

Renan Medeiros Kindermann

SOLDAGEM ORBITAL DO PASSE DE RAIZ – ALGORITMOS PARA CONTROLE ADAPTATIVO POR MEIO DE SENSORIAMENTO LASER

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da
UFSC.

Kindermann, Renan

Soldagem Orbital do Passe de Raiz : Algoritmos para
Controle Adaptativo por Meio de Sensoriamento LASER /
Renan Kindermann ; orientador, Jair Carlos Dutra ;
coorientador, Regis Henrique Gonçalves e Silva. -
Florianópolis, SC, 2016.

172 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem Robotizada. 3.
Sensor LASER. 4. Soldagem adaptativa. 5. União de tubos.
I. Dutra, Jair Carlos. II. Gonçalves e Silva, Regis
Henrique. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Renan Medeiros Kindermann

SOLDAGEM ORBITAL DO PASSE DE RAIZ – ALGORITMOS PARA CONTROLE ADAPTATIVO POR MEIO DE SENSORIAMENTO LASER

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 18 de agosto de 2016.



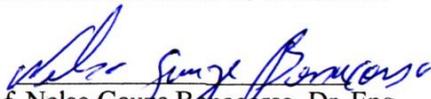
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

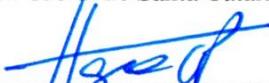


Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

p/ 
Prof. Américo Scotti, PhD.
Universidade Federal de Uberlândia



Prof. Nelso Gauze Bonaccorso, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Norton Zanette Kejelm, Dr. Eng.
PETROBRAS / CENPES / PDEP / TMEC

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, à Agência Nacional do Petróleo e Gás (ANP) e ao povo brasileiro;

Ao meu orientador Prof. Jair Carlos Dutra e coorientador Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva pela orientação neste e outros trabalhos conduzidos no LABSOLDA;

Ao Felipe Kalil Mendonça pela ajuda nos ensaios práticos e desenvolvimento dos algoritmos;

Ao Dr. Eng. Raul Gohr Junior pelo auxílio e orientação;

Ao Marcelo Okuyama pela ajuda na parte de imagens e filmagens em alta velocidade;

A todos os bolsistas de graduação e pós-graduação do LABSOLDA que contribuíram para a realização deste trabalho;

À minha família, em especial à minha mãe;

À minha namorada Rafaela.

Se você quer chegar rápido, vá sozinho. Mas, se você quer ir longe, vá acompanhado.

Provérbio africano

RESUMO

O passe de raiz é o procedimento mais difícil de automatizar na soldagem de dutos. Esta dificuldade se relaciona ao complexo controle da penetração na raiz da solda, quando não se utiliza dispositivos de sustentação da poça de fusão (cobre-junta ou *backings*). O estado de penetração se altera principalmente devido à variação da abertura da raiz (*gap*) e com relação às diferentes posições de soldagem. Para maior controle da penetração utiliza-se a soldagem manual, que, no entanto, é caracterizada por ser de baixa produção e repetitividade. Como forma de automatizar o passe de raiz na soldagem orbital, o presente trabalho propõe um sistema robótico com um controle adaptativo utilizando um sensor LASER. O sensor imita a observação da junta realizada pelo soldador, fornecendo a medida da abertura da raiz e o alinhamento central da junta para um computador. Para cada condição característica de abertura da raiz e de posição de soldagem, parâmetros de soldagem foram determinados como forma de emular o movimento do soldador na junta e as suas correções na fonte de soldagem. Os parâmetros alimentam um banco de dados no computador. Os algoritmos realizam uma análise de regressão para calcular a correção dos parâmetros de soldagem em tempo real. O controle adaptativo foi experimentalmente validado em tubos que apresentavam uma faixa de variação da abertura de raiz de aproximadamente 1 a 5 mm. Os resultados da solda do passe de raiz foram avaliados segundo normas técnicas, mostrando a efetividade do sistema em compensar a variação da abertura da raiz nas posições de soldagem avaliadas.

Palavras-chave: soldagem robotizada, curto-circuito controlado, sensor LASER, soldagem adaptativa, união de tubos.

ABSTRACT

Root pass is the most difficult procedure to full automate orbital welding of pipelines. This difficulty is due to complex penetration control required in weld root, when one does not employ mechanisms to support weld puddle (backings). Penetration state primarily changes owing root gap variation and different welding positions. For better penetration control, manual welding is more suitable, which has, however, low production and repeatability rates. To automate root pass, this paper proposes a robotic welding system with an adaptive control using a laser sensor. The sensor mimics observation of weld seam geometry done by welders, providing a measure of root gap and weld seam alignment for a computer. For each individual root gap and welding position, welding parameters were determined as a means to emulate welder's torch movement and parameter correction of a micro processed power source. The parameters feed a database on a computer. Algorithms perform a regression analysis to recalculate welding parameters in real time. Adaptive control has been experimentally validated in pipe specimens with root gap variation from 1 up to 5 mm. Welding results were in accordance with technical standards, showing system effectiveness to compensate changes in root gap in all approached welding positions.

Keywords: robotic welding, controlled short circuit, laser sensor, adaptive welding, pipeline welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação da soldagem do passe de raiz em duto, em que a linha pontilhada descreve a junta antes da solda	29
Figura 2. Posicionamento dos dutos para execução da soldagem orbital no compartimento branco, com destaque para o método de sustentação do tubo	30
Figura 3. Representação esquemática de um cobre-junta, antes (esquerda) e depois da solda do passe de raiz (direita).....	31
Figura 4. Vista geral do procedimento de soldagem do passe de raiz de forma manual com o processo TIG (esquerda) e aspecto superficial do passe de raiz (direita)	32
Figura 5. Vista geral do procedimento de soldagem de dutos com o processo eletrodo revestido na posição de soldagem sobre-cabeça	33
Figura 6. Mecanização da soldagem orbital de dutos de grande diâmetro com um manipulador linear controlado por <i>joystick</i> ...	34
Figura 7. Concepção do robô articulado com 6 graus de liberdade para soldagem de dutos em campo	35
Figura 8: Ilustração da transferência metálica no processo MIG/MAG convencional, adaptado de <i>Cuiuri [27]</i>	40
Figura 9: Forma de onda da corrente e da tensão do processo CCC e filmagem de alta velocidade da transferência metálica...	43
Figura 10. Efeito da gravidade sobre a poça de fusão na soldagem orbital, adaptado de <i>Magoley [35]</i>	45
Figura 11. Estados de penetração do metal de solda no passe de raiz relacionados à variação da posição de soldagem	46
Figura 12. Estados de penetração do metal de solda no passe de raiz relacionados à variação da abertura da raiz	47
Figura 13: Classificação dos sensores para soldagem a arco, segundo a norma DVS 0927-1 [39].....	48
Figura 14: Características da aquisição de imagens com um sensor óptico passivo: posição do arame (linha azul vertical), posição da junta (linha rosa vertical), largura da poça de fusão (linha vermelha horizontal) e centro do arco calculado (ponto verde) com relação à ponta do arame (linha verde) [48]	50
Figura 15: Espectro de luz durante a soldagem a arco (u.a. = unidade arbitrária) [51].....	51
Figura 16: Técnica da triangulação óptica com um feixe LASER [58]	52

Figura 17:	Ilustração do funcionamento de um sensor óptico tipo “folha de luz” e seus parâmetros característicos [57, 58]	53
Figura 18:	Ilustração do funcionamento de um sensor LASER tipo “ <i>scanner</i> ” e seus principais componentes [39]	54
Figura 19:	Perfil de uma junta “V” calibrado no sistema de coordenadas bidimensional do sensor LASER e algumas das informações geométricas da junta disponibilizadas	55
Figura 20:	Seguimento de junta utilizando o <i>tracking point</i> do sensor LASER	56
Figura 21:	Primeira concepção da bancada de ensaios para soldagem de tubos com um robô antropomórfico	57
Figura 22:	Simulação da bancada de ensaios em ambiente virtual com a localização dos sistemas de coordenadas e rotação dos eixos do braço robótico	59
Figura 23:	Projeto do novo suporte da tocha e do cabeçote de medição para soldagem em chapas (esquerda) e tubos (direita) .	60
Figura 24:	Segunda concepção da bancada de ensaios para soldagem de tubos com um robô antropomórfico	60
Figura 25:	Variáveis de movimentação do robô em uma vista geral da tocha e do corpo de prova (esquerda) e de uma vista superior do plano de tecimento (direita)	62
Figura 26:	Geometria de uma junta “V” padrão com o passe de raiz aplicado de forma manual [67].....	63
Figura 27:	Chanfro em “V” com nariz (esquerda) e sem nariz (direita)	64
Figura 28:	Oscilograma de corrente e tensão do processo CCC no programa sinérgico com $v_a = 3,3 \text{ m/min}$ (gráfico de cima) e com a forma de onda tipo A (gráfico de baixo).....	65
Figura 29:	Histogramas da frequência de curto-circuito para o processo CCC sinérgico (esquerda) e para a forma de onda tipo A (direita)	66
Figura 30:	Comparação entre os valores médios da corrente, tensão e potência para o processo CCC na versão sinérgica e na forma de onda A	67
Figura 31:	Oscilograma de corrente e tensão do processo STT e CCC com $v_a = 5 \text{ m/min}$	68
Figura 32:	Histogramas da frequência de curto-circuito para o processo CCC sinérgico (esquerda) e para a forma de onda tipo B (direita)	69
Figura 33:	Leitura da abertura da raiz durante a soldagem do tubo	70

Figura 34:	Perfuração da solda em um passe de raiz de duto com as variáveis de movimentação e elétricas constantes.....	71
Figura 35:	Macrografias da soldagem do passe de raiz em um duto com as variáveis de soldagem constantes, ataque: Nital 10 %	71
Figura 36:	Algoritmos para condicionamento do sinal da abertura da raiz	72
Figura 37:	Filtragem do sinal da abertura da raiz fornecido pelo cabeçote de medição LASER durante uma solda do passe de raiz com uma abertura média calculada de $2,20 \pm 0,64 \text{ mm}$	73
Figura 38:	Vista do posicionamento do sensor LASER e da tocha de soldagem ajustados para a posição plana	75
Figura 39:	Rotação da mesa posicionadora do robô para a soldagem fora de posição: vertical descendente (esquerda) e sobre-cabeça (direita)	76
Figura 40:	Dimensões do corpo de prova em <i>mm</i> (esquerda) e geometria do chanfro (direita)	77
Figura 41:	Seção transversal do passe de raiz e definições geométricas em duas situações: uma com saliências do metal de solda (esquerda) e outra com reentrâncias (direita)	78
Figura 42:	Parametrização da velocidade de arame (v_A)	80
Figura 43:	Parametrização da velocidade de soldagem (v_S) ..	80
Figura 44:	Parametrização da amplitude de tecimento (A) ..	81
Figura 45:	Parametrização do tempo de parada (tp).....	82
Figura 46:	Resultado da solda na posição plana com um resultado de medição da abertura da raiz de $1,00 \pm 0,39 \text{ mm}$	82
Figura 47:	Resultado da solda na posição vertical descendente com um resultado de medição da abertura da raiz de $0,97 \pm 0,47 \text{ mm}$	83
Figura 48:	Resultado da solda na posição sobre-cabeça com um resultado de medição da abertura da raiz de $0,88 \pm 0,18 \text{ mm}$	84
Figura 49:	Resultado da solda na posição plana com um resultado de medição da abertura da raiz de $1,99 \text{ mm} \pm 0,31 \text{ mm}$	85
Figura 50:	Resultado da solda na posição vertical descendente com um resultado de medição da abertura da raiz de $1,82 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$	86
Figura 51:	Resultado da solda na posição sobre cabeça com um resultado de medição da abertura da raiz de $2,11 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$	87

