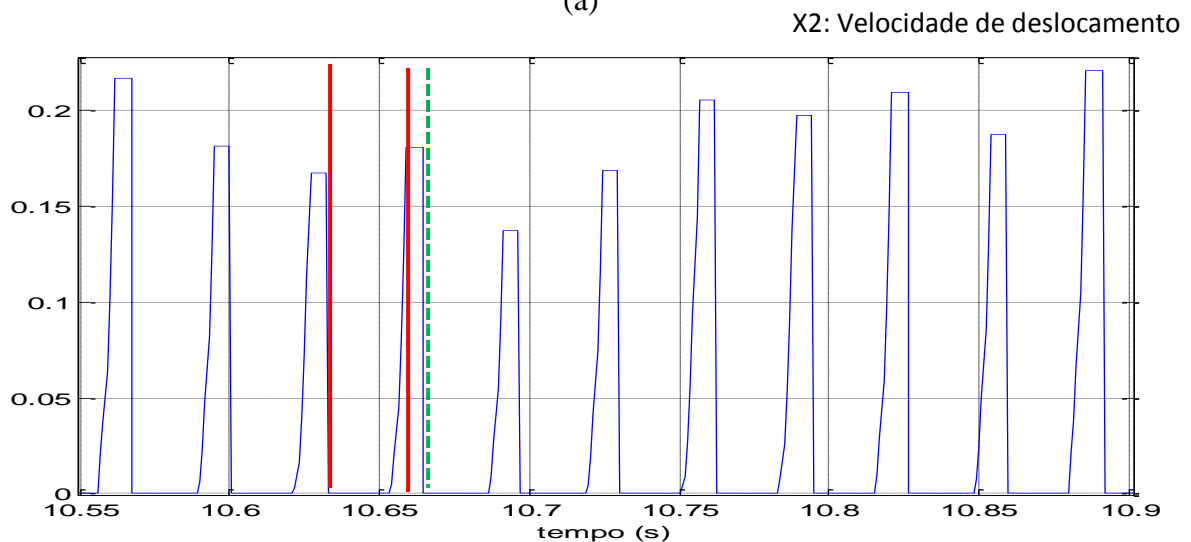
Tabela 5.27: Parâmetros de entrada para o modelo híbrido.

Tensão de soldagem	Velocidade de soldagem	Velocidade de alimentação de arame	DBCP
18,5 V	13 mm/s	5,5 m/min	12 mm

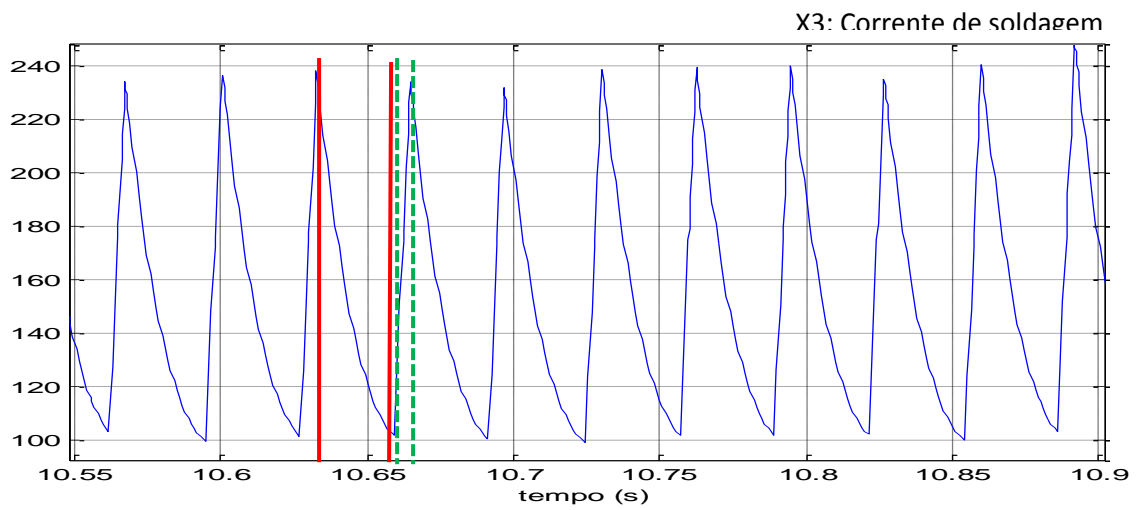
Tal como nos ensaios experimentais, a simulação do modelo também se deu na posição vertical descendente (0° - 180°). A partir dos parâmetros de entrada, o modelo estima as saídas do processo, que correspondem aos estados X_1 deslocamento da gota na ponta do eletrodo, X_2 velocidade de deslocamento da gota, X_3 corrente de soldagem, X_4 comprimento do eletrodo sólido e X_5 massa da gota. A figura 5.47, a seguir, apresenta a resposta das equações de estado ($\dot{X}_1 - \dot{X}_5$) que compõem o modelo híbrido.



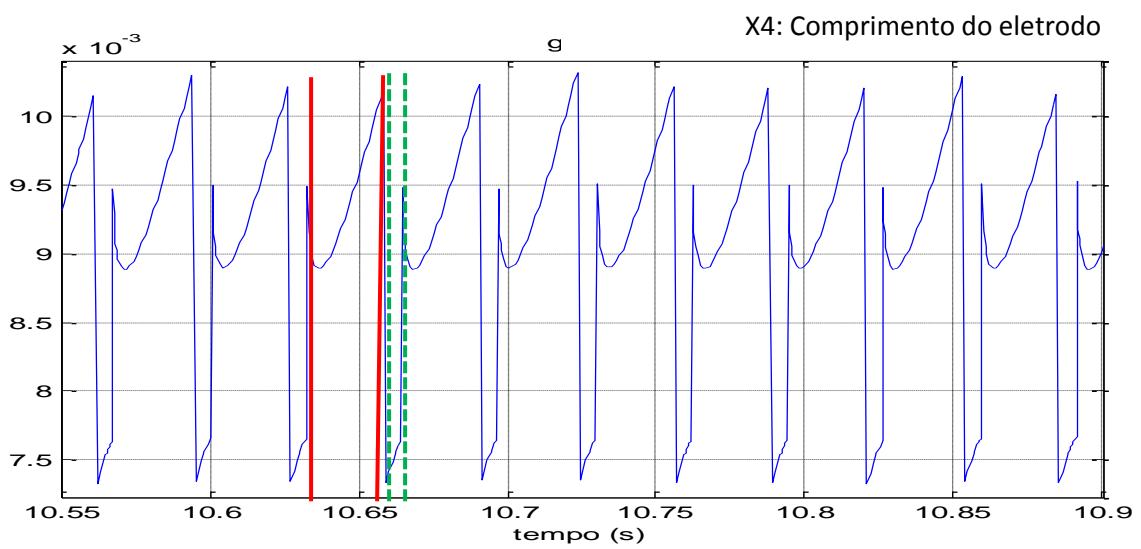
(a)



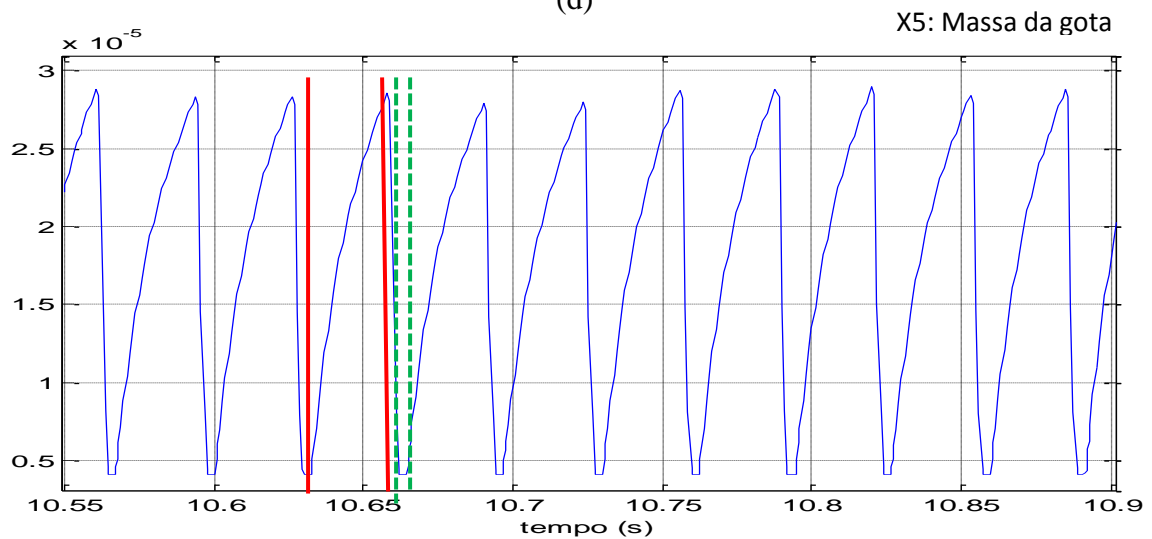
(b)



(c)



(d)



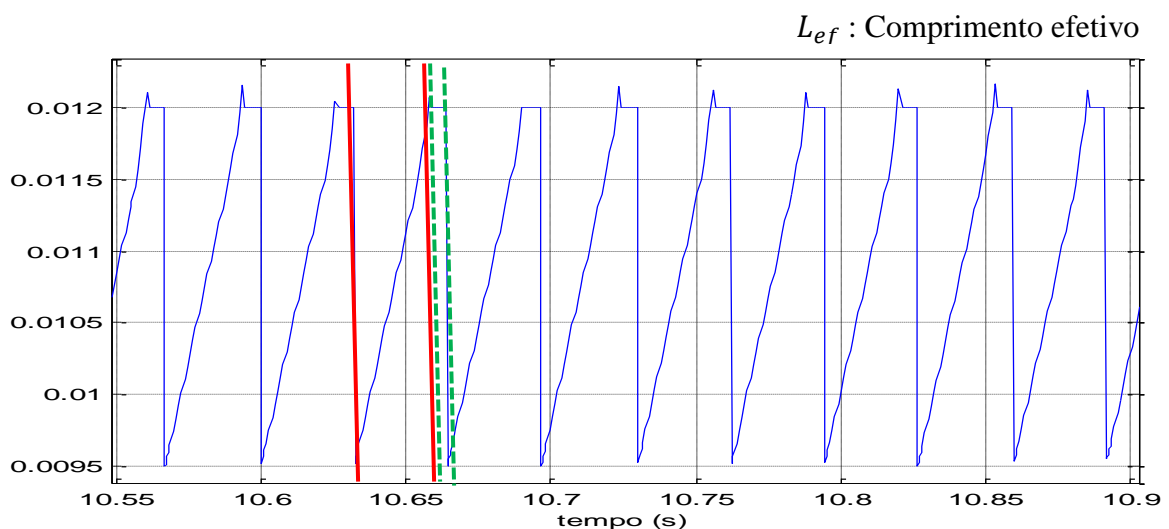
(e)

Figura 5.47: Respostas dos estados do modelo híbrido proposto (a) X1, (b) X2, (c) X3, (d) X4, (e) X5.

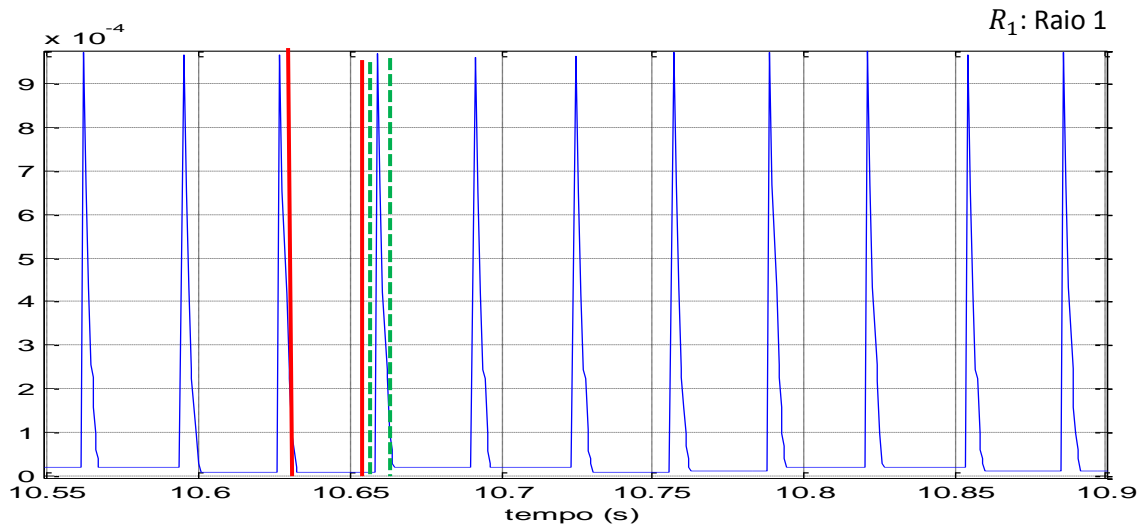
Conforme exposto em capítulos anteriores, o modo transferência metálica por curto-circuito é composto pela existência de dois períodos consecutivos denominados de período de arco e período de curto-circuito. Na figura 5.47, apresentada anteriormente, em todos os estados, o período de arco é destacado entre linhas vermelhas. Nesta fase, o material do eletrodo é derretido e acumulado até a formação de uma gota que é responsável de comandar todo o processo, uma vez que, de acordo com a sua evolução, é determinada a fase do sistema (arco ou curto). O período de curto-circuito foi enquadrado por linhas verdes e tem, obviamente, tempo mais curto do que a fase anterior, não se mostrando menos importante. Em verdade, este é o lugar onde se dá a transferência de metal, o que determina as características finais do cordão de solda.

No presente estudo, existem duas condições principais que indicam a troca de modo a trabalhar no modelo. A primeira regula a duração do período de arco e é marcada pelo comportamento do comprimento efetivo (L_{ef}). A segunda determina a duração do curto-circuito e é regida pela evolução do raio R_1 , que atinge o seu valor máximo após o estabelecimento da ponte de metal, e o seu valor diminui à medida que o material é transferido à poça de fusão, atingindo um valor mínimo próximo de zero, indicando o rompimento da ponte com o restabelecimento do arco e o início de um novo ciclo.