Figura 52:	Resultado da solda na posição plana com um resultado de medição da abertura da raiz de $4,63 \text{ mm} \pm 0,31 \text{ mm}$	88
Figura 53:	Resultado da solda na posição vertical descendente com um resultado de medição da abertura da raiz de $4,63 \text{ mm} \pm 0,22 \text{ mm}$	89
Figura 54:	Resultado da solda na posição sobre-cabeça com um resultado de medição da abertura da raiz de $4,71 \text{ mm} \pm 0,57 \text{ mm}$	90
Figura 55:	Macrografias da solda do passe de raiz para diferentes aberturas de raiz (a) e posições de soldagem, ataque: Nital 10 %	91
Figura 56:	Diagrama de blocos para ilustrar a integração e comunicação do sistema para soldagem adaptativa.....	93
Figura 57:	Gráfico com a relação de v_y em função do tempo de parada	96
Figura 58:	Ilustração da divisão da trajetória orbital em trechos	96
Figura 59:	Tela principal do programa para soldagem adaptativa	97
Figura 60:	Ilustração das variáveis relativas à trajetória do robô no sistema de soldagem adaptativa.....	98
Figura 61:	Ilustração da etapa inicial de procura de junta utilizando o cabocete de medição LASER.....	99
Figura 62:	Ilustração esquemática da varredura inicial	100
Figura 63:	Ilustração esquemática da tocha posicionada no início da junta	101
Figura 64:	Tela secundária do programa para soldagem adaptativa com as variáveis de soldagem do banco de dados ...	101
Figura 65:	Interpolação da amplitude de tecimento para diferentes aberturas da raiz e posições de soldagem.....	104
Figura 66:	Interpolação da velocidade de soldagem (v_s) para diferentes aberturas da raiz e posições de soldagem.....	105
Figura 67:	Interpolação do tempo de parada (tp) para diferentes aberturas da raiz e posições de soldagem.....	107
Figura 68:	Interpolação da velocidade de arame para diferentes aberturas da raiz	108
Figura 69:	Chanfro do tubo	110
Figura 70:	Montagem do corpo de prova para soldagem ...	111

Figura 71: Corpo de prova de tubo utilizado para validação com abertura da raiz crescente (esquerda) e decrescente (direita)	112
Figura 72: Gráficos das variáveis de soldagem controladas pelo computador durante a soldagem adaptativa do tubo com abertura da raiz crescente	114
Figura 73: Vista da solda do passe de raiz pelo lado externo do tubo (esquerda) e interno do tubo (direita) soldado na posição 5G com abertura da raiz crescente.....	115
Figura 74: Macrografias do tubo com abertura de raiz crescente em cinco diferentes posições, ataque: Nital: 10 %....	116
Figura 75: Gráficos dos valores elétricos médios em função da velocidade de arame durante a soldagem adaptativa do tubo	118
Figura 76: Gráficos das variáveis de soldagem controladas pelo computador durante a soldagem adaptativa do tubo com abertura da raiz decrescente.....	119
Figura 77: Vista da solda do passe de raiz pelo lado externo do tubo (esquerda) e interno do tubo (direita) soldado na posição 5G com abertura da raiz decrescente	120
Figura 78: Macrografias do tubo com abertura de raiz decrescente, ataque: Nital: 10 %.....	121
Figura 79: Gráficos das variáveis de soldagem controladas pelo computador durante a soldagem adaptativa do terceiro corpo de prova de tubo	123
Figura 80: Vista da solda do passe de raiz pelo lado externo do tubo (esquerda) e interno do tubo (direita) soldado na posição 5G com abertura da raiz crescente no início e decrescente no final da junta	124
Figura 81: Arranjo experimental para avaliação das condições de soldagem do passe de raiz.....	136
Figura 82: Exemplo da avaliação de um sinal do processo CCC, sendo que os picos azuis são as detecções do início do curto-circuito e os vermelhos do instante de reabertura do arco	138
Figura 83: Análise da oscilação da poça de fusão na solda do passe de raiz com abertura da raiz nula na posição plana.....	139
Figura 84: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura da raiz nula	140
Figura 85: Macrografia de uma solda do passe de raiz com abertura da raiz nula na posição plana, ataque: Nital 10 %	141

Figura 86: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura de raiz mínima na posição plana	142
Figura 87: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 86	143
Figura 88: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura de raiz mínima na posição plana	144
Figura 89: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura de raiz mínima na posição vertical descendente	145
Figura 90: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 89	146
Figura 91: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura reduzida na posição vertical descendente.	146
Figura 92: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura de raiz mínima na posição sobre-cabeça	147
Figura 93: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 92	148
Figura 94: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura reduzida na posição sobre-cabeça	149
Figura 95: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura excessiva na posição plana.....	150
Figura 96: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 95 com uma quebra na escala do tempo (//), Parte A –Tocha na esquerda, Parte B – Tocha no centro da junta	151
Figura 97: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura excessiva na posição plana	152
Figura 98: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura excessiva na posição vertical descendente.	153
Figura 99: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 98, com uma quebra na escala do tempo (//), Parte A –Tocha no centro, Parte B – Tocha na extremidade da junta	154

Figura 100:	Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com uma abertura excessiva na posição vertical descendente	155
Figura 101:	Análise da oscilação da poça de fusão na solda do passe de raiz com abertura de excessiva na posição sobre-cabeça	156
Figura 102:	Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 101 com uma quebra na escala do tempo (//), Parte A –Tocha na extremidade, Parte B – Tocha no centro da junta	157
Figura 103:	Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura de raiz máxima na posição sobre-cabeça	158
Figura 104:	Algoritmo para a execução da trajetória com correção	159
Figura 105:	Etapas de validação do sistema para soldagem adaptativa desenvolvido.	161
Figura 106:	Resultado da solda do passe de raiz com variáveis de soldagem conhecidas	163
Figura 107:	Análise macrográfica da solda do passe de raiz na primeira etapa de validação, Ataque: Nital 10 %	164
Figura 108:	Resultado da solda do passe de raiz na segunda validação	165
Figura 109:	Análise macrográfica da solda do passe de raiz na primeira etapa de validação, Ataque: Nital 10 %	166
Figura 110:	Resultado da solda do passe de raiz com abertura da raiz variável e posição de soldagem constante de 45°	167
Figura 111:	Gráfico da leitura dos “tracking points” (TP) na coordenada y pelo avanço do robô no eixo x com aparecimento do efeito “W”	168
Figura 112:	Gráfico da leitura dos “tracking points” (TP) na coordenada y pelo avanço do robô no eixo x com a correção do efeito “W”	169
Figura 113:	Fotos mostrando o novo borne para o processo CCC	170
Figura 114:	Acesso ao painel do programa CCC na versão sinérgico	171
Figura 115:	Forma de onda da modalidade MIG/MAG CCC	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação do cabeçote de medição LASER modelo SLS050V1, segundo o fabricante [66].....	58
Tabela 2: Condições de soldagem inalteradas durante os experimentos.....	61
Tabela 3: Variáveis correspondentes à fase de arco para as duas formas de onda analisadas (1ª linha: sinérgico; 2ª linha: forma de onda tipo A).....	65
Tabela 4: Índices estáticos da frequência de curto-circuito utilizados para determinar a estabilidade do processo CCC.....	66
Tabela 5: Variáveis correspondentes à fase de arco para as duas formas de onda analisadas (1ª linha: sinérgico; 2ª linha: forma de onda tipo B).....	68
Tabela 6: Índices estáticos utilizados para determinar a estabilidade do processo CCC com a forma de onda tipo B	69
Tabela 7: Variáveis de movimentação do robô utilizados para soldagem do duto sem correção das variáveis de soldagem.....	70
Tabela 8: Composição química das chapas. Valores medidos em % de peso.....	76
Tabela 9: Variáveis de soldagem determinadas para diferentes abertura de raiz e posições de soldagem.....	79
Tabela 10: Cálculo da geometria das soldas do passe de raiz para diferentes aberturas de raiz e posições de soldagem.....	92
Tabela 11: Variáveis enviadas ao robô via comunicação digital	95
Tabela 12: Conjunto das variáveis de tecimento obtidos no Capítulo 4, com o respectivo cálculo de v_y	95
Tabela 13: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para a amplitude de tecimento nas três posições de soldagem.....	103
Tabela 14: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para a velocidade de soldagem nas três posições de soldagem.....	105
Tabela 15: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para o tempo de parada nas três posições de soldagem	106
Tabela 16: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para a velocidade de arame.....	107
Tabela 17: Parâmetros do processo CCC para a velocidade de arame de 3,2 <i>m/min</i> e de 5,0 <i>m/min</i>	108

Tabela 18: Composição química dos corpos de prova de tubo (valores medidos em % de peso).....	110
Tabela 19: Cálculo da geometria das soldas do passe de raiz	117
Tabela 20: Cálculo da geometria das soldas do passe de raiz para a soldagem do corpo de prova de tubo com abertura da raiz crescente e decrescente	122

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

MIG/MAG	: <i>Metal Inert/Active Gas</i>
CCC	: Curto Circuito Controlado
STT	: <i>Surface Tension Transfer</i>
RMD	: <i>Regulated Metal Transfer</i>
CMT	: <i>Cold Metal Transfer</i>
TP	: <i>Tracking Point</i>
LASER	: <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
TIG	: <i>Tungsten Inert Gas</i>
DVS	: <i>Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren</i>
TCP	: <i>Tool Center Point</i>
CCD	: <i>Charge-coupled Device</i>
CMOS	: <i>Complementary metal oxide semiconductor</i>
DBCP	: Distância bico de contato - peça
DPR	: Desvio padrão relativo

LISTA DE SÍMBOLOS

M	: Sistema de coordenadas da base do robô
N	: Sistema de coordenadas da flange do robô
F	: Sistema de coordenadas do TCP
P	: Sistema de coordenadas da peça
v_{TCP}	: Velocidade do TCP
v_y	: Velocidade de deslocamento lateral
v_S ou v_x	: Velocidade de soldagem ou de avanço no eixo x .
A	: Amplitude de tecimento
$Freq_{TEC}$: Número de ciclos de tecimento por segundo
$Freq_{PROG}$: Frequência de tecimento programada no robô
tp	: Tempo de parada na extremidade do tecimento
f_{CC}	: Frequência de curto-circuito
t_a	: Tempo de arco
I_a	: Corrente de arco
t_r	: Tempo de rampa
t_m	: Tempo de medição
n	: Contagem amostral
I_m	: Corrente média
U_m	: Tensão média

P_m : Potência média
 R_{tubo} : Raio interno do tubo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	Descrição do problema	30
1.2	Estado atual	31
1.3	Objetivos e contribuições	34
1.4	Organização do trabalho.....	36
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
2.1	Processo de soldagem MIG/MAG.....	39
2.1.1	Curto-circuito convencional	39
2.1.2	Curto-Circuito Controlado (CCC)	42
2.2	Variação da penetração na soldagem orbital	44
2.3	Possíveis sensores aplicáveis à soldagem orbital	48
2.3.1	Sensores ópticos passivos	49
2.3.2	Sensores ópticos ativos	50
3	ANTECEDENTES.....	57
3.1	Adequação da bancada de ensaios e de componentes mecânicos	57
3.2	Definição das condições gerais de soldagem.....	61
3.3	Adequação do chanfro	63
3.4	Adequação do processo CCC	64
3.4.1	Versão com menor energia	64
3.4.2	Versão com maior energia	67
3.5	Soldagem orbital sem correção.....	69
3.6	Filtragem do sinal da abertura da raiz.....	72
3.7	Síntese do capítulo.....	73
4	PARAMETRIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	75
4.1	Procedimento experimental	75