A Figura 5.48, a seguir, evidencia o comportamento dos parâmetros que geram as condições de mudança no modelo: o comprimento efetivo (L_{ef}) apresenta um crescimento notável durante o período de arco, e ao atingir a distância existente entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP), o modelo muda imediatamente para a fase de curto-circuito.



(a)

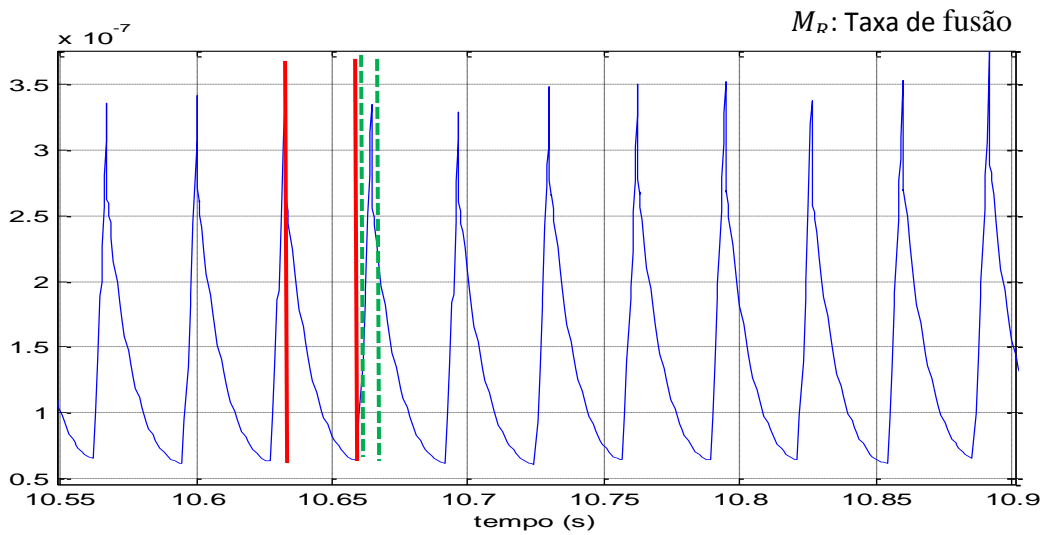


(b)

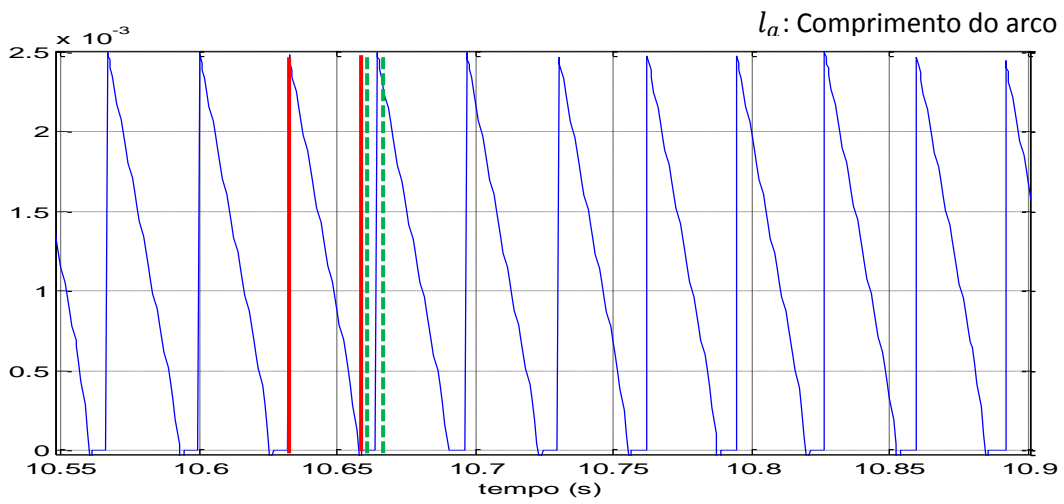
Figura 5.48: Condições para a mudança de período no modelo híbrido (a) comprimento efetivo, (b) raio R_1 .

Na parte (b) da figura 5.48, apresentada anteriormente, é possível perceber que o raio R_1 adquire a informação do raio máximo atingido pela gota durante o período do arco, e a partir desse ponto comanda a existência da ponte metálica, indicando a duração do curto-circuito.

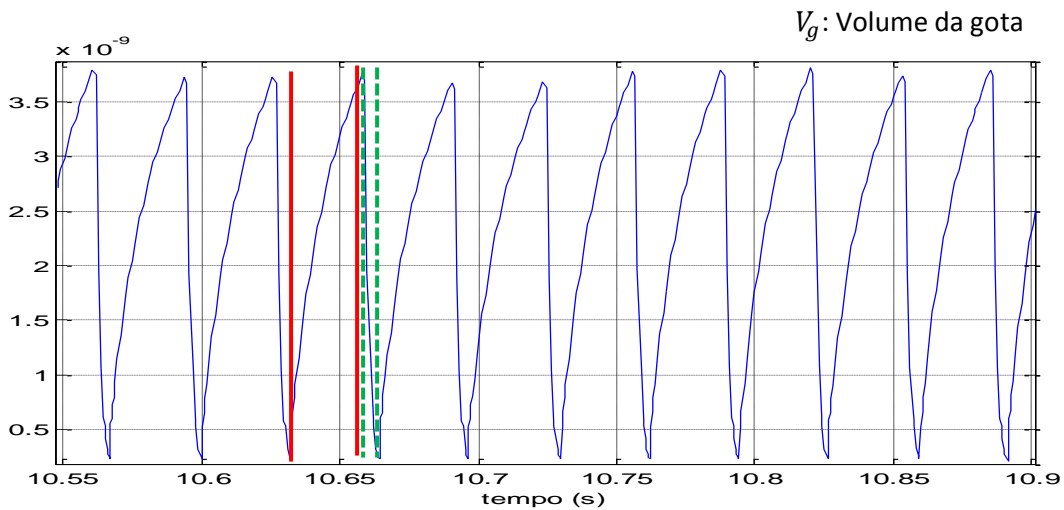
O modelo também permite o estudo de outros parâmetros que desempenham um papel importante na dinâmica do processo GMAW-S, tais como: a taxa de fusão (M_R), o comprimento de arco (l_a), e o volume da gota (V_g). A Figura 5.49, a seguir, apresenta o desempenho dos parâmetros mencionados anteriormente, a fim de aprofundar o conhecimento sobre o seu comportamento, uma vez que não podem ser visualizados diretamente pela aquisição dos sinais (experimentalmente). A referida figura ainda destaca que a taxa de fusão do eletrodo no período de arco é menor, se comparado àquela apresentada no período do curto-circuito, no qual a velocidade de fusão do eletrodo é maior à velocidade de alimentação de arame. Como esperado, no período de arco, o comprimento do arco diminui à medida que o tamanho da gotícula aumenta progressivamente. Finalmente, o volume da gota aumenta no período do arco porque o material fundido acumula-se na ponta do eletrodo; na fase de curto circuito V_g diminui, pois, o material é transferido à poça de fusão pela ação do efeito Pinch e da tensão superficial.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.49: Comportamento de outros parâmetros no modelo (a) taxa de fusão do eletrodo, (b) evolução do comprimento do arco, (c) volume atingido pela gota metálica.

O comportamento da força de gravidade encontra-se fortemente ligado ao ângulo de soldagem (φ), de acordo com as equações abordadas no capítulo quatro. A Figura 4.50, a seguir, ilustra a força de gravidade em função do ângulo de soldagem agindo sobre a gota na posição verticalmente do tubo, entre os ângulos (0° - 180°). Na referida figura, tem-se ampliadas duas janelas que permitem observar mais pormenorizadamente o comportamento da força de gravidade.

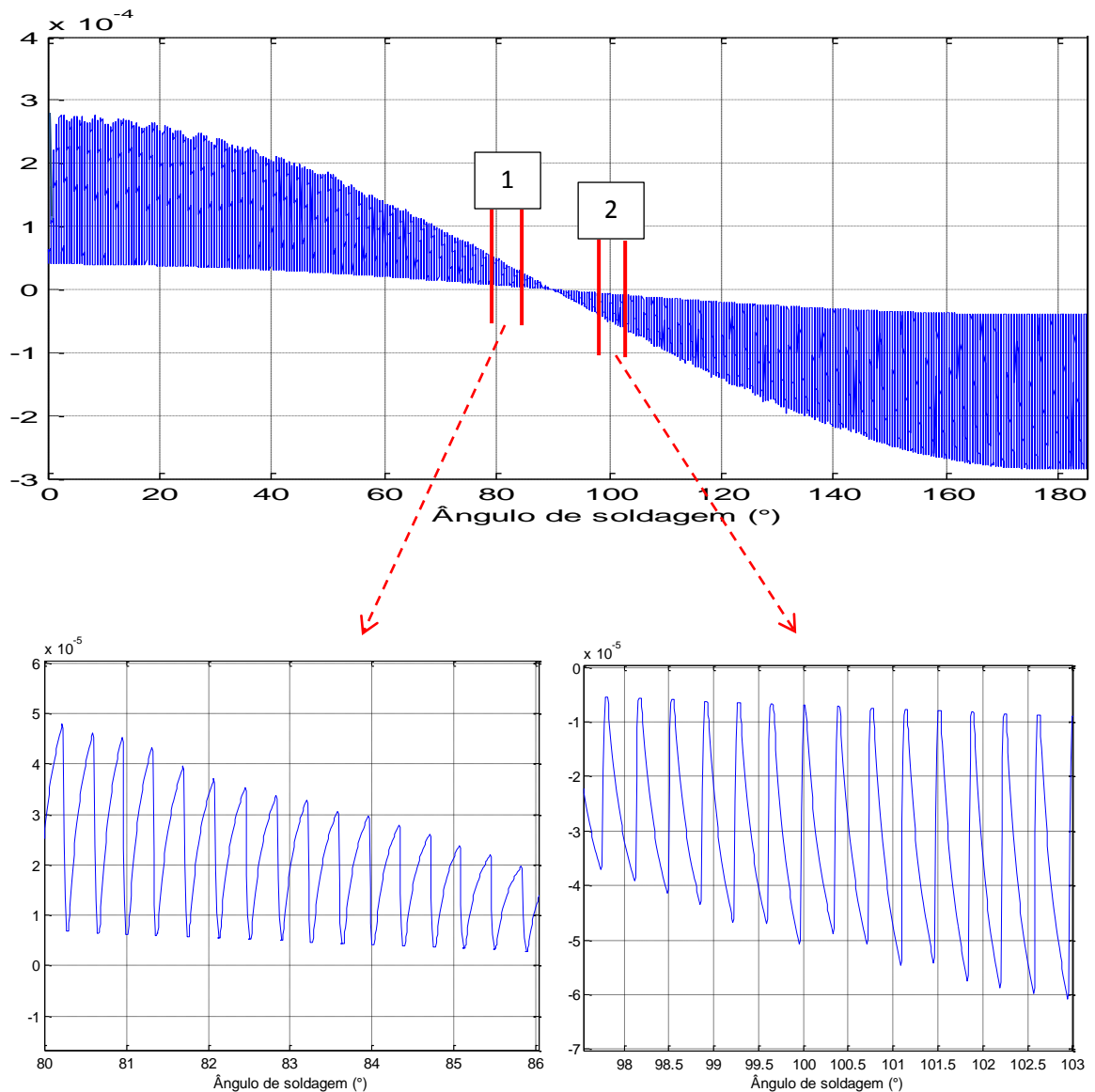


Figura 5.50: Comportamento da força de gravidade na posição vertical descendente da soldagem orbital.

A figura apresentada anteriormente indica que o aporte da força gravitacional é governado pelo ângulo de soldagem (φ), conforme observado nas janelas 1 e 2. Dependendo do ângulo de soldagem e, portanto, da posição de soldagem (plana, vertical descendente e

sobre cabeça), a força em questão apresenta uma contribuição em maior ou menor grau, para a separação da gota da ponta do eletrodo.

A força eletromagnética é uma das mais importantes forças que atuam na transferência de metal. O seu contributo varia de acordo com o comportamento das linhas de corrente que atravessam a gota, o que determina se gota é separada ou mantida no eletrodo (Nemchinsky, 1994). A figura 4.51, a seguir, ilustra a força eletromagnética em função do ângulo ϕ .

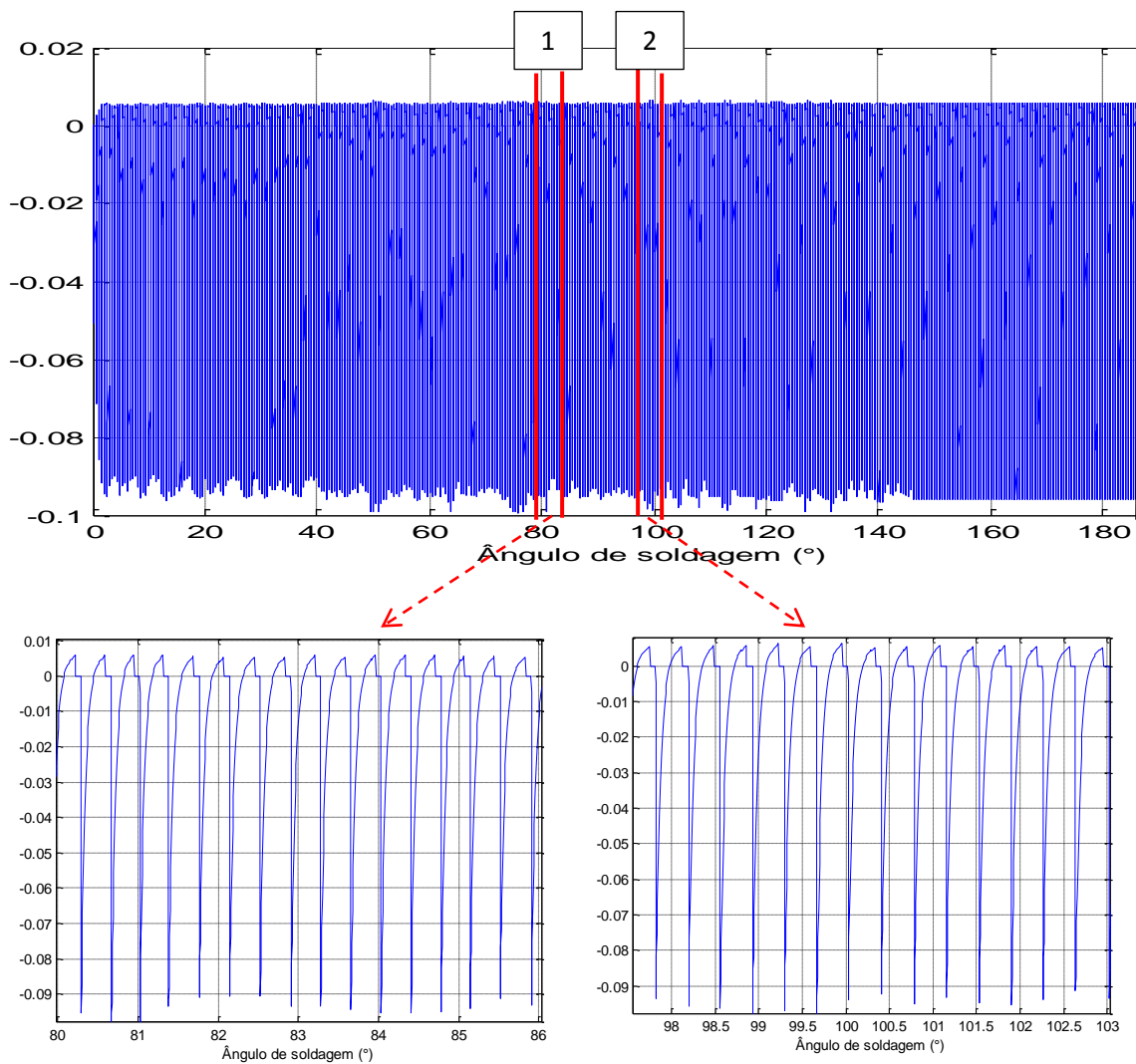


Figura 5.51: Comportamento da força eletromagnética na posição vertical descendente da soldagem orbital.

A figura apresentada anteriormente ilustra um comportamento quase uniforme para a força eletromagnética e sem grandes mudanças devido à variação da posição de soldagem. Porém, é importante lembrar que a sua contribuição tem um efeito maior no período do

arco (por razões mencionadas nos capítulos anteriores), quando o seu valor aumenta com o aumento da corrente nesta fase, mostrando, assim, uma clara dependência deste parâmetro.

5.4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM REGULAÇÃO DE PARÂMETROS

Objetivando melhorar a estabilidade da transferência metálica ao longo do cordão de solda realizado diante a variação de posição de soldagem (φ), foi aplicada a regra de regulação de parâmetros à solda selecionada da seção anterior.

Conforme exposto nos capítulos anteriores, a regra de regulação requer parâmetros de referencia iniciais (corrente, tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem), os quais foram extraídos dos parâmetros da solda selecionada anteriormente, como indicado na Tabela 5.28, a seguir.

Tabela 5.28: Parâmetros de referencia para a regra de regulação.

Parâmetro	Valor do Parâmetro de referência inicial B14
I_0	185
V_0	18,5
var_0	5,5
v_{soldo}	13

Inicialmente, a regra de regulação de parâmetros foi aplicada com fatores de regulação (f) exploratórios (vide Tabela 4.3), para determinar a faixa de melhor desempenho na regularidade da transferência de metal.

O fator de atenuação permite ajustar o nível da corrente e os outros parâmetros até obter valores apropriados para gerar as melhores condições da estabilidade na transferência metálica. Inicialmente, foram utilizados os fatores 15, 20, 25 e 30, para fazer os testes exploratórios com regulação de parâmetros.

A influência dos fatores de atenuação na estabilidade da transferência para a solda B14 foi analisada por meio de desvios padrão dos índices de regularidade σIV_{CC} , σF_{CC} , σFL_T e σT .

A seguir, são apresentados os resultados do estudo para a solda B14 (vide Figura 5.52, a seguir).

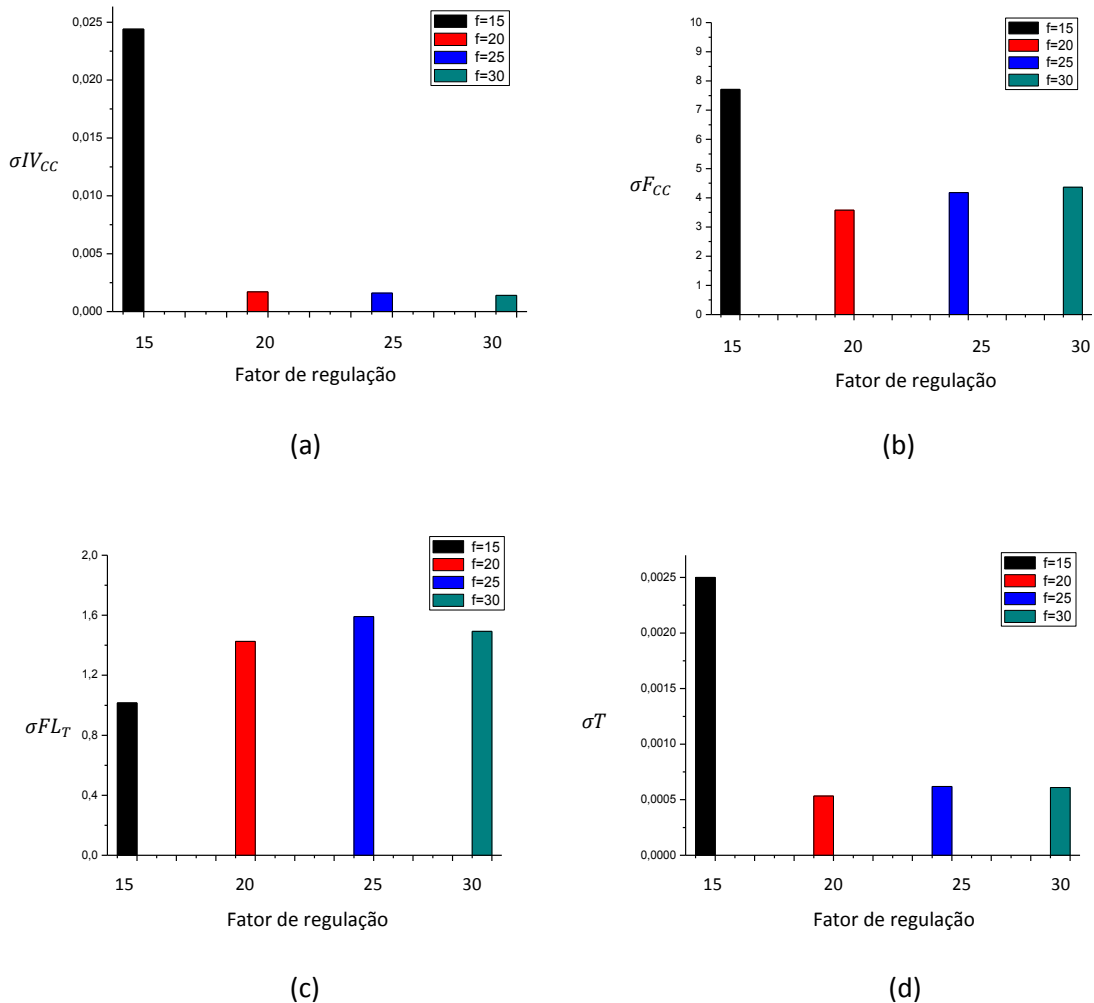
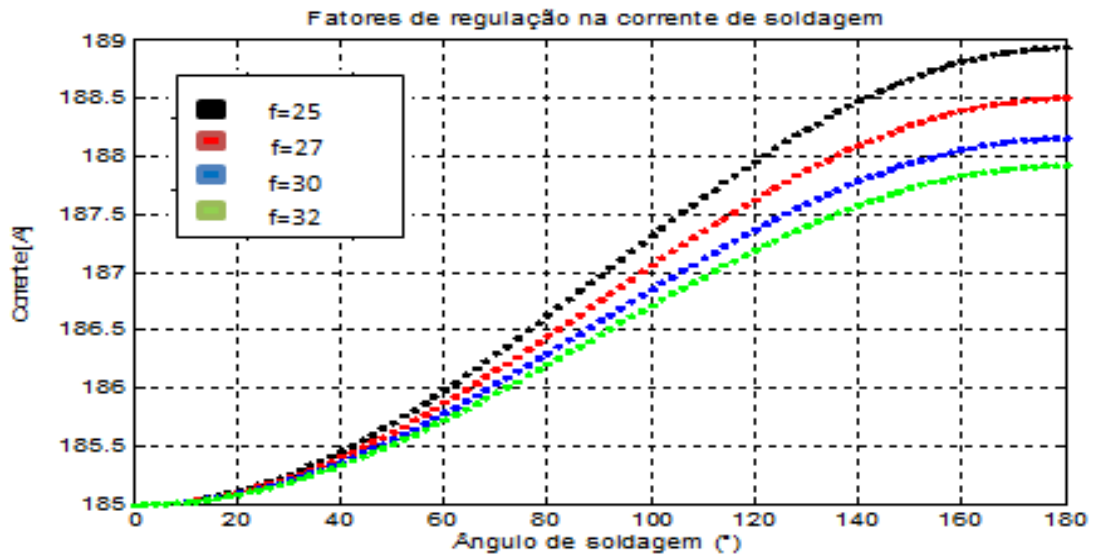


Figura 5.52: Influência de fatores de atenuação exploratórios nos índices da estabilidade da transferência de metal.

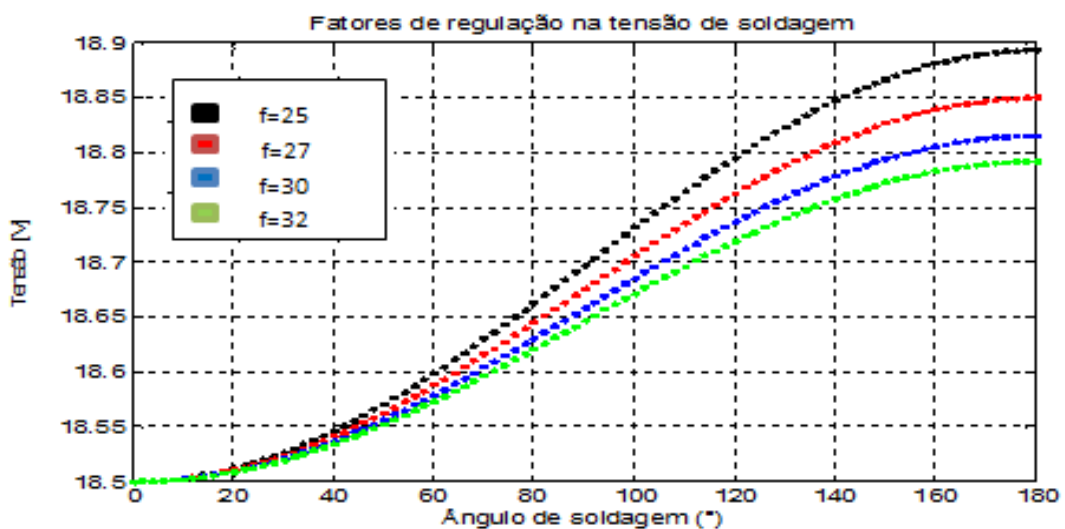
Conforme exposto na figura apresentada anteriormente, foi descartado o fator de atenuação $f=15$ e reduzido o intervalo de estudo para fatores de atenuação entre 25 e 32, uma vez que neste intervalo, em termos gerais, uma melhor resposta foi obtida. O fator de atenuação 20 tem uma resposta semelhante ao fator de atenuação de 25; portanto, os novos fatores foram assim redefinidos: $f=25$, $f=27$, $f=30$ e $f=32$.

A regra da regulação tenta controlar constantemente os parâmetros iniciais ao redor do tubo, a fim de manter níveis adequados para cada posição de soldagem, de modo a gerar boas condições para a estabilidade de transferência. O fator de regulação influencia os

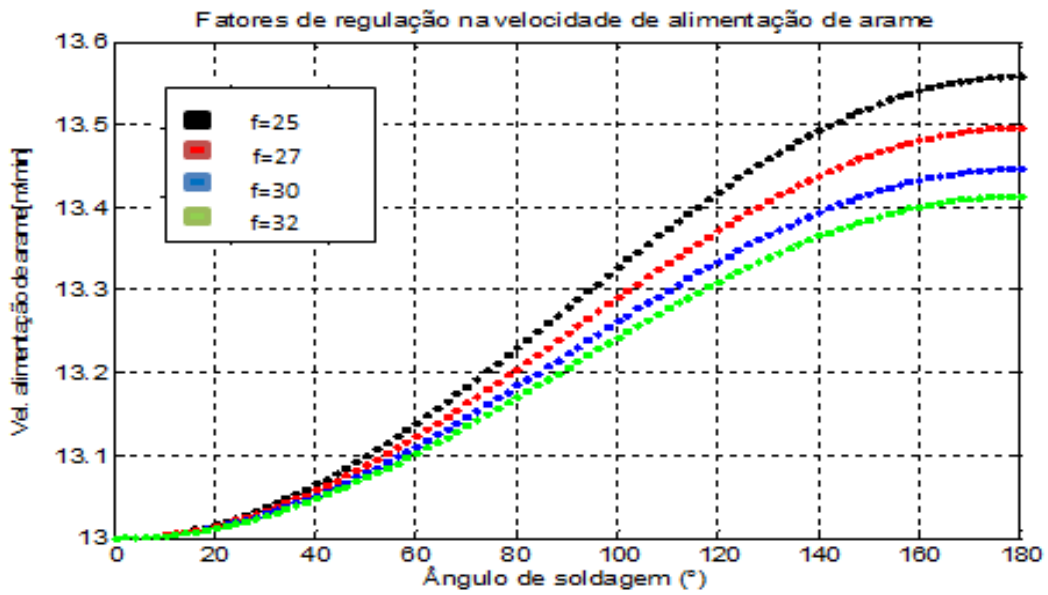
níveis alcançados pela corrente, o que afeta o comportamento dos outros parâmetros, uma vez que estão diretamente relacionados uns aos outros conforme observado nas relações de regulação de parâmetros de soldagem (equações 4.55 – 4.66). A regra da regulação é aplicada à fonte de soldagem através da interface Rob 5000, cuja resposta nos parâmetros iniciais para os fatores de regulação selecionados é apresentada na figura 5.53, a seguir.