4.2	Metodologia dos ensaios.....	77
4.3	Avaliação da qualidade da solda.....	78
4.4	Resultados.....	79
4.4.1	Parametrização do processo de soldagem.....	79
4.4.2	Resultados de solda.....	82
4.4.3	Avaliação da geometria da solda.....	90
4.5	Síntese do capítulo.....	92
5	DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS.....	93
5.1	Detalhamento da comunicação.....	93
5.2	Programação da trajetória orbital no robô.....	96
5.3	Programação da trajetória no computador.....	97
5.3.1	Etapa de procura de junta.....	99
5.3.2	Etapa de execução da trajetória com correção das variáveis 100	
5.4	Interpolação das variáveis de soldagem.....	101
5.4.1	Com respeito à variação da abertura da raiz.....	102
5.4.2	Com respeito à posição de soldagem.....	108
5.5	Síntese do capítulo.....	108
6	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	110
6.1	Procedimento experimental.....	110
6.2	Resultados obtidos.....	113
6.2.1	Tubo com abertura da raiz crescente.....	113
6.2.2	Tubo com abertura da raiz decrescente.....	118
6.2.3	Tubo com abertura da raiz crescente e decrescente 122	
6.3	Conclusões e observações das validações.....	124
7	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	126
7.1	Conclusões.....	126
7.2	Recomendações para o projeto “Robô de Soldagem”	
	127	

7.3	Sugestões para trabalhos futuros	127
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
9	APÊNDICES	136
9.1	Avaliação do processo CCC para o passe de raiz.....	136
9.2	Funcionamento dos algoritmos.....	159
9.3	Validação dos algoritmos em chapa	161
9.4	Efeito “W”	168
10	ANEXOS.....	170

1 INTRODUÇÃO

A demanda de dutovias, para exploração do pré-sal e transporte de petróleo e derivados, está constantemente aumentando no país [1, 2]. Assim, maiores são os requerimentos de produção e precisão na manufatura destas estruturas.

Para união de um duto ao outro, quando estes não podem ser rotacionados, utiliza-se a soldagem orbital. Em dutos de parede espessa, ela consiste de duas etapas: a soldagem do passe de raiz e dos passes de preenchimento da junta. Conforme apresentado na Figura 1, a soldagem do passe de raiz refere-se ao primeiro passe de solda, o mais interno do duto, enquanto os de preenchimento aos passes subsequentes.

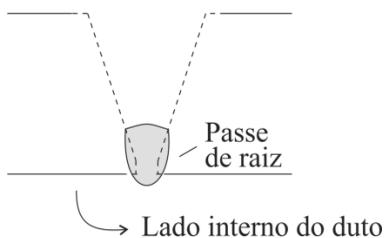


Figura 1. Representação da soldagem do passe de raiz em duto, em que a linha pontilhada descreve a junta antes da solda

Dentre os passes citados, o passe mais crítico na soldagem de dutos é o passe de raiz. Os seguintes motivos descrevem esta criticidade:

1. Deve ter uma espessura adequada para garantir a integridade mecânica da junta e uma geometria adequada para facilitar a soldagem dos passes de preenchimento;
2. Governa o ritmo de produção da linha de dutos, atuando como um gargalo [3, 4]. Em alguns casos o passe de raiz chega a suportar toda a tubulação, de modo que a soldagem da junta seguinte possa ser iniciada antes mesmo que a anterior seja finalizada [4];

3. É a região que fica em contato com o fluido, potencialmente corrosivo, e nestes casos deve apresentar boa resistência à corrosão e à corrosão sob tensão;
4. O acesso à raiz é mais difícil e por isto há riscos de uma maior incidência de defeitos de solda;
5. Um defeito na raiz é um concentrador de tensões;
6. A região da raiz apresenta maior restrição do que o resto da junta e por isto é mais susceptível às tensões residuais;
7. Apresenta maior diluição com o metal de base, dificultando o controle da composição química,

Pelos motivos acima citados, o passe de raiz deve ser produtivo, e ao mesmo tempo apresentar um perfil de penetração completa e ser livre de defeitos.

1.1 Descrição do problema

Para a execução da soldagem, os dutos precisam ser alinhados uns aos outros. Este alinhamento é especialmente complicado pela dificuldade de manipulação dos dutos, os quais apresentam um comprimento médio de 12 m. Isto foi inclusive verificado em uma visita do corpo técnico LABSOLDA na construção de uma dutovia, conforme exemplifica a Figura 2.



Figura 2. Posicionamento dos dutos para execução da soldagem orbital no compartimento branco, com destaque para o método de sustentação do tubo

A imprecisão de posicionamento é somada às incertezas decorrentes da fabricação e impactos mecânicos durante o armazenamento e transporte dos dutos, que causam distorções e ovalizações da sua geometria nominal.

Como consequência das imprecisões têm-se variações da geometria final da junta do duto que vai ser soldado. A geometria da junta apresenta variações de desalinhamentos e de afastamento, principalmente com respeito à abertura da raiz ou *gap* [5, 6].

Para compensar as incertezas e imprecisões durante a soldagem, é necessário um constante ajuste das variáveis da fonte de soldagem e da condução do eletrodo ou da tocha de soldagem, sobretudo no passe de raiz. O responsável pela execução da soldagem deve assegurar no passe de raiz um perfil de penetração completa. A variação da penetração é um dos principais problemas que influencia a qualidade da solda [7, 8].

1.2 Estado atual

Dentre os processos de soldagem empregados para união de dutos, o processo MIG/MAG é o mais utilizado [3]. Contudo, até recentemente seu emprego no passe de raiz era limitado à utilização de um sistema de cobre-junta (também denominado *backing*). O cobre-junta é um suporte interno para sustentação da poça de fusão (Figura 3), a fim de que se evite a perfuração da solda no passe de raiz [9].



Figura 3. Representação esquemática de um cobre-junta, antes (esquerda) e depois da solda do passe de raiz (direita)

Contudo, o uso de cobre-junta é inviável em algumas aplicações pelos seguintes motivos: (a) dificuldade de acesso ao interior do duto, principalmente em dutos de pequeno diâmetro [3], (b) risco de fragilização do metal de solda por solubilização do Cobre no Ferro [10], (c) indisponibilidade do sistema.

Quando não se utiliza o cobre-junta, a forma de prevenir a variação da penetração é pelo monitoramento contínuo das condições de soldagem e posterior ajuste das variáveis do processo.

A forma mais simples de garantir a penetração é pela soldagem manual, conforme mostrado na Figura 4. No Brasil, por exemplo, utiliza-se a soldagem manual com o processo TIG ou com o eletrodo revestido [4, 11]. Neste caso, o próprio soldador estima o estado de penetração e controla o processo de soldagem de modo a garantir a qualidade do cordão de solda.



Figura 4. Vista geral do procedimento de soldagem do passe de raiz de forma manual com o processo TIG (esquerda) e aspecto superficial do passe de raiz (direita)

Apesar de a forma manual ser mais simples, o procedimento de soldagem do passe de raiz é demorado e em posições desconfortáveis para o soldador, conforme apresentado na Figura 5 para o processo eletrodo revestido.



Figura 5. Vista geral do procedimento de soldagem de dutos com o processo eletrodo revestido na posição de soldagem sobre-cabeça

A solução atual para aumentar a produção na soldagem de dutos é pelo emprego de sistemas mecanizados [4, 9, 12-14]. Um exemplo de um sistema mecanizado é mostrado na Figura 6, onde se utiliza um manipulador robótico cartesiano. O robô desloca-se ao redor do tubo por meio de cintas metálicas.

Durante a soldagem, o operador monitora constantemente a trajetória da tocha, corrigindo o alinhamento central da tocha na junta através do *joystick* do sistema robótico.

Com um sistema mecanizado é difícil de garantir a penetração completa, ao mesmo tempo em que se corrige o alinhamento da tocha. O operador não possui uma habilidade de correção e controle da poça de fusão semelhante à soldagem manual. Assim, a recomendação para soldagem do passe de raiz continua ser de forma manual e com um soldador experiente [5, 14, 15].



Figura 6. Mecanização da soldagem orbital de dutos de grande diâmetro com um manipulador linear controlado por *joystick*

1.3 Objetivos e contribuições

No projeto “robô para soldagem automatizada de dutos”, um robô dedicado de 6 graus de liberdade está sendo desenvolvido pela empresa ENGEMOVI, apoiado pela PETROBRAS e com a interveniência do SENAI-RJ, do LABSOLDA/UFSC e da empresa SPS-Soldagem.

A concepção do robô é mostrada na Figura 7. Ele se desloca ao redor do duto por uma base móvel fixada em um trilho pré-curvado. O robô é capaz de executar uma trajetória orbital de 360 em dutos com uma faixa de diâmetro externo de 250 a 1500 *mm*. O deslocamento do robô de uma junta a outra é realizada por roldanas conectadas ao trilho de fixação.

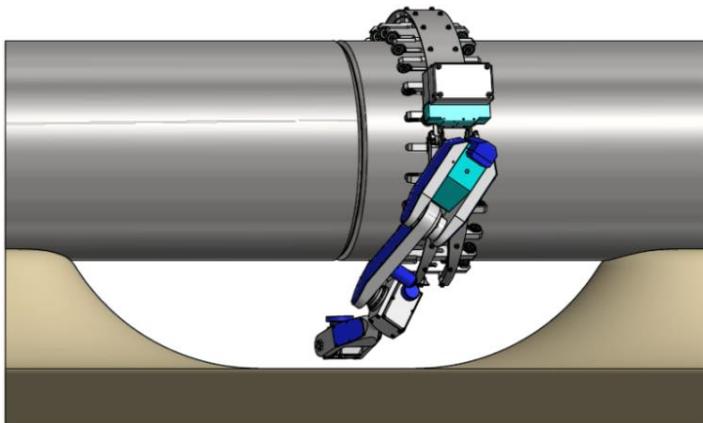


Figura 7. Concepção do robô articulado com 6 graus de liberdade para soldagem de dutos em campo

Conectado ao flange do robô se encontrará uma tocha de soldagem MIG/MAG e um cabeçote de medição LASER. O cabeçote fornecerá ao sistema informações sobre a geometria da seção transversal da junta e seu posicionamento com relação ao espaço de trabalho do robô.

Alguns trabalhos mostram que a penetração no passe de raiz está diretamente relacionada à geometria da junta, em particular a medida da abertura da raiz [6, 16-19]. E que esta informação pode ser utilizada para controlar indiretamente o processo de soldagem. Este controle quando executado em tempo real é conhecido como controle adaptativo [20, 21].

Inserido neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é:

Desenvolver e validar experimentalmente um controle adaptativo aplicado à soldagem orbital robotizada do passe de raiz de tubos, para que se compense variações da abertura da raiz e de desalinhamento da junta.

Para alcançar o objetivo principal, o autor definiu os seguintes objetivos secundários:

1. Os algoritmos devem:
 - a. Compensar uma variação da abertura da raiz de 1 a 5 mm de um chanfro “V”, le-

- vando em consideração as diferentes posição de soldagem;
- b. Corrigir os parâmetros de movimentação do robô como forma de emular o movimento executado pelo soldador na junta;
 - c. Corrigir a velocidade de arame do processo curto-circuito controlado (CCC) para aumentar/diminuir a penetração de acordo com a abertura da raiz.
2. Desenvolver um programa de computador que coordene a operação de medição da junta e realize os cálculos dos parâmetros de soldagem corrigidos.
 3. Validar experimentalmente o controle adaptativo com base em ensaios de soldagem em tubos que apresentam uma variação proposital da abertura da raiz.