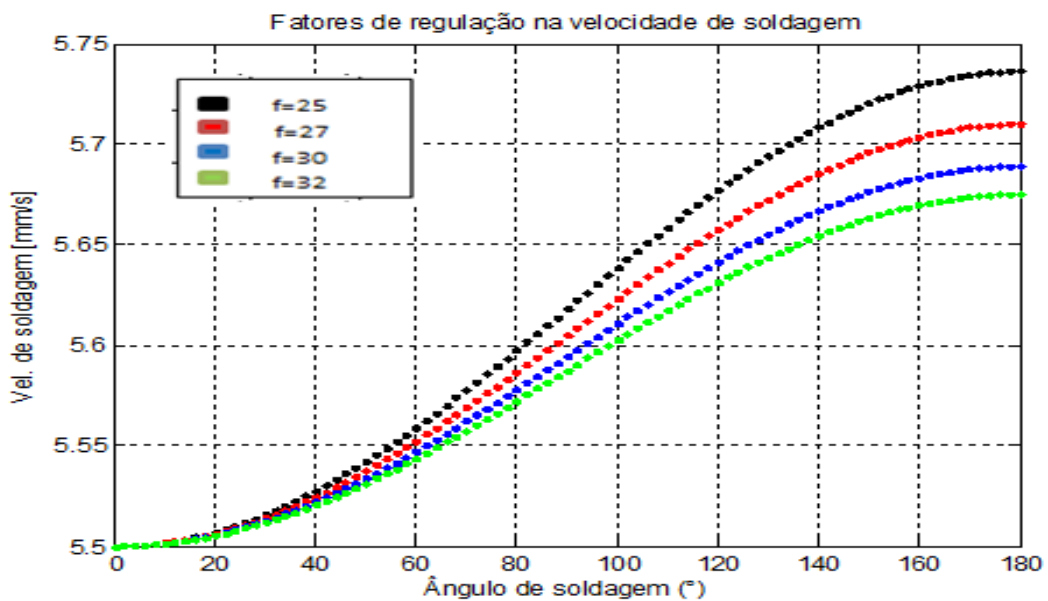
(a)



(b)



(c)



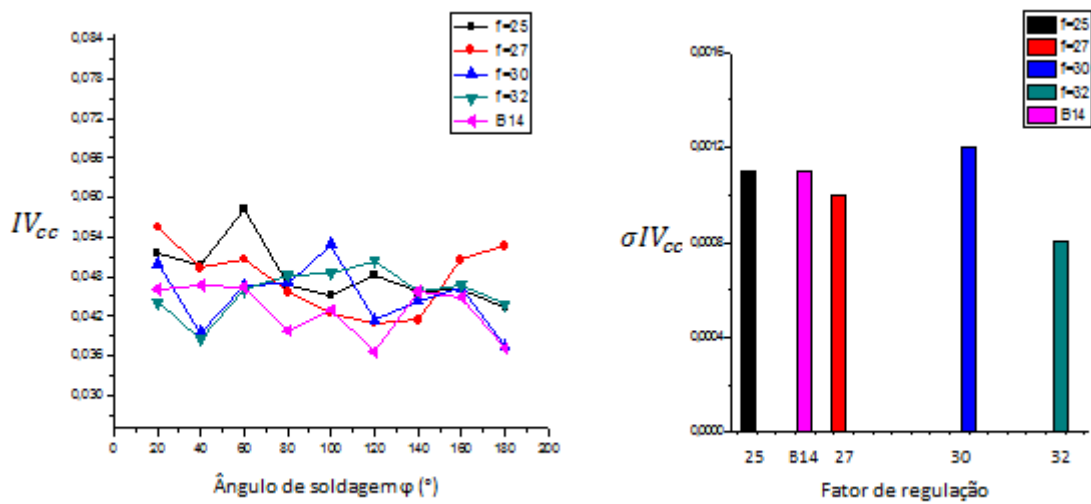
(d)

Figura 5.53: Comportamento dos parâmetros de referência (a) corrente de soldagem, (b) tensão de soldagem, (c) velocidade de alimentação de arame, (d) velocidade de soldagem, segundo o fator de regulação f .

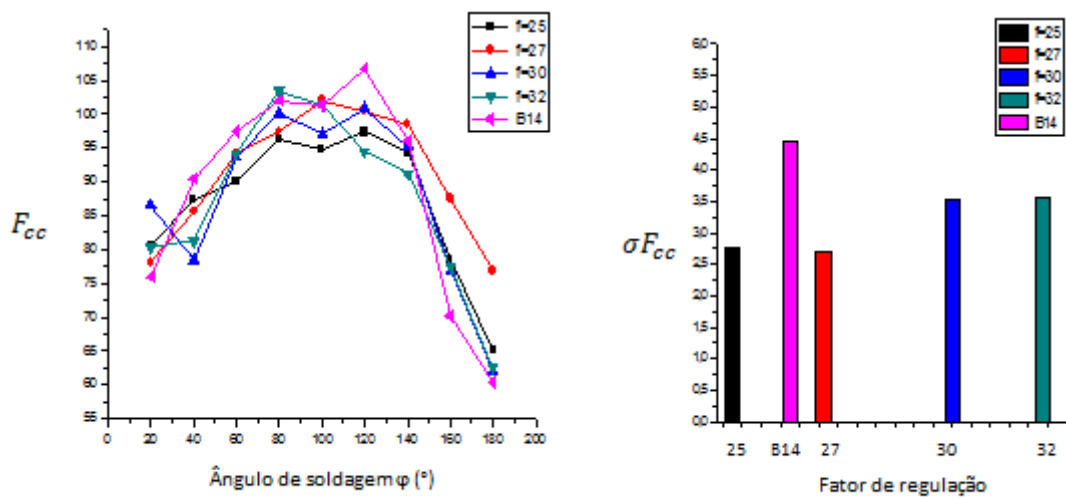
Considerando os resultados obtidos pela análise da estabilidade na transferência para os fatores exploratórios de regulação (conforme evidenciado na figura 5.52, apresentada anteriormente), e com base na nova gama dos fatores escolhidos, em conjunto com os

parâmetros ótimos para a soldagem orbital (solda B14), foram realizados quatro grupos de experimentos (cada grupo constituído por cinco experimentos) com regulação de parâmetros para cada fator de regulação, a fim de verificar a veracidade das respostas no comportamento da regularidade da transferência de massa, e a variação das características da geometria externa do cordão de solda sobre soldas realizadas em condições normais, ou seja, sem regulamentação de parâmetros.

A Figura 5.54, a seguir, apresenta a análise da influência dos fatores de regulação ($f=25$, $f=27$, $f=30$ e $f=32$) na transferência metálica, em função do ângulo de soldagem ($\varphi= 0^\circ - 180^\circ$). Para esta finalidade, são empregados os índices de regularidade abordados ao longo do presente estudo (IV_{CC} , F_{CC} , FL_T , T), com o seu correspondente desvio padrão.



(a)



(b)

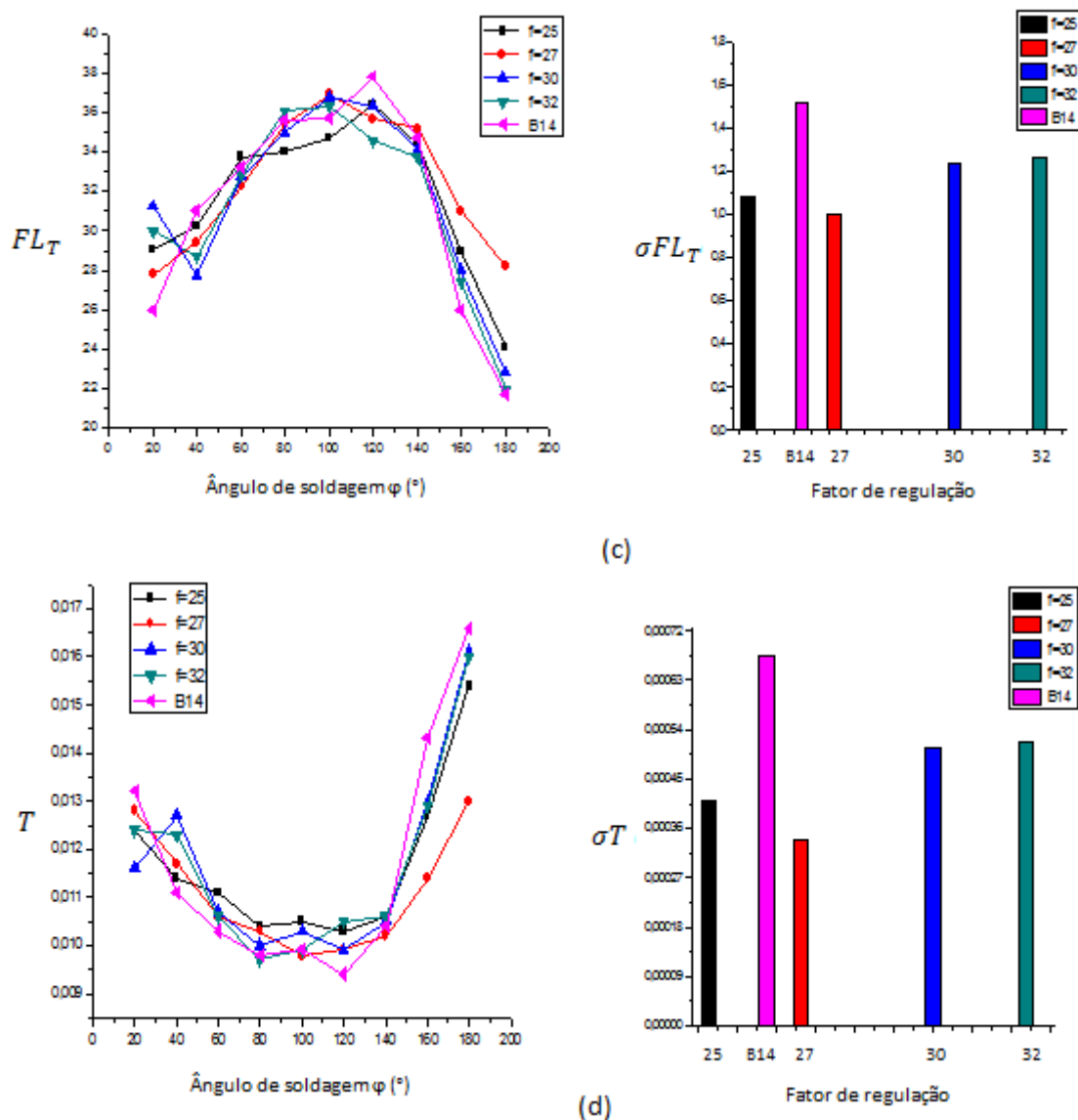


Figura 5.54 : Análise de regularidade (a) IV_{cc} , (b) F_{cc} , (c) FL_T , (d) T , na transferência de metal para as soldas com regulação de parâmetros.

Na figura apresentada anteriormente, é possível observar que as provas feitas com regulação de parâmetros apresentaram melhoria na estabilidade transferência; os fatores de regulação 32 e 27 exibiram o menor desvio-padrão para o índice de Vilarinho (σIV_{cc}). No entanto, na frequência de curto-circuito (F_{cc}), os melhores resultados foram obtidos por fatores 25 e 27, os quais se repetem na avaliação de continuidade do período de transferência (T), uma vez que apresentaram maior regularidade nos tempos de formação e transferência da gota para a poça de fusão. Por outro lado, os fatores 30 e 32 apresentaram um bom desempenho no índice de regularidade Lis (FL_T), ao seguir mais apropriadamente

uma trajetória semicircular, o que indica que a simetria dos períodos transferência entre circuito-circuitos consecutivos se deu de acordo com o que era esperado para cada posição de soldagem. Contudo, tais fatores não foram tão apropriados em comparação com os resultados obtidos pelo fator 27, que apresentou o melhor desempenho na maioria dos índices de estabilidade analisados.

Importante notar que as provas com regulação de parâmetros, foram feitas tendo em conta os parâmetros de corrente e tensão tal como apresentado na figura 5.56, a seguir, onde só foi variado fator de regulação (vide tabela 5.29).

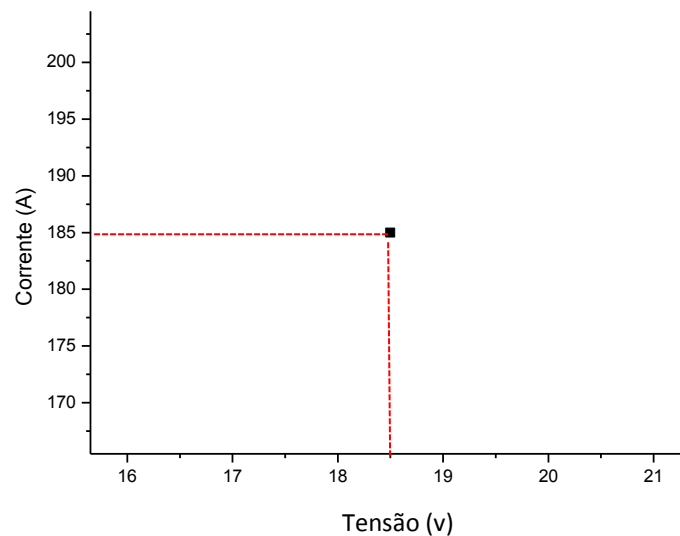



Figura 5.55: Parâmetros de corrente e tensão das provas com regulação.

Tabela 5.29 : Parâmetros y fatores utilizados nas provas com regulação

Corrente (A)	Tensão (V)	Fator de regulação
185	18,5	25
		27
		30
		32

Para obter um melhor panorama do ocorrido a nível experimental, tem-se, a seguir, a Tabela 5.30, que compara visualmente a solda B14 sem regulação de parâmetros com as soldas realizadas com regulação de parâmetros, levando-se em conta os fatores de regulação ($f= 25, 27, 30, 32$). Note-se que é realçada a solda D6, uma vez que apresentou os melhores resultados para a estabilidade da transferência metálica.

Tabela 5.30: Comparação visual entre os cordões de solda, com e sem regulação de parâmetros.

Exp	Fator	Visual do cordão de solda
B14	Solda selecionada SRP	
D5	25	
D6	 27	
D7	30	
D8	32	

5.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO MODELO COM REGULAÇÃO DE PARÂMETROS

As equações da regra de regulação de parâmetros (Vide Equações 4.58, 4.61, 4.64 e 4.66, apresentadas anteriormente) foram implementadas em ambiente computacional Simulink, visando a introdução dos sinais de saída resultantes no modelo híbrido desenvolvido, para a regulação constante dos parâmetros em torno do tubo. A Figura 5.56, a seguir, apresenta um esquema de operação interativo entre a regra de regulação de parâmetros e o modelo do processo de soldagem GMAW-S proposto.

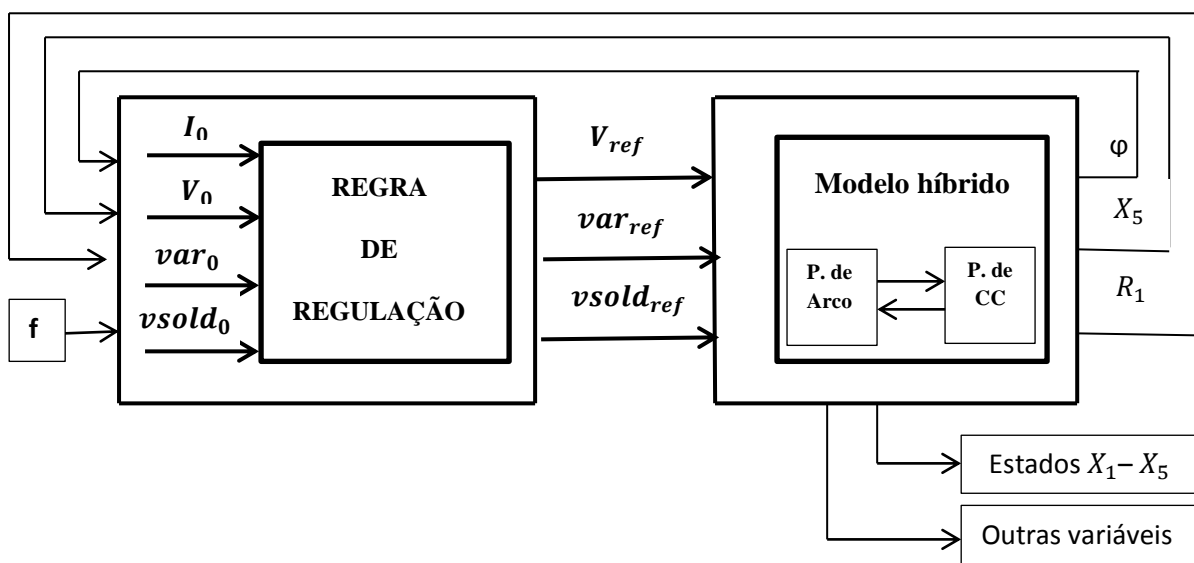


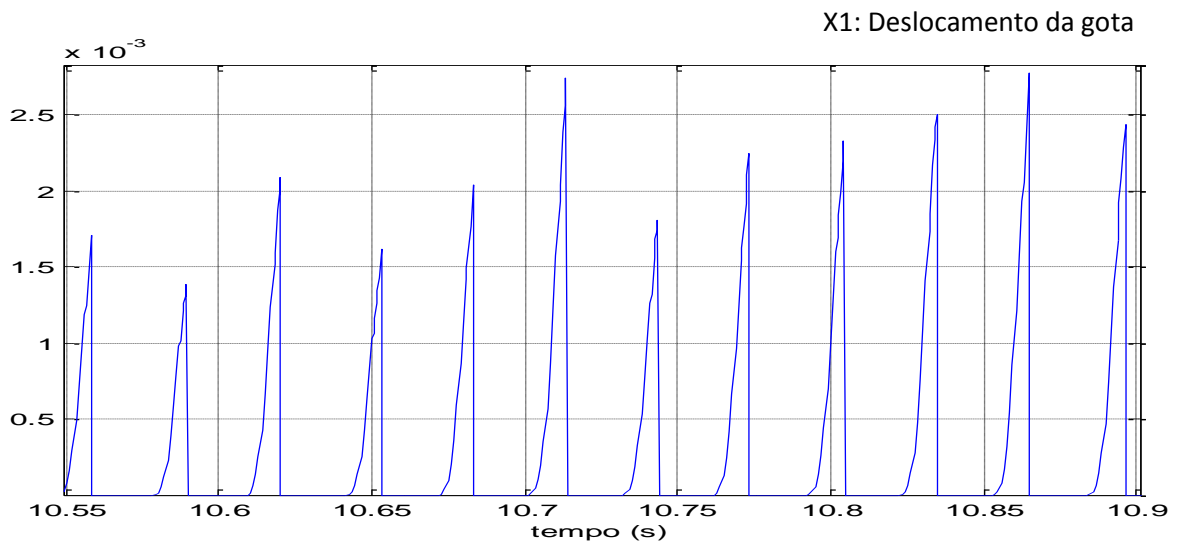
Figura 5.56: Funcionamento da regra de regulação como o modelo híbrido.

Dentro de cada caixa correspondente à regra da regulação e modelo híbrido, foram implementadas as equações que descrevem cada modelo (conforme foi apresentado no capítulo 4). Em cada uma delas foram identificados os parâmetros externos de entrada que devem ser fornecidos para o seu funcionamento.

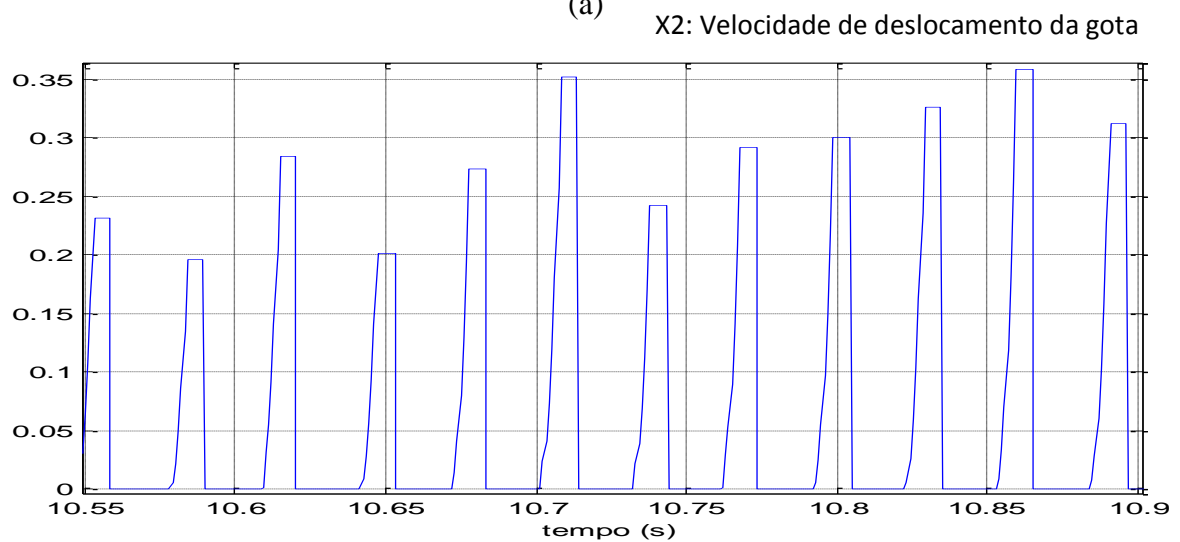
Faz-se importante salientar que a regra de regulação requer o constante conhecimento da evolução do ângulo de soldagem (ϕ), a massa da gota (m_g), e um dos raios principais da ponte metálica (R_1) gerados pelo modelo híbrido, a fim de estabelecer o comportamento das forças em cada etapa e, assim, determinar o valor dos parâmetros de referência tais como a tensão de soldagem (V_{ref}), velocidade de alimentação de arame (var_{ref}) e

velocidade de soldagem ($vsold_{ref}$). A partir dessas novas entradas, o modelo do processo GMAW-S gera a estimativa dos estados do qual é estudada a dinâmica de transferência de metal.

A figura 5.57 a seguir, apresenta a resposta dos estados com a aplicação a regra de regulação de parâmetros.

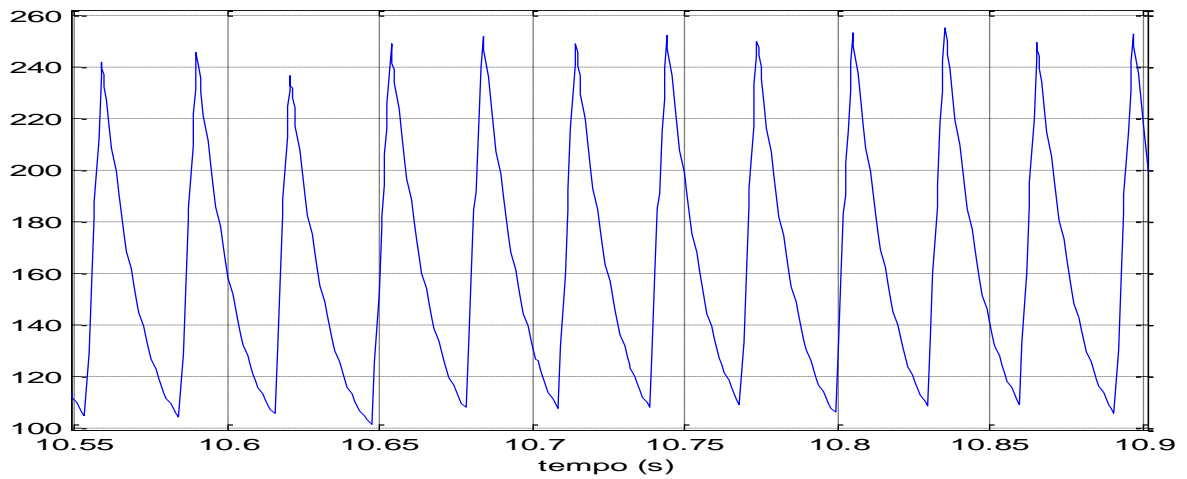


(a)



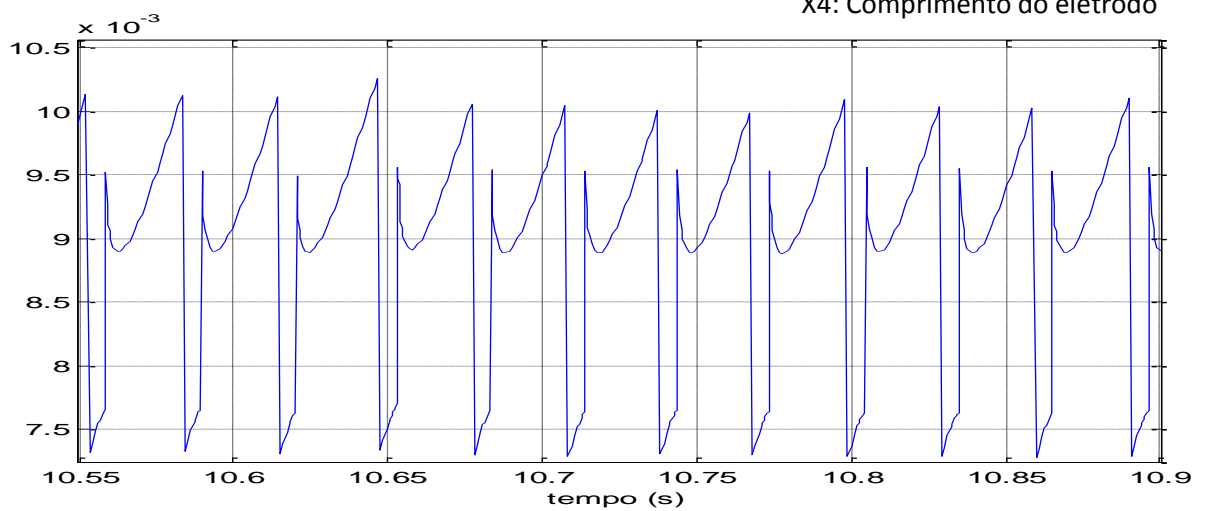
(b)

X3: Corrente de soldagem



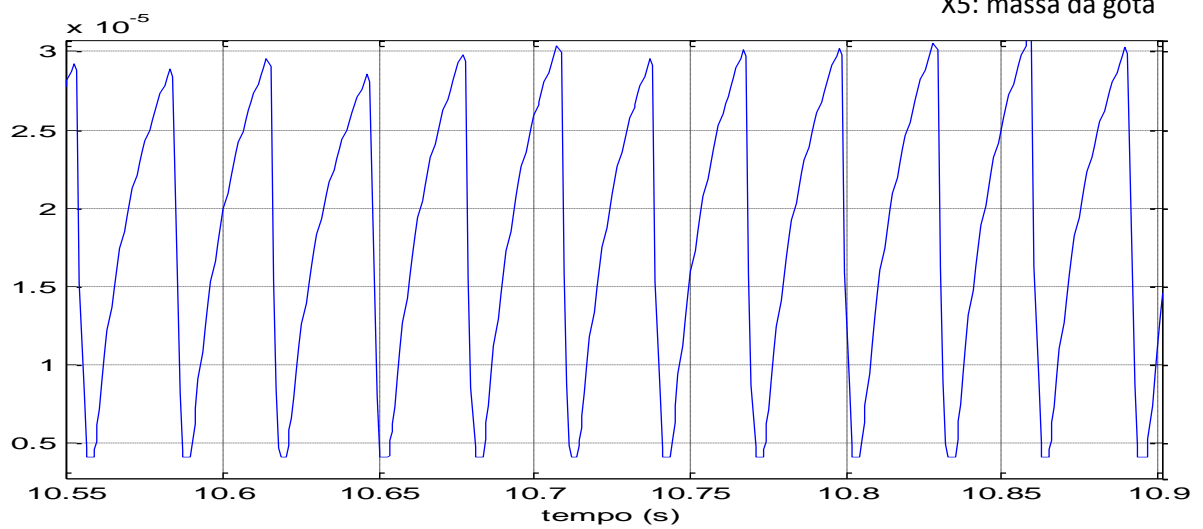
(c)

X4: Comprimento do eletrodo



(d)

X5: massa da gota



(e)

Figura 5.57: Estados do modelo híbrido com regulação de parâmetros, (a) X1, (b) X2, (c) X3, (d) X4, (e) X5.