As metodologias e os algoritmos gerados neste trabalho irão proporcionar ao robô dedicado as seguintes inovações tecnológicas:

1. Operação automatizada de soldagem do passe de raiz com correção em tempo real das variáveis de movimentação e de posicionamento do robô relativo à junta do duto, em função da atual abertura da raiz e da posição de soldagem.
2. Operação automatizada de soldagem do passe de raiz com ajustes da forma de onda da corrente do processo CCC em função da atual abertura da raiz, para realizar um depósito do passe de raiz com forma geométrica robusta, sem a presença do cobre-junta e com baixo índice de respingos.
3. Formulação de relatórios na forma de gráficos para rastreamento das variáveis de soldagem corrigidas pelo sistema adaptativo.

1.4 Organização do trabalho

Esta dissertação é dividida em 7 capítulos, 5 apêndices e 2 anexos, sendo que o primeiro capítulo é a própria introdução do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre: (a) os processos de soldagem para união de dutos, explorando principalmente os aspectos da estabilidade e da transferência metálica do processo MIG/MAG com curto-circuito; (b) causas da variação da penetração do metal de solda na soldagem orbital, (c) os sensores da soldagem a arco possivelmente aplicáveis à soldagem orbital.

O Capítulo 3 descreve tópicos importantes para a continuidade do trabalho, como a adequação da bancada de ensaios e do processo CCC, e que também estabeleceram critérios para a execução das soldas do passe de raiz.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da parametrização do processo de soldagem em chapas para aberturas de raiz e posições de soldagem individuais. Para cada situação determinam-se variáveis da fonte de soldagem e de movimentação do robô que atendessem resultados normatizados para o passe de raiz.

O Capítulo 5 explica: (a) a comunicação do sistema com controle adaptativo desenvolvido; (b) o funcionamento do programa instalado no computador, o qual tem a função de coordenar as operações de medição da junta e de controle da fonte de soldagem e da trajetória do robô em tempo real; (c) o método utilizado para interpolar as variáveis de soldagem com respeito à variação da abertura da raiz e da posição de soldagem; (d) a filtragem do sinal da abertura da raiz.

O Capítulo 6 mostra os resultados da validação do controle adaptativo realizado neste trabalho. O sistema é validado em tubos de 404,6 mm (16 ") que apresentavam variações propositais de abertura da raiz. O resultado é avaliado com base em gráficos de correção das variáveis calculadas pelos algoritmos e macrografias do passe de raiz.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões, recomendações para o projeto “robô para soldagem automatizada de dutos” e sugestões para trabalhos futuros.

Os Apêndices foram divididos em cinco itens: (a) avaliação do processo CCC por meio de filmagem em alta velocidade e histogramas do tempo de arco; (b) fluxograma de funcionamento do sistema de soldagem adaptativa; (c) validação dos algoritmos em chapa; (d) efeito “W” do robô, que acabou dificultando o desenvolvimento deste trabalho, (e) falhas de alimentação no arame.

O anexo A descreve a operação do processo CCC e o anexo B lista as variáveis do processo na versão sinérgica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de soldagem MIG/MAG

Embora diferentes processos de soldagem sejam empregados na soldagem orbital, o processo MIG/MAG é o mais utilizado para soldagem de dutos de grande diâmetro [3]. Por apresentar uma maior taxa de deposição, ele é utilizado principalmente para os passes de preenchimento da junta [3, 15].

A soldagem do passe de raiz sem o cobre-junta tem sido recentemente viabilizada com o processo MIG/MAG por meio de um controle na transferência metálica [3]. Este é, por exemplo, o caso do processo CCC (da empresa IMC, Brasil) [22-25], do processo STT (*Surface Tension Transfer*, da empresa Lincoln, EUA) [26], RMD (*Regulated Metal Transfer*, da empresa Miller, EUA) e do CMT (*Cold Metal Transfer*, da empresa Fronius, Áustria).

Neste trabalho os parâmetros do processo CCC foram modificados de acordo com a abertura da raiz da junta. Sendo assim, é importante compreender alguns princípios físicos que envolvem a transferência metálica do processo MIG/MAG com curto-circuito.

Inicialmente, será explicada a versão convencional do processo para na sequência ser abordada a versão CCC.

2.1.1 Curto-circuito convencional

Na Figura 8 é mostrado um esquema da transferência metálica do processo de soldagem MIG/MAG convencional. Neste caso, somente um ciclo de transferência é apresentado, o qual foi enumerado em instantes de 1 a 7. Cada instante da transferência pode ser relacionada com o gráfico ilustrado da corrente e tensão instantânea.

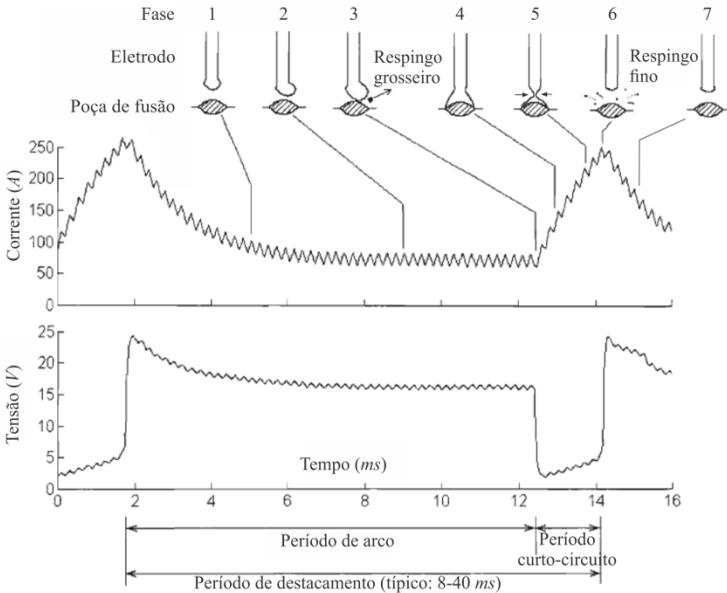


Figura 8: Ilustração da transferência metálica no processo MIG/MAG convencional, adaptado de Cuiuri [27]

Uma consideração importante da versão convencional é que a fonte de soldagem apresenta característica estática de tensão constante. Assim, a corrente de soldagem permanece livre para se adequar à condição momentânea imposta pelo próprio processo, no sentido de manter o equilíbrio médio entre a taxa de fusão e de alimentação de arame.

Uma explicação detalhada da transferência será dada na seqüência:

1. Durante a soldagem, o arame (metal de adição) é continuamente alimentado em direção à poça de fusão já formada.
2. Devido à corrente de soldagem ser demasiadamente baixa ¹ para expelir a gota por voo livre [28], esta cresce até alcançar um determinado raio crítico.

¹ Diz-se que a corrente está abaixo da *corrente de transição*.

3. Uma colisão da ponta fundida do arame com a poça de fusão ocorre. Este fenômeno é chamado de curto-circuito. Como a corrente tende a ser elevar imediatamente após o contato da gota com a poça, há uma tendência de expulsão da gota pela força eletromagnética.
4. Após o contato, a gota fundida, que é idealmente esférica, começa a ser transferida à poça de fusão por tensão superficial [25, 28]. Neste momento, ela adquire um formato de ponte metálica.
5. Devido à característica de tensão constante da fonte de soldagem, durante o curto-circuito, presencia-se uma súbita elevação da corrente. Sabe-se que quanto maior a corrente, maior é a força eletromagnética sob a qual um condutor está sujeito [2]. A componente radial da força eletromagnética tende a comprimir a ponte metálica formada, enquanto que a componente axial atua no sentido de destacá-laⁱⁱ.
6. Durante a ruptura da ponte metálica para o reestabelecimento do arco voltaico, a corrente encontra-se elevada. Isto faz com que o rompimento seja violento, provocando micro explosões [29].
7. Após o reestabelecimento do arco voltaico, a corrente e a tensão retornam aos patamares de operação estabelecidosⁱⁱⁱ. Uma nova gota é formada na ponta do eletrodo, dando continuidade à transferência metálica.

O processo curto-circuito apresenta uma intermitência entre os tempos de arco aberto (instantes 1, 2, 6 e 7) e de curto-circuito (instantes 3 a 5). Desta forma, é usual relacionar a dispersão dos valores medidos do tempo de arco aberto e de curto-circuito como um indicador para a estabilidade do processo de soldagem [2, 30-33].

Utiliza-se também a frequência de curto-circuito para ajuste do processo de soldagem em condições práticas, porque duran-

ⁱⁱ A este fenômeno dá-se o nome de efeito *pinch*.

ⁱⁱⁱ A taxa de descida e subida (derivada) da corrente é determinada pela indutância da fonte de soldagem.

te a ruptura da ponte metálica seguida da ignição do arco voltaico, um som característico é emitido.

O valor da frequência de curto-circuito (f_{CC}) é igual ao número de curtos-circuitos (n_{CC}) pelo tempo de medição (t_m) e pode ser obtido com a ajuda da equação (1) [30]:

$$f_{CC} = \frac{n_{CC}}{t_m} \quad (1)$$

Quando o desvio padrão é mínimo e a frequência de curto-circuito é máxima, a estabilidade do processo de soldagem tende a ser mais elevada [31, 34], embora que devam ser considerados outros fatores muitas vezes não mensuráveis [2].

2.1.2 Curto-Circuito Controlado (CCC)

Conforme descrito no item 2.1.1, a transferência metálica natural do processo curto-circuito está diretamente relacionada à ação da corrente. Neste sentido, para melhorar a regularidade de contato das gotas metálicas com a poça de fusão é fundamental controlar a corrente. Assim, tem-se um processo mais estável em termos de menor geração de respingos e, conseqüentemente, maior homogeneização térmica da poça de fusão.

Para o desenvolvimento de um sistema com controle elétrico é necessário considerar que a corrente de soldagem deve ser ora baixa: (a) no início do curto-circuito e (b) antes do rompimento da ponte metálica; e ora alta: (a) para a formação da gota e (b) para facilitar a transferência do metal.

O desenvolvimento de métodos de controle da corrente no curto-circuito tem sido investigado desde 1999 pelo grupo LAB-SOLDA inicialmente por *Baixo* [24], e na seqüência por *Gohr* [25], *Silva* [23] e, mais recentemente, *Direne* [22]. As investigações resultaram no processo CCC.

A Figura 9 mostra uma seqüência de imagens de alta velocidade para ilustrar a transferência metálica do processo CCC.

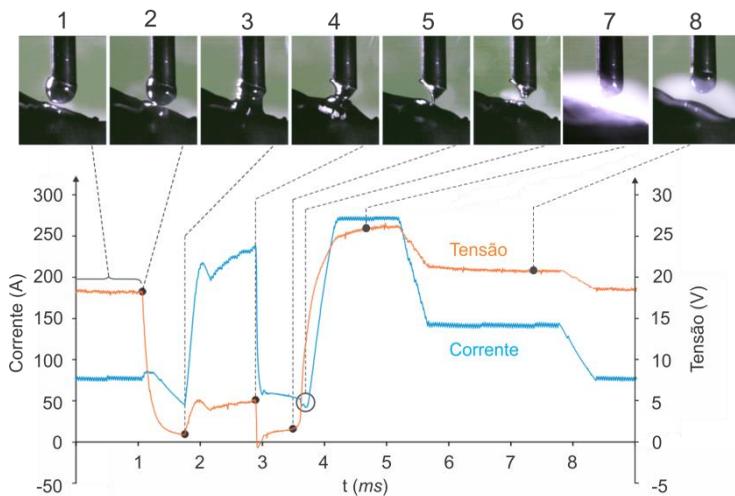


Figura 9: Forma de onda da corrente e da tensão do processo CCC e filmagem de alta velocidade da transferência metálica

Os instantes foram enumerados de 1 a 8, sendo que cada um deles podem ser relacionados com o gráfico da corrente e da tensão instantânea.