6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A soldagem orbital tornou-se, nos últimos tempos, um tema de grande interesse pelas aplicações e contribuições à indústria para a união de dutos e tubulações – itens indispensáveis para o fornecimento e transporte de gases e líquidos. Porém, as informações disponíveis sobre a referida temática são limitadas, devido à dificuldade existente dos fenômenos físicos envolvidos. No entanto, conforme evidenciado no estado da arte, alguns autores concentraram seus esforços em estabelecer as melhores condições para a soldagem orbital, através do controle da estabilidade do arco e das características geométricas do cordão de solda, bem como do ajuste das variáveis a partir de técnicas estatísticas. Outros autores estudaram o destacamento da gota, que é considerada como parte importante da dinâmica do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). No entanto, as pesquisas existentes sobre este assunto se deram principalmente aos modos de transferência por voo livre, os quais foram posteriormente adaptados ao modo de transferência metálica por curto-circuito. Não obstante, foram encontradas em tais abordagens algumas irregularidades, uma vez que os modelos desenvolvidos foram fortemente influenciados pelos fenômenos que descrevem particularmente os modos de transferência de voo livre, e as modificações não foram suficientes para explicar o comportamento físico da transferência por curto-circuito. Tais peculiaridades conduziram ao desenvolvimento de um modelo híbrido que descreve o comportamento e a dinâmica da soldagem orbital no modo de transferência por curto-circuito, através da identificação e separação dos fenômenos envolvidos, tanto na etapa de formação e crescimento da gota (período de arco), quanto na fase de transferência de massa (período de curto-circuito).

O modelo proposto é conhecido por híbrido porque alterna consecutivamente dois estados que compõem o modo de transferência metálica por curto-circuito, que são referidos como período de arco e período de curto-circuito. O desenvolvimento do modelo exigiu um tratamento físico e matemático específico em cada fase, a fim de atender as necessidades particulares que abrangem os fenômenos envolvidos em cada situação. A mudança de um período para outro deu-se por uma série de condições impostas para indicar o início e o fim de uma fase.

No período de arco, a formação e o crescimento da gota ocorrem pela ação da fundição do eletrodo por efeito Joule e aquecimento ôhmico, que, adicionado aos aportes das forças gravitacionais e eletromagnéticas, fazem com que a gotícula atinja progressivamente a

distancia DBCP (Distância bico de contato peça), marcando o início do período de curto-circuito no qual se dá a transferência de metal para a poça de fusão após do estabelecimento da ponte metálica. A duração do período em questão é regida pela evolução de dois raios principais: R_1 e R_2 , que descrevem a geometria da ponte. No momento em que o raio R_1 tende a zero, a ponte é quebrada e o arco restabelecido. No entanto, este termo causou singularidades na hora da simulação do modelo, sendo necessário atribuir um valor mínimo fixado em 35×10^{-6} m para evitar este inconveniente.

A união dos modelos criados de forma independente para cada período deu origem ao modelo híbrido que descreve o comportamento dinâmico da gota, e permite estimar parâmetros de saída segundo os parâmetros de entrada (tensão de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame). O modelo foi representado por equações em espaço de estados, e a validação do mesmo fez-se via comparação dos sinais de corrente do modelo, com os sinais obtidos a partir dos experimentos de soldagem orbital realizados em condições normais de funcionamento, ou seja, sem regulação de parâmetros. A escolha dos parâmetros para a realização das provas experimentais foi feita cuidadosamente para garantir o modo de transferência por curto-circuito. Na Tabela 4.2, apresentada anteriormente, foi apresentado o conjunto de experimentos realizados na referida etapa, os quais foram utilizados tanto para o ajuste das constantes do modelo de acordo com o esquema apresentado anteriormente na Figure 5.1, como para sua posterior validação (vide Figuras 5.2 e 5.3). Tal procedimento mostrou que o modelo acompanha as mudanças dos sinais gerados pela variação dos parâmetros iniciais, além da localização dos seus resultados dentro da margem de erro permitida experimentalmente. No entanto, devido à alta complexidade dos fenômenos envolvidos na soldagem, e por causa das suposições para fins de modelagem, o modelo tem algumas limitações na representação fiel das instabilidades apresentadas durante o processo da soldagem orbital (curtos circuitos de curta duração, sem transferência de massa). Neste sentido, o estudo da estabilidade da transferência metálica foi realizado a partir dos sinais dos experimentos reais.

A configuração dos parâmetros para as provas de estabilidade de transferência foi apresentada anteriormente na Tabela 5.1, onde as características relativas à homogeneidade da ocorrência dos curtos-circuitos foram quantificadas através do índice de regularidade (IV_{CC}), da frequência de curto-circuito (F_{CC}), do índice de regularidade dos tempos de transferência (FL_T) e do período de formação e transferência da gota (T). Tais indicadores

foram extraídos a partir de vários estudos sobre a estabilidade da transferência [10-11], [16], [18-24], os quais evidenciaram como se deu a transferência de metal durante o processo; porém, a sua aplicação direcionou-se exclusivamente para eventos de soldagem em posição plana. Para tanto, foi necessário incluir certas variações a fim de aplicar os conceitos apresentados anteriormente sobre a soldagem orbital, uma vez que no mesmo processo, adotam-se diversas posições em torno do tubo (plana, vertical descendente e sobre cabeça), que alteram a deposição do material no mesmo (vide Figura 5.4). A análise e a comparação dos índices se deram para os sinais da mesma solda, que foi dividida por janelas, para estabelecer o comportamento e variação dos índices cada 20°, conforme apresentado anteriormente na Figura 5.5; ao contrário da soldagem em posição plana, onde as comparações se estabelecem entre soldas realizadas com diferentes parâmetros, uma vez que a posição de soldagem permanece constante durante todo o processo.

Os resultados concernentes à estabilidade da transferência de metal para os experimentos da soldagem orbital foram apresentados nas Figuras 5.30 - 5.37 e 5.38 – 5.45, para cada grupo de soldas feitas com a mesma velocidade de alimentação de arame 5,5 m/min e 6,0 m/min, respectivamente. Cada índice foi analisado de acordo com a premissa de conduta estabelecida, onde a partir da comparação dos padrões de comportamento e visuais da solda (vide Figuras 5.6 – 5.29), foram descartadas as soldas que mostraram maior instabilidade em relação às demais. Tal procedimento isola uma solda de cada grupo para nova análise e determinação dos parâmetros que geraram as melhores condições de estabilidade na transferência de metal, conforme observado na Figura 5.46. Aquele conjunto de parâmetros foi posteriormente empregado como dados de entrada para as simulações com o modelo híbrido. É preciso salientar que os resultados finais das soldas obtidas com os parâmetros selecionados foram bons, mas, os efeitos gravitacionais provocados pela variação do ângulo de soldagem (ϕ) geraram alterações na regularidade da transferência metálica que devem ser corrigidos ou melhorados. Este evento mostrou a necessidade da aplicação de uma regra de regulação de parâmetros, na procura da melhoria da qualidade da solda julgada a partir deste critério.

As simulações do modelo híbrido proposto, por meio dos parâmetros escolhidos e apontados anteriormente (vide Tabela 5.27), forneceram informações do comportamento da transferência metálica através da ilustração de eventos relacionados à formação e a transferência de gota que não podem ser observados diretamente, mas são absolutamente responsáveis pela qualidade final da solda. Na Figura 5.47, apresentada anteriormente,

entre os gráficos (a - e), tem-se os resultados obtidos para cada uma das equações de estado que constituem o modelo híbrido proposto. Faz-se importante recordar que no período de arco, o eletrodo se funde e recolhe material para formar a gota de metal, e com base no inciso (a) da figura em questão, foi possível observar que somente no final de tal período a gota sofre um pequeno deslocamento (X_1) a partir da ponta do eletrodo, indicando que, inicialmente, as linhas de corrente que passam através da gota convergem, gerando, assim, ângulos de condução negativos (θ) e, por conseguinte, a força eletromagnética se opõe ao destacamento da gota (J.-P. Planckaert, 2008), aliando-se com a direção da contribuição da tensão superficial, ocasionando em uma mudança no deslocamento quase imperceptível. Em seguida, com o aumento da acumulação de material, a zona de condução da gota se torna maior e as linhas de corrente divergem (vide Figura 4.6), gerando, assim, uma mudança na direção de contribuição da força eletromagnética, ao agir no sentido da força de gravidade, fazendo com que o deslocamento aumente progressivamente até o final da ocorrência do curto-circuito. No caso de a posição da cabeça, o panorama varia, uma vez que a força de gravidade irá sempre orientada para baixo, indicando que dita força apresenta uma contribuição em maior ou menor grau para o destacamento da gota da ponta do eletrodo, de acordo com a posição de soldagem (vide Figura 4.6 e 4.8).

Igualmente, a velocidade de deslocamento da gota (X_2) no estágio inicial tende para zero, uma vez que a gota não foi separada do eletrodo. No entanto, a partir da última fase do período do arco, X_2 acompanha o deslocamento e indica a velocidade de ocorrência do referido fenômeno, que aumenta continuamente até o final daquele período. Durante a transferência de massa no período de curto-circuito, a velocidade de deslocamento é constante, uma vez que a gota atingiu a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP), onde os efeitos do deslocamento X_1 são compensados pelos fenômenos que sugam o metal da ponte metálica para dentro da poça. Entretanto, a corrente de soldagem (X_3) diminui exponencialmente durante o período de arco, sustentando o comportamento típico esperado para este tipo de transferência (vide Figura 4.2); no período de curto-circuito, a corrente sobe rapidamente, causando maior fusão do eletrodo por efeito Joule – comportamento que influencia o comprimento do eletrodo (X_4), pela relação entre a taxa de fusão do mesmo com a intensidade da corrente de soldagem, conforme apresentado anteriormente na Equação 4.14. A evolução de X_4 é comandada pela relação entre a taxa de alimentação de arame (v_{ar}) e a taxa de fusão do eletrodo (M_R), o que indica que durante o período de arco $v_{ar} > M_R$, devido ao aumento do comprimento

do eletrodo e os baixos níveis de corrente que diminuem a velocidade de fusão do eletrodo (Jesper Sandberg Thomsen, 2005). Na fase subsequente, o aumento da corrente acrescenta a taxa de fusão do eletrodo. Portanto a velocidade à que se funde o eletrodo é maior do que a velocidade com que este se alimenta $v_{ar} < M_R$, razão pela qual não houve crescimento notório de X4. Conforme esperado, a massa da gota (X5) apresentou um crescimento constante até atingir o seu ponto máximo determinado pela tensão superficial F_γ , que se opõe ao destacamento da gota, que é influenciado pela ação de força gravitacional F_g , e eletromagnética F_{em} . Tais forças tendem a aumentar com o crescimento do tamanho da gota. No entanto, não ultrapassam a ação da tensão superficial até o momento do curto-circuito. O aumento de corrente ressalta a contribuição das forças de destacamento e, como a tensão superficial não o faz, o tamanho das gotículas diminui com o aumento da corrente. Nesta fase, como o metal é transferido para a poça de fusão pela ação da componente radial da força eletromagnética (efeito de Pinch) e a tensão de superfície da poça, a massa da gota diminui progressivamente (Nemchinsky, 1994).

Na Figura 5.49 apresentada anteriormente, foi observado que o comportamento dos parâmetros, tais como: a taxa de fusão do eletrodo (M_R), o comprimento de arco (l_a) e o volume da gota (V_g), acompanham a dinâmica da transferência metálica, ou seja, M_R no período de arco é menor em relação à mostrada no período de CC, o qual é suportado pela relação direta entre a corrente de soldagem e a velocidade de fusão do eletrodo sólido. E ainda, l_a e V_g apresentaram um comportamento inverso ao longo do ciclo de transferência, uma vez que o material derretido é aderido à gota, aumentando seu volume (vide relação observada anteriormente na Equação 4.26), e, portanto, diminui o comprimento do arco até atingir a sua extinção definitiva no momento em que a gota alcança seu volume máximo (Thomsen, 2005).

Uma vez que o modelo desenvolvido mostra-se autônomo na escolha do modo de funcionamento (arco ou CC), os padrões de variação foram definidos para indicar o início e fim de um período, e atuar em resposta à evolução dos estados gerados pelo modelo (X1-X5). A Figura 5.48, apresentada anteriormente, evidenciou tais parâmetros de mudança formados pelo comprimento efetivo (L_{ef}) e raio (R_1). O primeiro termo é representado pela Equação 4.25, apresentada anteriormente, e incrementa no período do arco pelos aportes do deslocamento da gota, a fração sólida do eletrodo e a sua fração derretida. Ao atingir a DBCP estabelecida experimentalmente em 12 mm, o modelo é gerenciado pelo

equacionamento do modo curto-circuito, onde o efeito da tensão superficial da poça de fusão e o empescoamento gerado pelo efeito Pinch na ponte metálica determinam a evolução do R_1 , e, assim, a duração da transferência metálica como tal (Bless, 1974).

O modelo também permitiu avaliar o comportamento das principais forças envolvidas no processo da transferência metálica. A força de gravidade (F_g) foi determinada pela estimativa da massa da gota (m_g), e o efeito gravitacional (g) que foi influenciado pela variação do ângulo de soldagem (φ) ao redor do tubo, conforme evidenciado anteriormente na Equação 4.1; suas contribuições em função do ângulo de soldagem foram expostas anteriormente na Figura 5.50, o que indica que a força de gravidade afeta em maior ou menor medida a separação da gota do eletrodo, de acordo com a posição de soldagem na qual se encontra localizada. A posição plana e sobre cabeça relataram em magnitude os maiores valores desta força, mas, agindo ao contrário. Tal fato se dá porque, inicialmente, a gravidade atua na direção perpendicular à peça de trabalho ($\varphi=0^\circ$), ou seja, no mesmo sentido do destacamento da gota; à medida que o ângulo de soldagem incrementa, a contribuição desta força diminui progressivamente – o escoamento da poça é mais provável pela pequena contribuição da força de gravidade (F_g) para a transferência da gota, apoiando, assim, os resultados encontrados por outros autores (Costa, 2012), (Cayo, 2013).