A seguir, uma breve explicação de cada fase característica será formulada:

1. Neste instante a corrente se encontra num patamar de base (75 A). Um nível de corrente reduzido mantém a poça de fusão e a gota metálica pré-aquecidas, garantindo um assentamento adequado da gota na poça [22, 23]. Esta fase também é citada como responsável por um “ajuste fino” do aporte térmico [26].
2. Instante em que a gota metálica entra em contato físico com a poça de fusão, caracterizando o curto-circuito. Pela leitura de um valor mínimo de tensão, a fonte de soldagem reduz eletronicamente a corrente.
3. Quanto mais baixa a corrente no instante inicial do curto-circuito, melhor é esperada a ação da tensão superficial no sentido de puxar a gota para a poça

- [2]. Esta fase caracteriza o modo de destacamento dos processos com curto-circuito controlado que é fundamentalmente por “ponte”.
4. A corrente é eletronicamente elevada para facilitar a transferência metálica pelo efeito *pinch* (maior força eletromagnética). Nos instantes finais do curto-circuito, a derivada da tensão (du/dt) é constantemente monitorada por um circuito especial, conhecido como módulo de redução de respingos (MRR) [22].
 5. Caso a derivada seja igual ou maior a um valor programado, o sistema MRR reduz a corrente a um patamar inferior.
 6. Uma nova pausa da corrente garante o destacamento suave da gota, sem gerar respingos.
 7. Um nível mais alto de corrente com um tempo definido é gerado para formar uma nova gota na ponta do eletrodo. Além disto, as forças do jato de arco exercem uma pressão mecânica na poça de fusão, o que comprime a sua superfície. Assim, o comprimento do arco é elevado, prevenindo o toque accidental da gota na poça (curto-circuito prematuro).
 8. A corrente é reduzida a um patamar intermediário. A gota continua crescendo, só que em uma corrente abaixo da de transição. Este patamar promove um acréscimo de energia ao processo sem comprometer sua estabilidade.

Uma descrição do funcionamento de operação do processo CCC e um detalhamento dos seus parâmetros são apresentados no Anexo A.

2.2 Variação da penetração na soldagem orbital

Na soldagem orbital, o efeito da gravidade desempenha um papel importante para a penetração no passe de raiz e consequentemente para a parametrização do processo. Isto se deve à influência da gravidade no comportamento da poça de fusão.

Para exemplificar, a Figura 10 mostra uma ilustração dos efeitos da gravidade no metal fundido durante a soldagem orbital [35].

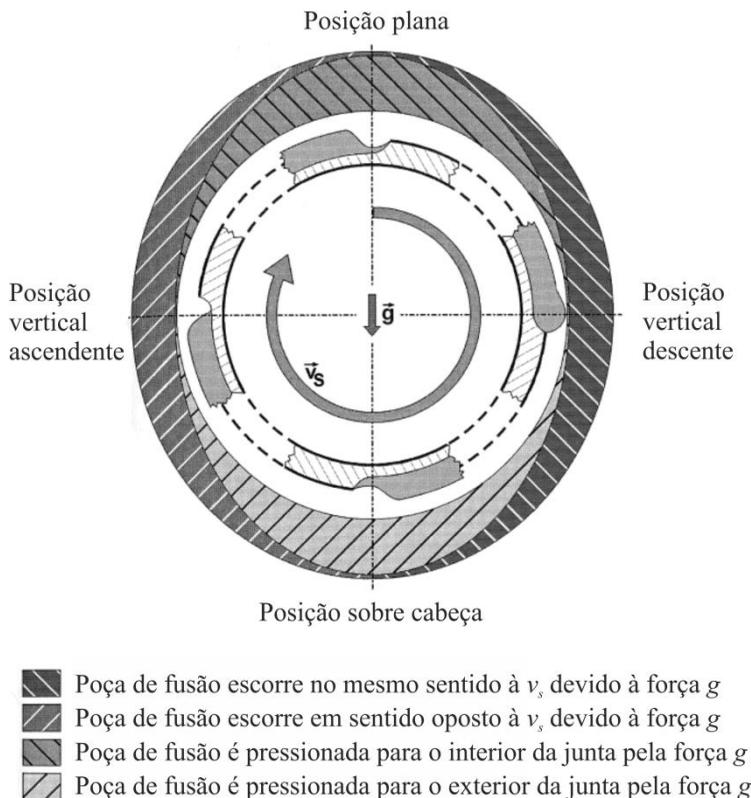


Figura 10. Efeito da gravidade sobre a poça de fusão na soldagem orbital, adaptado de *Magoley* [35]

Como se pode perceber, foram definidas posições de soldagem características que dividem o tubo em quatro seções, que são: (a) posição plana, (b) vertical descendente, (c) sobre-cabeça e (d) vertical ascendente.

Estas posições são consideradas características pelo fato de que, mantendo o sentido horário da soldagem, os efeitos da gravidade sobre o comportamento da poça de fusão não variam continuamente entre elas, mas, na verdade, se invertem [35].

Segundo *Cho et al.* [36], na posição vertical ascendente são mais facilmente observados defeitos como *humping* e perfuração (*melt through*), devido à poça de fusão escorrer no sentido oposto à direção da velocidade de soldagem (Figura 10). Esta constatação é corroborada por *Shirali e Mills* [37], que alega à formação de mordeduras na posição vertical ascendente. Para prevenir estes defeitos, este trabalho utilizou preferencialmente a posição vertical descendente. O tubo foi, portanto, soldado em 180° (meio tubo) nas seguintes posições características:

- Posição plana (também referenciada como 0°);
- Posição vertical descendente (90°);
- Posição sobre-cabeça (180°).

A seguir será dada uma breve explicação sobre a influência da gravidade na penetração do passe de raiz. As explicações são também corroboradas pelas observações de vídeos de alta velocidade mostrados no Apêndice 9.1.

A Figura 11 apresenta os diferentes estados de penetração do passe de raiz relacionados à variação da posição de soldagem.

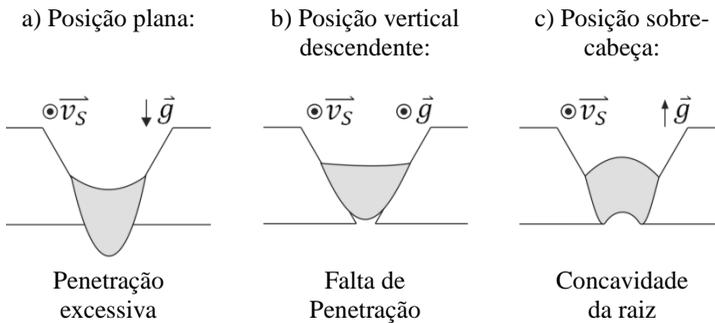


Figura 11. Estados de penetração do metal de solda no passe de raiz relacionados à variação da posição de soldagem

Na posição de soldagem plana, exemplificada na Figura 11a, há uma tendência em se obter maior penetração, pois a gravidade facilita a formação da raiz. Isto se deve ao fato de a gravidade pressionar a poça de fusão para o interior do duto [35, 36].

Na posição vertical descendente (Figura 11b), há uma tendência em se obter menor penetração. Neste caso, a gravidade

favorece o escorrimento do metal líquido, o qual se acumula na frente do arco voltaico [36], impedindo que o metal líquido alcance a raiz da junta. Para evitar o acúmulo de material e se obter penetração total, deve ser aumentada a velocidade de soldagem, conforme mostra *Cho et al.* [36].

Na posição sobre-cabeça (Figura 11c), a penetração é menos profunda, pois a poça de fusão serve como uma barreira para o fluxo de calor no sentido do metal de base [38]. A poça de fusão é atraída pela gravidade para o lado externo do duto, sendo mantida na junta pela ação da tensão superficial e pela pressão do arco [35]. Ensaios práticos mostraram que o risco maior desta posição é uma concavidade da raiz, sendo facilitada por uma poça mais energética.

É importante salientar que na soldagem orbital os estados de penetração não estão somente relacionados à variação da posição de soldagem. As imprecisões de posicionamento dos dutos (descritos no item 1.1) fazem com que a penetração esteja relacionada à variação da abertura da raiz.

A Figura 12 mostra esquematicamente a influência da variação da abertura de raiz na penetração do metal de solda.

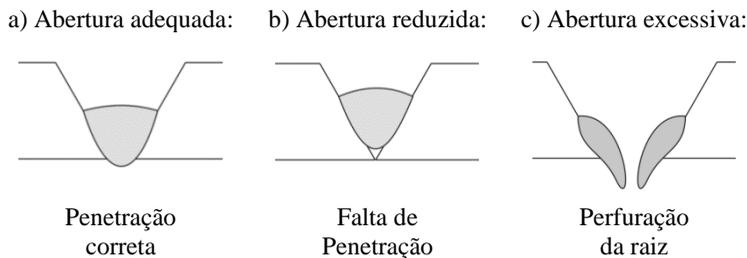


Figura 12. Estados de penetração do metal de solda no passe de raiz relacionados à variação da abertura da raiz

A Figura 12a mostra que quando a abertura da raiz é adequada, para uma determinada parametrização do processo de soldagem, a penetração da raiz é completa e um cordão de solda no lado interno do duto é formado.

Caso aconteça durante a soldagem de a abertura diminuir, a tendência é ocorrer um defeito de solda conhecido como falta de penetração (Figura 12b). Neste caso, um cordão de solda no lado interno do duto não é formado, o que compromete a resis-

tência da junta soldada, baseado nos motivos abordados na Introdução.

Pelo contrário, caso a abertura da raiz seja excessiva, a tendência é haver um defeito de perfuração da raiz (Figura 12c). Isto acontece devido à força de tensão superficial não conseguir sustentar o próprio peso da poça de fusão. Quando isto ocorre, é necessário parar a execução da soldagem e reparar a região perfurada.

2.3 Possíveis sensores aplicáveis à soldagem orbital

A Figura 13 mostra uma proposta de classificação de sensores segundo a norma alemã DVS 0927-1 “sensores para soldagem a arco” [39]. Segundo esta norma, os sensores são divididos com relação à estratégia de observação (geometria ou processo) em que o sinal é adquirido.

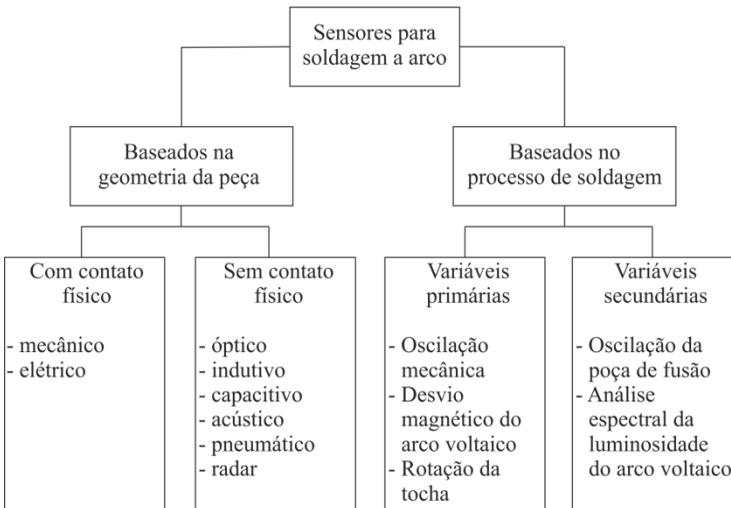


Figura 13: Classificação dos sensores para soldagem a arco, segundo a norma DVS 0927-1 [39]

Nos sensores baseados no próprio processo de soldagem, o sinal é adquirido a partir de variáveis primárias (corrente e/ou tensão de solda) ou secundárias (luminosidade, oscilação da poça, etc.). Eles não necessitam de um equipamento extra de medição,

já que sua informação é extraída diretamente do próprio processo de soldagem.

Uma vantagem dos sensores baseados no processo é que a região de medição é a mesma que a região da solda, ou seja, sem “*offset*” de medição. O exemplo mais comum desta tecnologia é o sensor a arco, que utiliza a leitura da variação da corrente durante uma oscilação mecânica da tocha de soldagem no interior da junta (também conhecido como tecimento). No Brasil, o trabalho pioneiro em sensor a arco foi conduzido pelo LABSOLDA em 1995 [40]. O estudo e desenvolvimento da tecnologia foram aprimorados por *Costa Filho* [41], *Broering* [42], e, mais recentemente, *Mendonça* [43]. Uma desvantagem do sensor a arco é que ele é empregado somente para seguimento de junta.

Já os sensores baseados na geometria adquirem seu sinal a partir da geometria da junta ou de um canto ou região da própria peça. Nestes sensores, o uso de um equipamento adicional se faz necessário.

Dentre os diferentes sensores disponíveis para a soldagem a arco, os sistemas que utilizam princípios ópticos possuem algumas vantagens: (a) medição sem contato, (b) rapidez de medição, (c) relativa portabilidade [44], (d) disponibilidade de informações para controle adaptativo.

A seguir, será mostrada uma breve revisão sobre os sensores ópticos. Eles se dividem em dois tipos: os sensores passivos e os ativos.

2.3.1 Sensores ópticos passivos

Os sensores passivos utilizam uma câmera (CCD ou CMOS) para analisar diretamente a região de interesse. No caso do processo de soldagem, a região de interesse pode ser o próprio arco voltaico e a poça de fusão (Figura 14), a junta a ser soldada [45] ou ambos [46, 47].

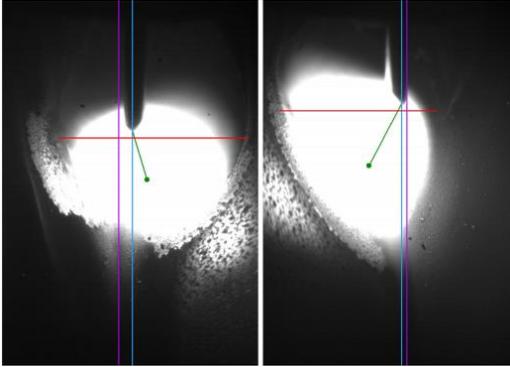


Figura 14: Características da aquisição de imagens com um sensor óptico passivo: posição do arame (linha azul vertical), posição da junta (linha rosa vertical), largura da poça de fusão (linha vermelha horizontal) e centro do arco calculado (ponto verde) com relação à ponta do arame (linha verde) [48]

Eles são empregados tanto para processo TIG [47, 49, 50] como para o processo MIG/MAG [6, 51, 52]. Inclusive, podem ser utilizados para estimar o estado de penetração do metal fundido pela observação da parte inferior da solda (*backface sensing*) [53, 54].

Uma dificuldade apresentada por esta tecnologia é que a própria luz do arco voltaico e instabilidades no processo de soldagem interferem na análise da imagem. Com o processo MIG/MAG com curto-circuito, por exemplo, alguns trabalhos fazem uma sincronização dos instantes de extinção do arco voltaico com o momento de captura de imagens [6].

2.3.2 Sensores ópticos ativos

Uma maneira de tornar o sensor óptico menos sensível à luz do arco é pela observação indireta da região de interesse através de uma luz estruturada. Os sensores ópticos que utilizam esta tecnologia são denominados de *ativos*.

A luz estruturada é fornecida por um emissor LASER, devido ao seu estreito comprimento de onda.

A cor da luz LASER utilizada nos sensores para soldagem é geralmente a vermelha. Isto se deve à baixa intensidade deste

comprimento de onda, que é de aproximadamente 625 a 740 *nm*, no espectro do arco voltaico (Figura 15). Isto facilita a visualização do feixe LASER com menores interferências da luz do arco.

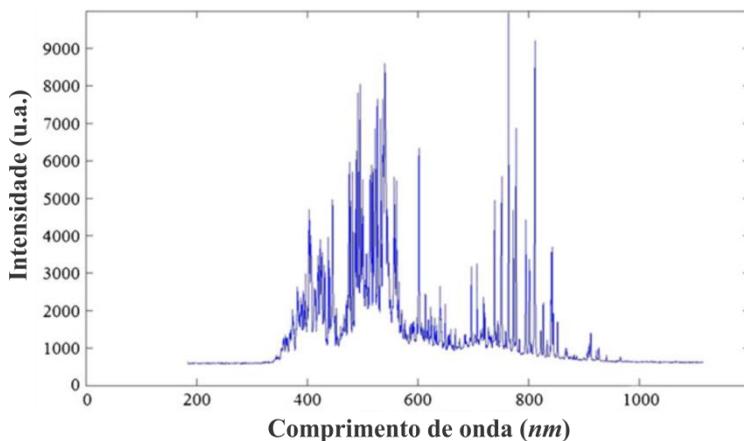


Figura 15: Espectro de luz durante a soldagem a arco (u.a. = unidade arbitrária) [51]

2.3.2.a Sensor óptico pontual

Os sensores LASER utilizam o princípio da medição baseado na triangulação óptica ativa. Este princípio de medição já é bem estabelecido industrialmente [55-57].

A triangulação ativa pode ser descrita com a projeção de um ponto LASER, onde para diferentes posições do objeto, o feixe LASER incidido é observado em posições distintas no detector (e.g. CCD de uma câmera), conforme ilustra Figura 16 [44].

Assim, através da equação (2) é possível determinar a posição da superfície medida em relação ao sistema [44, 58]:

$$dA' = \frac{b \cdot d \cdot \cos \alpha}{BB' + b \cdot \sin \alpha} \quad (2)$$

Onde:

dA' = distância do objeto à fonte LASER;

b = distância entre a lente e a imagem;

d = distância entre o emissor LASER e a lente;
 $\overline{BB'}$ = deslocamento do ponto visualizado na câmera;
 α = ângulo de triangulação.

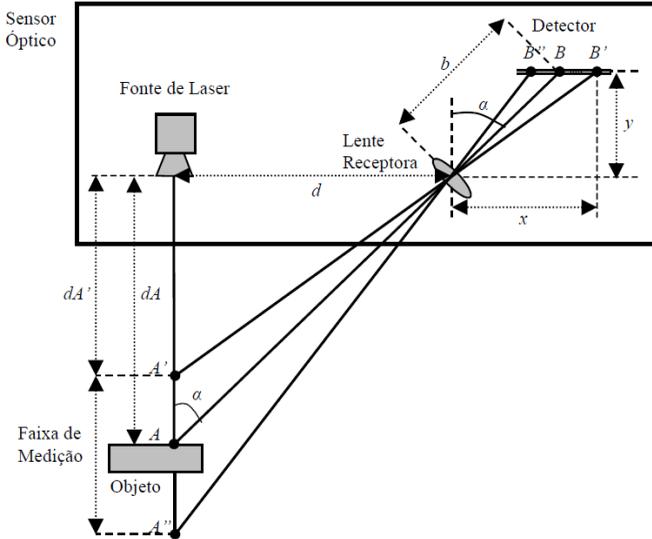


Figura 16: Técnica da triangulação óptica com um feixe LASER [58]

2.3.2.b Sensor óptico de uma linha

Para medição da forma geométrica de uma junta de solda, é utilizada uma variação do princípio de triangulação pontual. Para tanto, a emissão do feixe é transformada em uma linha [16, 59-61].

O princípio de funcionamento de um cabeçote de medição LASER de uma linha, chamado também de “folha de luz”, é ilustrado na Figura 17.

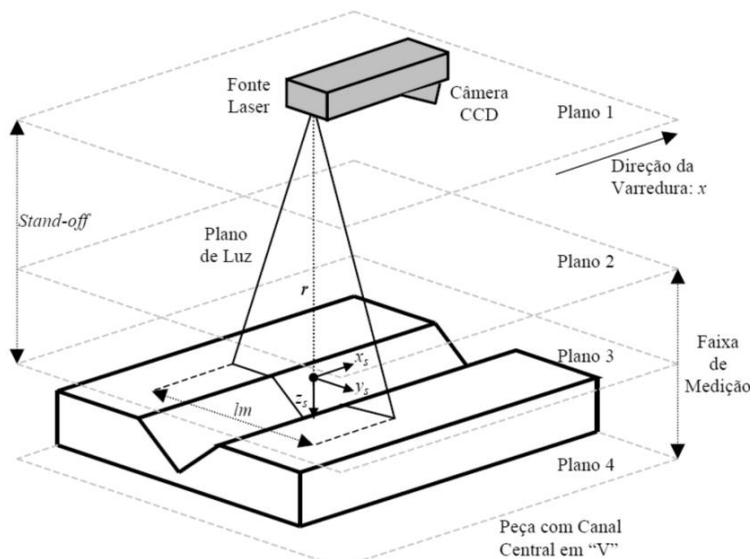


Figura 17: Ilustração do funcionamento de um sensor óptico tipo “folha de luz” e seus parâmetros característicos [57, 58]

Um feixe LASER é inicialmente colimado por uma lente, sendo projetado sobre o plano 3 (plano da peça), nas direções z_s e y_s .

A imagem, originalmente em *pixel*, é convertida no sistema de coordenadas cartesianas bidimensional do sensor $\{y_s, z_s\}$ [62]. A distância r entre o emissor LASER e o plano 3, é conhecida como *stand-off*.

A largura de medição da “folha de luz”, l_m , depende da distância r . Quando a peça se encontra no plano 2, a largura de medição é mínima. Quando se encontra no plano 4, a largura é máxima. A distância entre estes dois planos determina a faixa de medição, que é uma característica de fabricação de cada sensor.

Na soldagem com chanfro estreito ou *narrow gap* recomenda-se a utilização de outra tecnologia de sensor LASER [63]. Nesta, ao invés de um feixe LASER ser colimado por uma lente, utiliza-se um sistema mecânico com espelhos para deflexão do feixe sobre a junta.

Conforme mostra a Figura 18, um motor adicional no cabeçote de medição faz com que o feixe “varra” a junta. Isto permite que a resolução horizontal seja independente da resolução

vertical do sensor [63]. Assim, tem-se uma pequena largura de medição, mas uma grande faixa de medição.

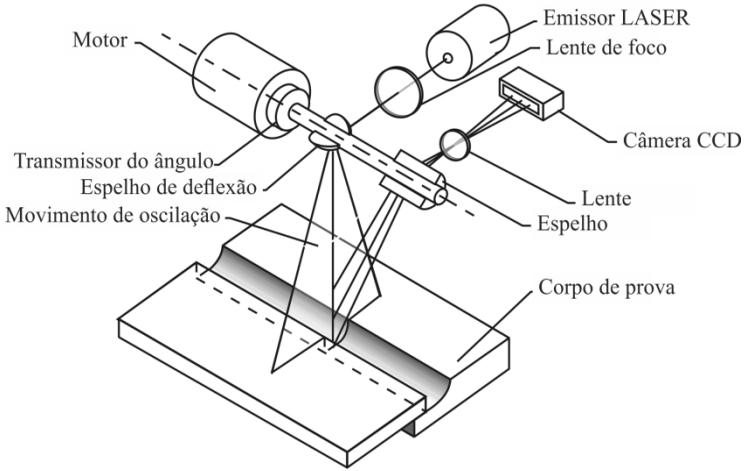


Figura 18: Ilustração do funcionamento de um sensor LASER tipo "scanner" e seus principais componentes [39]

Como desvantagem, o princípio de funcionamento é mais complexo e dependente de componentes mecânicos, que se desgastam com o tempo.