A modelagem da força eletromagnética (F_{em}) se deu a partir da Equação 4.8, apresentada anteriormente, que mantém relação com o comportamento da corrente de soldagem (X_3), o raio da gota (r_d) e o ângulo de condução (θ). A Figura 5.51, apresentada anteriormente, evidenciou uma possível representação gráfica desta força, onde não há alteração aparente com o ângulo de soldagem (φ). No entanto, tal mudança modifica as características geométricas da formação da gota, o que influencia a zona de condução e, portanto, a força eletromagnética. Não se tem certeza até que ponto o ângulo de soldagem (φ) pode intervir, mas não se pode descartar o fato de pequenas contribuições na mudança do comportamento, influenciado por variações do ângulo de soldagem.

Uma vez que as forças não podem ser visualizadas diretamente, e a bibliografia não relata comumente as características visuais deste tipo de fenômenos, o modelo híbrido propôs uma estimativa de seu comportamento com base no relacionamento físico e matemático apresentado na fase da modelagem (subcapítulos 4.1 – 4.4); porém, o modelo está sujeito a melhorias, a partir de estudo e tratamento mais profundo dos fenômenos complexos envolvidos no processo de soldagem. No entanto, tal conhecimento abre a porta para a

criação de diferentes ferramentas de controle na posteridade, visando melhorar a qualidade da solda, através da manipulação dos referidos fenômenos, que são, principalmente, responsáveis pelas irregularidades na soldagem orbital.

A partir da análise dos dados obtidos nas simulações e os resultados experimentais, surgiu a necessidade de aplicação de uma regra de regulação de parâmetros para melhorar a estabilidade da transferência de metal, e potencializar o conhecimento do comportamento dos fenômenos envolvidos na transferência metálica, a fim de reduzir os efeitos gravitacionais na soldagem orbital e melhorar a qualidade da solda.

A regulação de parâmetros segundo a posição de soldagem tem por base a premissa de que a transferência de massa deve ser regular em todos os ângulos. Para tanto, observaram-se as forças responsáveis pela transferência de metal para a poça (vide Equação 4.55), e foram relacionadas de modo que a sua contribuição mantenha os parâmetros de soldagem nos níveis adequados para cada posição em torno do tubo, obtendo como variável de controle a corrente de soldagem (vide Equação 4.58). Devido ao ajuste do referido parâmetro (I), fez-se necessário ajustar os outros parâmetros de soldagem (tensão, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame) a fim de manter as condições estáveis, uma vez que estes se encontram interligados pelo equacionamento apresentado anteriormente nas Equações 4.70, 4.72, 4.75. Tal regra propõe um ajuste incremental dos parâmetros em função de posição de soldagem, conforme evidenciado anteriormente na Figura 5.53, a fim de reduzir as possibilidades de escoamento da poça nas posições vertical descendente e sobre cabeça, e compensar os efeitos das forças, mantendo-as relativamente constantes durante o tempo de soldagem em todos os ângulos.

Os resultados experimentais com regulação de parâmetros evidenciaram melhorias na estabilidade da transferência metálica, conforme apresentado anteriormente na Figura 5.54, o que se refletiu na simetria da largura do cordão solda de acordo com os resultados visuais observados na Tabela 5.29, apresentada anteriormente. No entanto, a análise dos experimentos com a regra de regulação e o uso de fatores de atenuação (f) exploratórios (vide Figura 5.52), mostrou que sua escolha requer muita atenção, uma vez que a variação mínima gera grandes impactos na estabilidade da transferência, devido à geração de padrões de parâmetros inadequados para compensar as necessidades de certa região no tubo. Tal fato explica porque, mesmo aplicando a regulação de parâmetros, foram obtidos índices de instabilidade mais elevados do que sem a regulação dos mesmos. A redução e

escolha de um intervalo de regulação mais adequado mostraram melhorias significativas na estabilidade da transferência, por meio de um comportamento mais uniforme dos índices, que refletem corretamente as hipóteses levantadas para a conduta adequada de cada índice de estabilidade (IV_{CC} , F_{CC} , FL_T , T).

A aplicação da regra de regulação para modelo híbrido por meio do sistema de relacionamento apresentado anteriormente na Figura 5.55, evidenciou uma mudança no valor instantâneo de cada estado (vide Figura 5.56), ou seja, estes foram modificados de acordo com os requerimentos da posição de soldagem, levando-se em conta o comportamento das forças e a evolução da gota metálica. Este é suportado desde a janela análise (escolhida arbitrariamente), que corresponde à posição vertical descendente entre os ângulos $126,6^\circ$ e $130,8^\circ$, o que indica que, de acordo com os resultados de estabilidade, o número de curtos-circuitos deve aumentar para compensar o forte efeito gravitacional desta área, de modo que cada processo deve ocorrer mais rapidamente. Isto se reflete no aumento das velocidades de deslocamento da gota da ponta do eléctrodo (X1), bem como em um maior número de curtos-circuitos apresentados na mesma janela de análise. Enquanto isso, a corrente de soldagem (X3) aumentou ligeiramente, para seguir o comportamento da corrente de referência (I_{ref}) (vide Figura 5,53); por sua vez, o comprimento do eletrodo em estado sólido diminuiu para compensar os níveis mais elevados do deslocamento da gota mostrados em X1. A massa da gota também sofreu um ligeiro incremento pela relação com a corrente de soldagem, conforme indicado anteriormente nas Equações 4.21 e 4.49. Os possíveis motivos do comportamento apresentado pelas respostas do modelo explicitadas aqui, são somente hipóteses lançadas para fins de pesquisa; apenas o monitoramento detalhado do processo com câmaras de alta velocidade e o posterior processamento de imagens poderia confirmar ou invalidar tais hipóteses.

7 CONCLUSÕES

Diante do exposto, conforme os procedimentos adotados, os resultados obtidos e a análise destes, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- Desenvolveu-se um modelo matemático que representou o processo de soldagem GMAW (*Gás Métal Arc Welding*) no modo de transferência por curto-circuito, aplicado à soldagem orbital, por meio da representação do estado dos vários subsistemas que o compõem, aplicando-se a lei de Kirchoff, Lorentz Young-Laplace, o princípio de Bernoulli, a equação da continuidade de fluidos e os principais conceitos de geometria analítica.
- O processo GMAW-S foi modelado como um sistema híbrido, que alterna consecutivamente os períodos de arco e curto-circuito de forma autónoma, de acordo com a evolução das condições de mudança, que indicaram continuamente o conjunto de equações a serem aplicadas, uma vez que cada período foi modelado a partir de uma representação física e matemática específica que descreve exclusivamente os fenômenos envolvidos em cada caso. Tal fato permitiu a visualização de eventos relacionados à transferência de metal, que não podem ser adquiridos ou observados diretamente.
- O modelo permitiu reproduzir os valores médios da corrente em situações de transferência por curto-circuito, com pequenas variações em relação aos experimentos realizados sob as mesmas condições, o que significa que o modelo obteve sucesso em relação às alterações nos sinais produzidos pela variação dos parâmetros de entrada. No entanto, tal modelo, em sua forma atual, não simula o aparecimento de curtos-circuitos de curta duração nos oscilogramas simulados, o que se deve, principalmente, às suposições para fins da modelagem do processo de soldagem. Contudo, para as situações específicas de soldagem avaliadas, os resultados indicam que o modelo esteja simulando adequadamente o comportamento do processo GMAW-S.
- A estabilidade da transferência de metal nas provas experimentais foi analisada de acordo com a posição de soldagem (plana, vertical e descendente sobre cabeça), uma vez que, a partir dos resultados do modelo, estabeleceu-se que a soldagem orbital requer um comportamento específico dos parâmetros em cada zona do tubo,

a fim de compensar os efeitos gravitacionais produzidas pela geometria circular do mesmo.

- Foi desenvolvido um *software* em ambiente computacional *simulink*, onde foram avaliados os sinais experimentais, através de uma técnica janelamento, determinando o comportamento da transferência metálica na soldagem orbital.
- As comparações dos padrões de comportamento dos índices de estabilidade propostos no presente estudo permitiram determinar os parâmetros de soldagem (tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem) que geraram as melhores condições de estabilidade na transferência de metal ao longo do cordão de solda. No entanto, os referidos resultados apontam para a necessidade de mitigar os efeitos da variação da posição de soldagem, o que influenciou a busca de uma estratégia para melhorar a estabilidade na transferência de massa.
- Os resultados obtidos pelo modelo foram utilizados como ferramentas para a implementação de uma regra regulação de parâmetros, através da manipulação dos fenômenos identificados como responsáveis das irregularidades na soldagem orbital, o que permitiu melhorar a estabilidade da transferência metálica nas soldas experimentais, bem como a diminuição das decorrências da variação da posição de soldagem, após a aplicação da regra na planta experimental.
- A regulação ininterrupta dos parâmetros, de acordo com a posição de soldagem (ϕ), no percorrido de passe contínuo ao redor do tubo entre 0° e 180° , permitiu modificar gradualmente o nível atingido pelos parâmetros em cada zona (corrente, tensão, velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem), diminuindo a possibilidade da presença de irregularidades geradas por variações bruscas nos mesmos. No entanto, é importante identificar o nível apropriado de regulação para cada condição de soldagem, uma vez que uma pequena variação nos níveis atingidos pelos parâmetros é capaz de gerar impactos sobre a estabilidade da transferência de metal.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

No sentido de complementar os estudos aqui dissertados, faz-se a sugestão do tratamento dos seguintes aspectos, como possibilidade para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

- Utilização de câmeras de vídeo de alta velocidade para monitorar o processo GMAW-S.
- Processar as imagens obtidas do monitoramento, a fim de extrair os valores reais do comportamento da gota, o eletrodo e a ponte metálica, que permitam validar o modelo proposto e, se necessário, fazer ajustes.
- Introduzir aspectos mais complexos ao modelo na fase de curto-circuito, como, por exemplo, a formação do menisco no momento de contato entre a gota e a poça de fusão, para simular a presença de curtos-circuitos, com e sem transferência de massa.
- Fazer a análise da estabilidade da transferência metálica com a utilização de chanfro.
- Incluir a modelagem da poça de fusão.
- Quantificar os curtos-circuitos incipientes e apresentar os histogramas de variação correspondentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjo, G., e Claesson, I. (1999). On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Research*, 59–74.
- Amson, J. C. (1965). Lorentz force in the molten tip of an arc electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 16, 1169–1179.
- Barborak, D., Conrardy, C., Madigan, B., e Paskell, T. (1999). “Through-arc” process monitoring techniques for control of automated gas metal arc welding. *IEEE International Conference on Robotics & Automatio*, (May), 3053–3058.
- Bazargan Lari, Y., Eghtesad, M., Assadsangabi, B., e Bazargan Lari, R. (2008). MIMO Stabilization of Pulsed Gas Metal Arc Welding Process via Input-Output Feedback Linearization Method By Internal Dynamics Analysis. *Applied Sciences*, 4561–4569.
- Beard, K., e Chuang, C. (1987). A New Model for the Equilibrium Shape of Raindrops. *Journal of Atmospheric Sciences*, 44(11), 1509–1524.
- Bingul, Z, e Cook, G. E. (1999). Dynamic modeling of GMAW process. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4(May), 3059–3064.
- Bingul, Zafer, e Cook, G. E. (2006). A Real-Time Prediction Model of Electrode Extension for GMAW. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronic*, 11(1), 47–54.
- Bingzhe, J., Wenhuan, L., e Ohshima, K. (1995). Control of weld pool width and cooling rate in circumferential GTA welding of a pipe by using neural network model. *IEEE Conference on Industrial Automation and Control Emerging Technology Applications*, 41–46. doi:10.1109/IACET.1995.527537
- Bless, S. (1974). Drop transfer in short-circuit welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 7, 526–539.

- Boselli, M., Colombo, V., Ghedini, E., e Sanibondi, P. (2011). Time-Dependent Modeling of Droplet Detachment in GMAW Including Metal Vapor Diffusion. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(11), 2896–2897. doi:10.1109/TPS.2011.2149544
- Burleigh, T. D., e Eagar, T. W. (1983). Measurement of the Force Exerted by a Welding Arc. *Metallurgical Transactions*, 14(June), 1223– 1224.
- Carneiro, G., Liskévych, O., Vilarinho, L. O., e Scotti, A. (2011). Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG / MAG por Curto-Circuito. *Soldagem & Inspeção*, 16(2), 98–103.
- Cayo, E. H. (2013). *Modelagem e Controle da Soldagem Orbital Através do Processo GMAW-S*. Universidade de Brasília.
- Choi, H., Lee, Y., e Yoo, D. (2001). Simulation of Dynamic Behavior in a GMAW System. *Welding Research*, 239–245.
- Chu, Y. X., Hu, S. J., Hou, W. K., Wang, P. C., e Marin, S. P. (2004). Signature Analysis for Quality Monitoring in Short-Circuit GMAW. *Welding Research*, 336–343.
- Costa, T. (2012). Soldagem Orbital Ascendente e Descendente com Processo MIG / MAG Curto-Circuito em Dutos em Aço Carbono de Pequeno Diâmetro. *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia*. UBERLÂNDIA.
- Dobignies, A. A. (2008). *Estudo do Rendimento de Deposição de Material na Soldagem MIG/MAG em Condições de Transferência Metálica por Curto-Circuito Forçado*. *Dissertação*. Universidade Federal do Paraná.
- Doodman, A. T. (2010a). The study on the drop detachment for automatic pipeline GMAW system: free flight mode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 137–147. doi:10.1007/s00170-010-2515-8
- Doodman, A. T (2010b). The study on the drop detachment for automatic pipeline GMAW system: short-circuit mode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 149–161. doi:10.1007/s00170-010-2690-7