A Figura 19 mostra um exemplo de um perfil de uma junta em "V" capturado com o sensor LASER de uma linha, após processamento e tratamento da imagem.

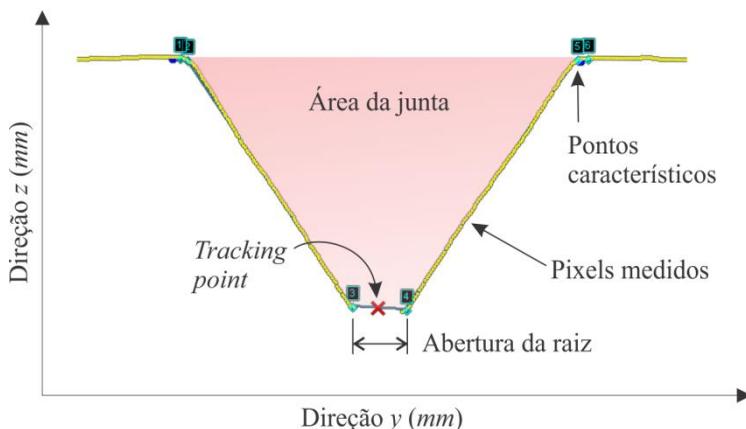


Figura 19: Perfil de uma junta “V” calibrado no sistema de coordenadas bidimensional do sensor LASER e algumas das informações geométricas da junta disponibilizadas

Os pontos característicos definem os cantos da junta e servem de referência para cálculo da geometria da junta. É possível obter a informação da abertura da raiz e da área da junta, por exemplo.

A cruz vermelha na Figura 19 é chamada de *tracking point* (TP). Ela determina o centro da junta. As coordenadas do TP são obtidas em relação ao sistema de coordenada do robô, por meio de uma calibração. Ela envolve a transformação do sistema de coordenadas do sensor para o sistema de coordenadas do robô, em translação e rotação [58].

Para aquisição das informações geométricas na direção perpendicular ao plano de luz projetado, x_s , é necessário um movimento do sensor em relação à peça. Este movimento é denominado de varredura ou leitura e é executado por um sistema de deslocamento externo.

A Figura 20 mostra uma ilustração do seguimento de junta com o sensor LASER, na qual a trajetória inicialmente programada é deslocada a cada aquisição do TP durante a varredura da junta.

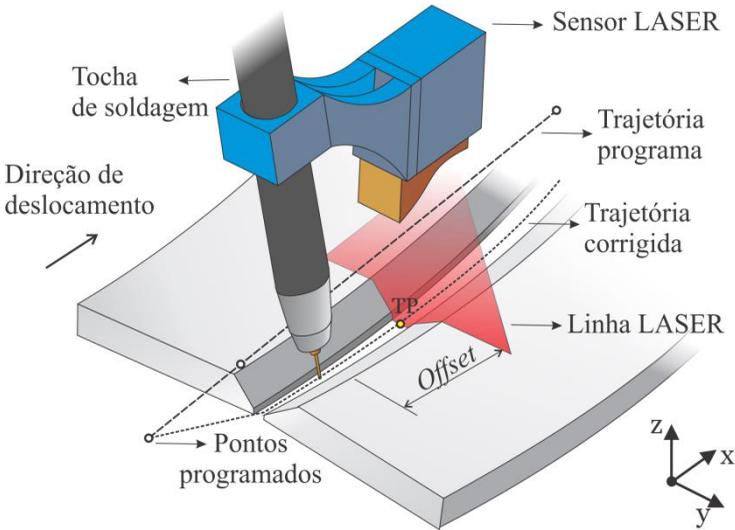


Figura 20: Seguimento de junta utilizando o *tracking point* do sensor LASER

Uma distância mínima entre a linha LASER e a fonte de calor deve ser garantida. Caso contrário, a luz do arco voltaico passa a interferir na análise da imagem. Esta distância é denominada de *offset* de medição.

É também possível realizar um seguimento de junta com o sensor LASER sem a calibração acima citada, conforme descrito no trabalho de *Viviani* [64]. Neste caso, o erro de leitura entre os TPs durante a varredura da junta, é utilizado diretamente para corrigir a posição da tocha de forma incremental.

Além do seguimento de junta, a geometria da junta pode ser utilizada para controle do processo de soldagem em malha fechada (controle adaptativo).

Outra possibilidade para o uso deste sensor seria para monitoramento e detecção de discontinuidades na superfície da solda [16, 65].

3 ANTECEDENTES

Neste capítulo serão vistos tópicos importantes para a continuidade do trabalho e que estabeleceram critérios para a execução das soldas do passe de raiz.

3.1 Adequação da bancada de ensaios e de componentes mecânicos

A primeira concepção da bancada de ensaios utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 21.

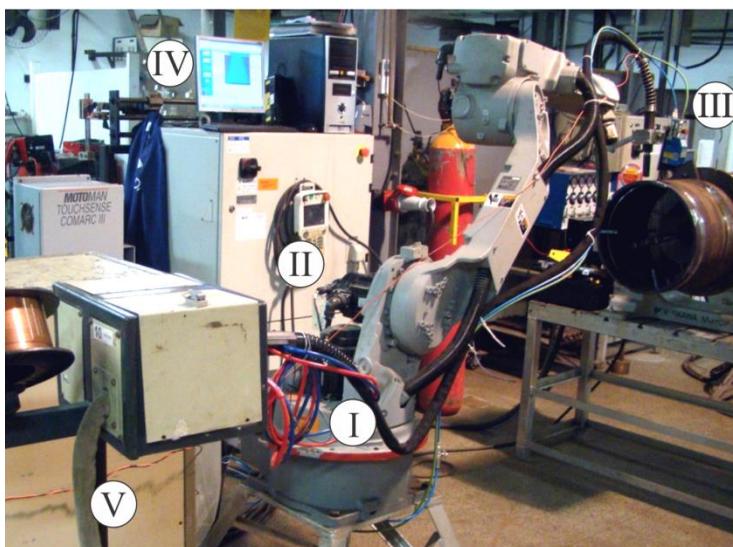


Figura 21: Primeira concepção da bancada de ensaios para soldagem de tubos com um robô antropomórfico

A seguir é dado um breve detalhamento dos componentes da bancada:

- I. A componente central da bancada de ensaios é um robô antropomórfico modelo *Motoman HP20D*. A sua estrutura cinemática é do tipo articulado vertical com 6 graus de liberdade. Eles são definidos pela ro-

- tação dos eixos do robô denominados de S, L, U, R, B e T (para maior detalhamento ver Figura 22).
- II. O robô possui uma unidade de controle modelo DX100 e um *teach-pendant* para programação da trajetória de soldagem e movimentação do robô.
 - III. O cabeçote de medição LASER utilizado neste trabalho é do modelo SLS-050V1 da empresa Meta-Vision. As suas especificações são mostradas na Tabela 1.
 - IV. As configurações de imagem do cabeçote de medição e visualização do perfil da junta eram realizadas pelo computador.
 - V. Uma fonte de soldagem modelo *Inversal* adaptada, com corrente máxima de 450 A. No programa da fonte estava instalado o processo CCC.

Tabela 1: Especificação do cabeçote de medição LASER modelo SLS050V1, segundo o fabricante [66]

Características gerais:	
Stand-off nominal	: 49,70 mm (medido a partir da base)
Faixa de medição	: 70 mm
Largura de medição	: 50 mm
Câmera:	
Taxa de aquisição	: 25 (na resolução máxima) a 100 fps
Tecnologia do sensor	: CMOS
Emissor LASER:	
Potência	: 30 mW
Comprimento de onda	: 685 nm
Tipo de projeção	: “Folha de luz”, uma linha
Resolução de imagem (pixels):	
Horizontal	: 0,05 mm
Vertical	: 0,08 mm

A integração do cabeçote de medição com o robô foi inicialmente realizada por uma interface chamada de *Motoeye Laser-Tracking*. Ela foi instalada em janeiro de 2014 por um técnico da YASKAWA. A conexão do cabeçote com a unidade de controle do robô é do tipo *Ethernet*.

Na primeira concepção da bancada, durante o deslocamento da tocha sobre o tubo, ocorriam erros de singularidade do braço robótico, que limitavam seu espaço de trabalho. A causa se

devia a um inadequado suporte de tocha, que para seu posicionamento no corpo de prova de tubo, os ângulos R e B do robô ficavam perpendiculares entre si. Além disto, o tubo se encontrava muito baixo com relação ao robô para executar a soldagem na posição de soldagem sobre-cabeça.

Os fatos acima citados motivaram um novo projeto de suporte de tocha e a simulação do movimento do robô em um ambiente virtual. O programa utilizado foi o *Motosim-EG*. A Figura 22 mostra uma imagem do novo *layout* da bancada de ensaios com o suporte de tocha conectado ao eixo T (flange ou *end effector*) do robô.

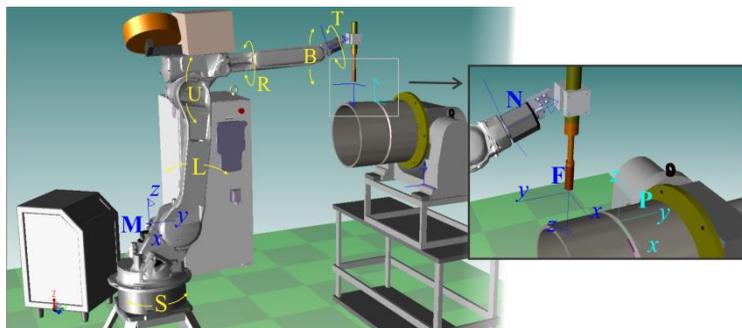


Figura 22: Simulação da bancada de ensaios em ambiente virtual com a localização dos sistemas de coordenadas e rotação dos eixos do braço robótico

Para que o translado da tocha fosse facilitado na posição sobre-cabeça, um anteparo para a mesa posicionadora, que sustentava o tubo, foi projetado com uma altura de 310 mm .

Ainda na Figura 22 é mostrada a localização dos seguintes sistemas de coordenadas: (a) base do robô, convencionada como **M**; (b) flange do robô, convencionada como **N**; (c) tocha de soldagem, convencionada como **F**; e (d) de uma coordenada de usuário local definida na superfície do tubo, convencionada como **P**. O suporte de tocha desenvolvido é mostrado na

Figura 23 com os possíveis ajustes de posicionamento do cabeçote de medição. O novo projeto contemplou os ajustes necessários para a soldagem de tubos e de chapas. O ângulo de ataque da tocha no tubo é convencionado como α .

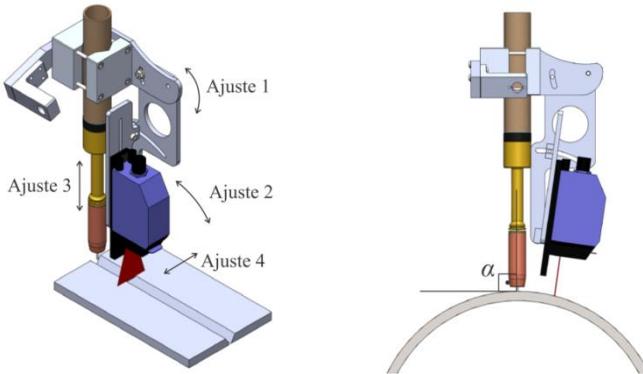


Figura 23: Projeto do novo suporte da tocha e do cabeçote de medição para soldagem em chapas (esquerda) e tubos (direita)

A Figura 24 mostra uma vista geral da bancada de ensaios na segunda concepção.



Figura 24: Segunda concepção da bancada de ensaios para soldagem de tubos com um robô antropomórfico

A fonte de soldagem *Inversal* foi substituída por um modelo mais recente da linha *Digiplus A7*, com capacidade máxima de

corrente de 450 A (Figura 24, marcação I). Ela foi disponibilizada com recursos do projeto.