- Doodman, A. T. (2010). Neutralizing the effect of the angle variations on the drop detachment in automatic GMAW system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54, 123–137. doi:10.1007/s00170-010-2912-z
- Dutra, J. C., Baixo, C. E., e Ollé, L. F. (1995). Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. *XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem- ENTS*, 867–902.
- Eagar, T. W. (1982). Physics of Arc Welding. *Conf. Physics in Steel industry*, 84, 272–285. doi:10.1063/1.33540
- Eghtesad, M., Bazargan-lari, Y., e Assadsangabi, B. (2008). Stability analysis and internal dynamics of MIMO GMAW process. *17th World Congress The International Federation of Automatic Control IFAC*, 14834–14839.
- ESAB. (2004). *Soldagem de Tubulações*. (C. Fortes e J. R. Domingues, Eds.) (pp. 1–158). Brasil.
- ESAB. (2005a). Solução.
- ESAB. (2005b). Soldagem MIG / MAG. (C. Fortes e C. Turani Vaz, Eds.). Brasil.
- Ferreira Costa, T. (2011). *Aplicação de Processos MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado na Soldagem de Dutos de Aço Carbono*. Universidade Federal de Uberlândia.
- Fronius. (2006). TransSynergic 4000 / 5000 TransPuls Synergic 2700 TransPuls Synergic 3200 / 4000 / 5000 TIME 5000 Digital. *FRONIUS INTERNATIONAL GMBH*. Fronius Internacional GMBH. Retrieved from www.fronius.com
- Fronius. (2008). ROB 4000 / 5000 MIG / MAG ROB 5000 OC MIG / MAG. Fronius International GmbH.
- Fronius. (2010). Orbital welding facts. Fronius International GmbH. Retrieved from www.fronius.com

- Gomes, E. B. (2006). *Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi*. Universidade Federal de Itajubá.
- Gonçalves, H., Dutra, J. C., e Gohr, R. (2008). Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG / MAG por Curto- Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura . Parte 3 de 3 : Princípios dos Sistemas MIG / MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. *Soldagem & Inspeção*, 13(1), 70–81.
- Haidar, J. (1998). An analysis of the formation of metal droplets in arc welding. *Applied Physics Letters*, 31, 1233–1244. Retrieved from (<http://iopscience.iop.org/0022-3727/31/10/015>)
- Hermans, J., e Ouden, G. DEN. (1999). Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Research*, 137–141.
- Hu, J., & Tsai, H. L. (2006). Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5-6), 833–846. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025
- Huang, Y., Shao, Y., e Zhang, Y. M. (2012). Nonlinear Modeling of Dynamic Metal Transfer in Laser-Enhanced GMAW. *Welding Research*, 91(May), 140–s – 148–s.
- Huang, Y., e Zhang, Y. M. (2010). Laser-Enhanced GMAW ABSTRACT. *Welding Research*, 89, 181–188.
- Jones, L A, Mendez, P., Weiss, D., e Eagar, T. W. (1997). Dynamic Behavior of Gas Metal Arc Welding. *9th Annual Conference on Iron and Steel Technology* (p. 16). Pohang, Korea.
- Jones, L. a, Eagar, T. W., e Lang, J. H. (1998a). A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(1), 107–123. doi:10.1088/0022-3727/31/1/014

- Jones, L. a, Eagar, T. W., e Lang, J. H. (1998b). Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(1), 93–106. doi:10.1088/0022-3727/31/1/013
- Jones, Lawrence A, Eagar, T. W., e Lang, J. H. (1996). The Temporal Nature of Forces Acting on Metal Drops in Gas Metal Arc Welding. *Fourteenth Symposium on Energy Engineering Sciences*. Argonne.
- Kim, Y, McEligot, M., e Eager, W. (1991). Analyses of Electrode Heat Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Research*, 20–31.
- Kim, Y-s, e Eagar, T. W. (1993). Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Research*, 269–278.
- Labanda, G. R. (2005). *Desarrollo de un Sistema Interactivo de Gestión Integral de Parámetros de Influencia en Procedimientos de Soldadura Robotizada para Procesos de Soldeo por Arco Eléctrico con Protección de Gas, MIG/MAG y TIG*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Lancaster, J. F. (1984). The Physics of Welding. *Physics in Technology*, 15, 73–79.
- Liao, G., e Xi, J. (2009). Pipeline Weld Detection System Based on Machine Vision. *Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems* (pp. 325–328). Ieee. doi:10.1109/HIS.2009.279
- Lim, B. (2006). Derivation of the Shape of Raindrops. *School of Applied and Engineering Physics*, 1–15.
- Lima, E., e Scotti, A. (2003). Avaliação cinemática e elétrica da transferência metálica na soldagem MIG/MAG. *13 POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*.
- Lima II, E. J., Fortunato Torres, G. C., Felizardo, I., Ramalho Filho, F., e Bracarense, A. Q. (2005). Development of a robot for orbital welding. *Industrial Robot: An International Journal*, 32(4), 321–325. doi:10.1108/01439910510600182

- Lincoln Electronic. (2006). *GMAW Welding Guide*. (J. Nadzam, Ed.). Retrieved from www.lincolnelectric.com
- Liskevych, O., e Scotti, A. (2012). Adaptação do Cálculo da Frequência de Destacamento das Gotas para Índice de Regularidade da Transferência Metálica em MIG / MAG por Curto - circuito. *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica universidade Federal de Uberlândia* (pp. 1–4). Uberlândia.
- Marques, P. V. (2002). *Tecnologia da Soldagem* (1ra Reimpr., pp. 1–352). Belo Horizonte - Brasil: Editora O LUTADOR”.
- Mendes, K., e Ferraresi, V. (n.d.). Determinação dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de Alumínio. *Universidade Federal de Uberlândia*. Uberlândia, MG.
- Modenesi, P., Matilde, S., Cançado, G. L., e Duarte de Melo, C. (2012). Um Programa de Computador para Simular Alguns Aspectos Operacionais da Soldagem MIG / MAG. *Soldagem & Inspeção*, 17, 32–39. doi:p.032-039
- Modenesi, P.J., e Reis, R. I. (2007). A model for melting rate phenomena in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1-3), 199–205. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.01.022
- Modenesi, Paulo J, e Bracarense, A. Q. (2007). *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais* (pp. 1–146). Belo Horizonte.
- Modenesi, Paulo J, e Bracarense, A. Q. (2011). *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais* (pp. 1–158). Belo Horizonte.
- Modenesi, Paulo J, Monteiro de Souza, M. C., Santana, I. J., e Berganholi, J. P. P. (2011). Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito. *Soldagem & Inspeção*, 16(1), 12–21.
- Moore, K. L., Naidu, D. S., Yender, R., & Tyler, J. (1997). Gas Metal Arc Welding Control : Part I - Modeling and Analysis. *2nd World Congrees of Nonlinear Analysis*, 30(5), 3101–3111.

- Moore, K., Yender, R., Tyler, J., e Naindu, D. (1998). Modeling, Calibration, and Control-Theoretic Analysis of the GMAW Process. *American Control Conference* (pp. 1747–1751). Philadelphia, Pennsylvania.
- Naindu, D. S., Ozcelik, S., e Moore, K. L. (2003). *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding* (First edit., pp. 1–347). Kidlington, Oxford: Elsevier Science Ltd.
- Nascimento, L. D. (2007). *Sincronização, captura e análise de imagens da poça de soldagem no processo GMAW convencional, no modo de transferência metálica por curto-circuito. Dissertação*. Universidad de Brasília.
- Nemchinsky, V. (1994). Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27, 1433–1442.
- Nemchinsky, V. (1996). The effect of the type of plasma gas on current constriction at the molten tip of an arc electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29, 1202–1208.
- Norrish, J. (1992). *Advanced Welding Processes*. (J. W. Nottingham e D. A. Worcester, Eds.) (pp. 1–373). London: IOP Publishing Ltd.
- Novais, P. R. de S. (2010). Avaliação das Principais Descontinuidades Encontradas nas Juntas Soldadas , Causas e Possíveis Soluções . *Congreso Latino-Americano Da Construção Metálica* (pp. 1–17). São Paulo – Brasil.
- Pharris, T. C., e Kolpa, R. L. (2007). *Overview of the Design , Construction , and Operation of Interstate Liquid Petroleum Pipelines* (pp. 1–93). Chicago: Argonne National Laboratory. Retrieved from <http://www.osti.gov/bridge>
- Planckaert, J., Djermoune, E., Brie, D., Briand, F., e Richard, F. (2007). Metal transfer characterization with an active contour algorithm in MIG / MAG welding movies one. *3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering* (pp. 933–938). Scottsdale, AZ, USA.
- Planckaert, J.P. (2008). *Modélisation du soudage MIG / MAG en mode short-arc*. Nancy université.

- Planckaert, J.P., Djermoune, E.-H., Brie, D., Briand, F., e Richard, F. (2010a). Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies. *Applied Mathematical Modelling*, 34(4), 1004–1020. doi:10.1016/j.apm.2009.07.011
- Resende, A. (2007). *Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Santana, I. J. (2010). *Modelamento Matemático do processo de soldagem GMAW*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Scotti, A. (2008). A Portrait of the Welding Research in Brazil. *Soldagem & Inspeção*, 13(2), 160–164.
- Shiwei, Z., Jianping, H., Fuxin, W., & Feng, X. (2011). Modeling and Simulating of Short-Circuiting Transferring in GMAW. *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring* (pp. 463–466). Ieee. doi:10.1109/CDCIEM.2011.278
- Silva, M. E. (2006). *Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular utilizando as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente*. Universidade Federal de Itajubá.
- Silva, R. H. G. (2005). *Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Simpson, S. W., e Zhu, P. (1995). Formation of molten droplets at a consumable anode in an electric welding arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 28, 1594–1600. Retrieved from (<http://iopscience.iop.org/0022-3727/28/8/008>)
- Souza, D. (2010). *Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana*. Universidade Federal de Uberlândia.
- Souza, D., Lemos, M., Keocheguerians, F., Castanheira, V., Oliveira, L., Vilarinho, L e Scotti, A. (2011). Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a

Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG / MAG por Curto-Circuito. *Soldagem & Inspeção*, 16(2), 114–122.

Terasaki, H., e Simpson, S. W. (2006). Circuit simulation for gas metal arc welding system. *The 47th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems MWSCAS 04*, 3, 387–390.

Thomsen, Jesper S. (2005). Feedback Linearization Based Arc Length Control for Gas Metal Arc Welding. *American Control Conference*, (pp. 3568–3573). Portland, OR, USA: Ieee. doi:10.1109/ACC.2005.1470527

Thomsen, Jesper Sandberg. (2005). *Advanced Control Methods for Optimization of Arc Welding*. Aalborg University.

Tolle, C. R., Laviolette, R. A., Smartt, H. B., Kenney, K. L., Pace, D. P., John, W., Watkins, A. D., et al. (2002). Is there evidence of determinism in droplet detachment within the gas metal arc welding process? *6th International Conference on Trends in Welding Research* (pp. 5–10).

Waszink, H., e Graat, L. H. J. (1983). Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal. *Welding Research*, (April), 108–116.

Wêglowski, M. S., Huang, Y., e Zhang, Y. M. (2008). Effect of welding current on metal transfer in GMAW. *Archives of Materials Science and Engineering*, 33(1), 49–56.

APÊNDICES

A - MODELO HÍBRIDO

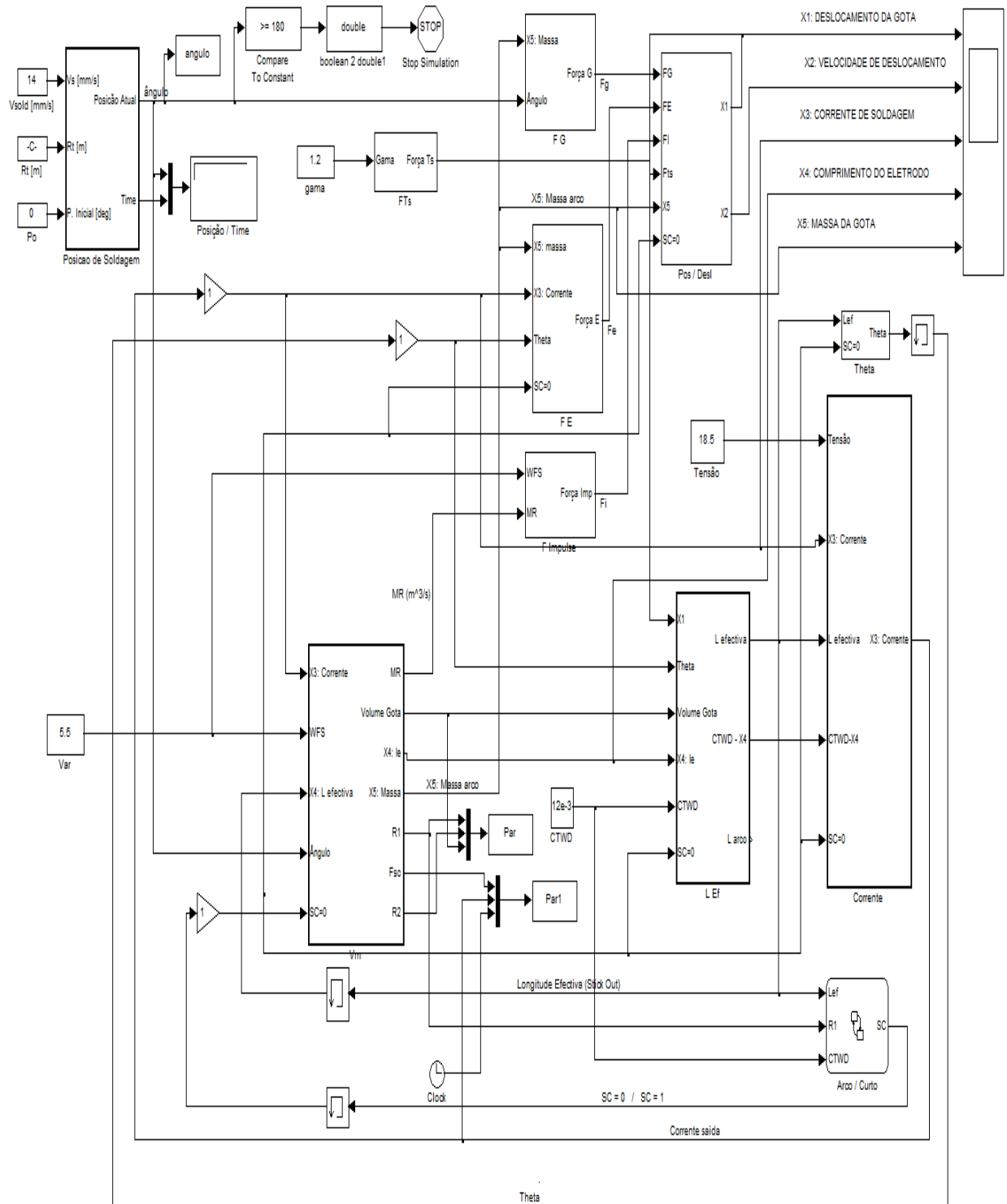


Figura A1: Modelo híbrido em *simulink*.