O computador que era utilizado apenas para visualizar o perfil da junta foi empregado para comandar a fonte de soldagem e o robô. Os algoritmos para soldagem adaptativa foram desenvolvidos neste computador (Capítulo 5).

3.2 Definição das condições gerais de soldagem

O ponto de partida para as condições de soldagem dos ensaios deste trabalho foram baseadas nos resultados de *Sartori et al.* [12]. Eles utilizaram um sistema TARTÍLOPE V3 para soldagem de tubos de 406,4 mm (16 ") de diâmetro externo e 12,7 mm (1/2 ") com um chanfro "V".

A Tabela 2 resume as condições dos experimentos, as quais foram adotadas como critério em todo decorrer deste trabalho.

Tabela 2: Condições de soldagem inalteradas durante os experimentos.

Arame de adição:	
Tipo	: ER70S-6
Diâmetro	: 1,2 mm
Gás de proteção:	
Tipo	: Argônio + 25% CO ₂
Vazão*	: aprox. 18 L/min *
Posicionamento da tocha:	
Distância bico de contato-peça	: aprox. 17 mm
Ângulo de ataque (α)	: 90°
Ângulo de deslocamento	: 0°
Geometria da junta:	
Espessura de parede:	: 12,7 mm
Ângulo de abertura:	: 60°

* Verificada regularmente com um medidor de vazão MVG-3.

As variáveis de movimentação do braço robótico utilizadas neste trabalho são ilustradas na Figura 25.

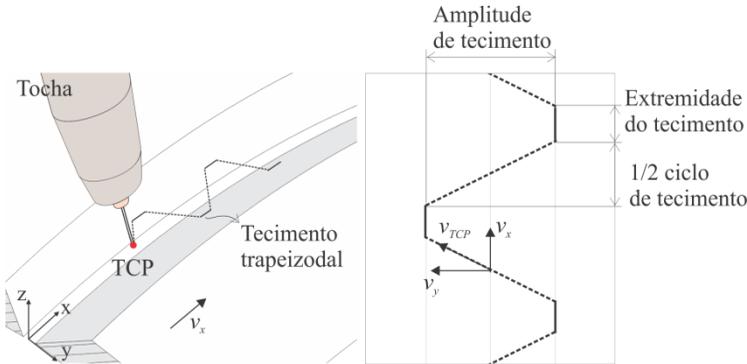


Figura 25: Variáveis de movimentação do robô em uma vista geral da tocha e do corpo de prova (esquerda) e de uma vista superior do plano de tecimento (direita)

A seguir é dada uma descrição das variáveis:

- Velocidade de soldagem (v_s): velocidade de avanço do robô (v_x), no sentido longitudinal da solda (eixo x).
- Amplitude de tecimento (A): largura total do movimento oscilatório da tocha, no sentido transversal ao cordão de solda (eixo y).
- Frequência de tecimento ($Freq_{tec}$): quantidade de ciclos de tecimento por segundo, conforme convenção utilizada pelo LABSOLDA.
- Tempo de parada (tp): faz com que a tocha mantenha a sua posição na extremidade do tecimento pelo tempo determinado. A tocha continua, no entanto, movimentando-se na direção de v_x .

A velocidade instantânea do TCP (“*tool center point*” em inglês ou ponto central da ferramenta/tocha de soldagem) foi convencionada como v_{TCP} .

A v_y é determinada pela frequência de tecimento ($Freq_{tec}$). No caso específico dos robôs do tipo MOTOMAN, quando se utiliza um tempo de parada, o controlador não realiza uma compensação de v_y . Ela seria necessária para manter a frequência de tecimento constante.

Sendo assim, a frequência de tecimento configurada no robô precisa ser ajustada, segundo a equação (3):

$$Freq_{prog} = \frac{1}{\frac{1}{Freq_{tec}} - (tp_{esq} + tp_{dir})} \quad (3)$$

Onde:

$Freq_{prog}$ = frequência programada no robô MOTOMAN (Hz);

$Freq_{tec}$ = número desejado de ciclos de tecimento por segundo;

tp_{esq} = tempo de parada na extremidade esquerda (s);

tp_{dir} = tempo de parada na extremidade direita (s).

A utilização da equação (3) evidencia a dificuldade em se utilizar um sistema fechado, como um robô comercial.

3.3 Adequação do chanfro

A Figura 26 apresenta a seção transversal de uma junta para soldagem do passe de raiz aplicado de forma manual com um processo controlado [67].

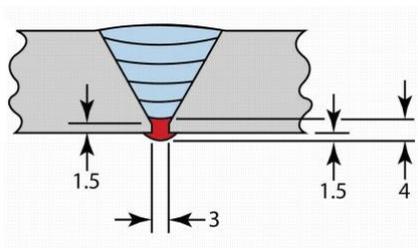


Figura 26: Geometria de uma junta “V” padrão com o passe de raiz aplicado de forma manual [67]

Como os algoritmos a serem desenvolvidos visam a imitar o soldador, foi escolhido o mesmo chanfro em que o soldador utiliza. Em operações mecanizadas, no entanto, utilizam-se atualmente o chanfro em “U” ou “J” para reduzir a quantidade de material necessário para preenchimento da junta [4].

Para facilitar a penetração do metal de solda com uma abertura reduzida foi removido o nariz do chanfro (é necessário

mais energia para fundir a porção sólida do nariz). A configuração utilizada no trabalho foi de um chanfro tipo “faca” (Figura 27). Além disto, a medida do nariz pode prejudicar a penetração devido a possíveis variações dimensionais durante a usinagem do chanfro. A remoção do nariz evita este problema.

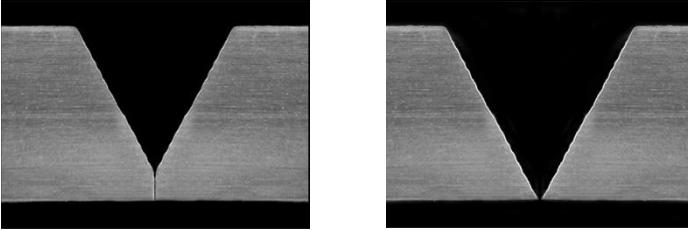


Figura 27: Chanfro em “V” com nariz (esquerda) e sem nariz (direita)

Por outro lado, com um chanfro sem nariz, quando a abertura da raiz tende a abrir, o risco de perfuração é maior, já que o próprio metal sólido do nariz não ancora (sustenta) a poça de fusão. Neste sentido, um processo com menor energia (mais “frio”) seria recomendado. Inclusive, na posição sobre-cabeça, seria menor a tendência de formação de concavidade, conforme explicado no item 2.2.

3.4 Adequação do processo CCC

3.4.1 Versão com menor energia

A configuração inicial do processo CCC atendia à sua versão sinérgica. A Figura 28 na parte de cima mostra um trecho do oscilograma de corrente e tensão processo CCC sinérgico, obtido do trabalho de *Sartori et al.* [12], para uma velocidade de arame de $3,3 \text{ m/min}$. A configuração das variáveis do sinérgico foram: (a) $cta = 1$, (b) $ckr = 0$, (c) $a = 30$.

Com o objetivo de diminuir o tempo de arco, e consequentemente, a energia entregue à poça de fusão, as variáveis do processo CCC foram reajustadas. A Figura 28 na parte de baixo mostra o oscilograma de corrente e tensão com o formato de onda utilizado neste trabalho, que foi convencionado como sendo a forma de onda tipo A.

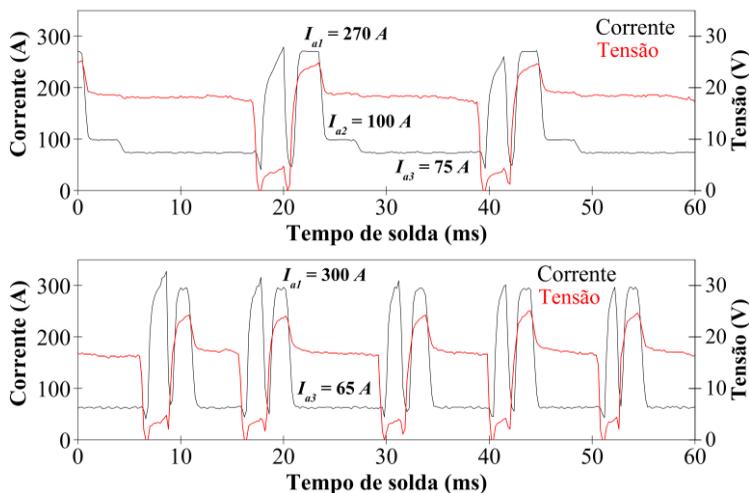


Figura 28: Oscilograma de corrente e tensão do processo CCC no programa sinérgico com $v_a = 3,3 \text{ m/min}$ (gráfico de cima) e com a forma de onda tipo **A** (gráfico de baixo)

Ambas as soldas foram obtidas dentro do chanfro do tubo e na posição plana.

Os parâmetros configurados na fase de arco do processo CCC para cada uma das versões são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Variáveis correspondentes à fase de arco para as duas formas de onda analisadas (1ª linha: sinérgico; 2ª linha: forma de onda tipo **A**)

v_a [m/min]	I_{a1} [A]	t_{a1} [ms]	t_{r1} [ms]	I_{a2} [A]	t_{a2} [ms]	t_{r2} [ms]	I_{a3} [A]
3,3	270	2,3	0,5	100	3,0	0,6	75
3,2	300	1,5	0,5	0	0	0	65

Onde:

I_{a1} = Corrente de pulso;

t_{a1} = Tempo de pulso;

t_{r1} = Tempo de descida da corrente de pulso para a corrente de patamar intermediário;

I_{a2} = Corrente do patamar intermediário;

t_{a2} = Tempo do patamar intermediário;

t_{r2} = Tempo de descida da corrente de patamar intermediário para a corrente de base;

I_{a3} = Corrente de base.

A avaliação da estabilidade é apresentada nos histogramas da Figura 29, sendo que o método utilizado para geração do gráfico é descrito no Apêndice 9.1.

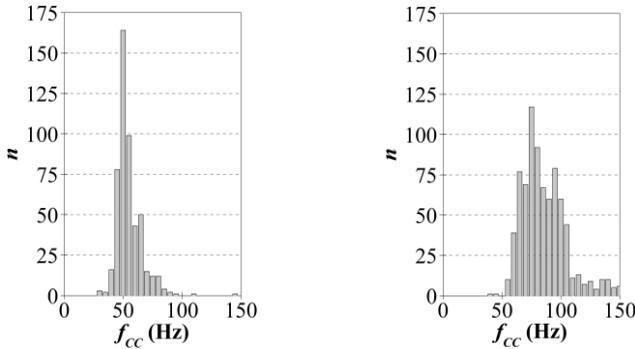


Figura 29: Histogramas da frequência de curto-circuito para o processo CCC sinérgico (esquerda) e para a forma de onda tipo **A** (direita)

A Tabela 4 mostra os índices estáticos calculados com base nos histogramas da Figura 29.

Tabela 4: Índices estáticos da frequência de curto-circuito utilizados para determinar a estabilidade do processo CCC.

	Média	Desvio-padrão	DPR
Sinérgico	52,2 Hz	10,8 Hz	20,7 %
Forma de onda A	84,2 Hz	21,2 Hz	25,2 %

Em comparação com a versão sinérgica, a frequência média foi elevada em 61,3 %.

A utilização de uma maior frequência de curto-circuito reflete diretamente nos valores médios das variáveis elétricas. A

Figura 30 mostra um gráfico de colunas com a comparação dos valores médios entre a versão sinérgica e a forma de onda A.

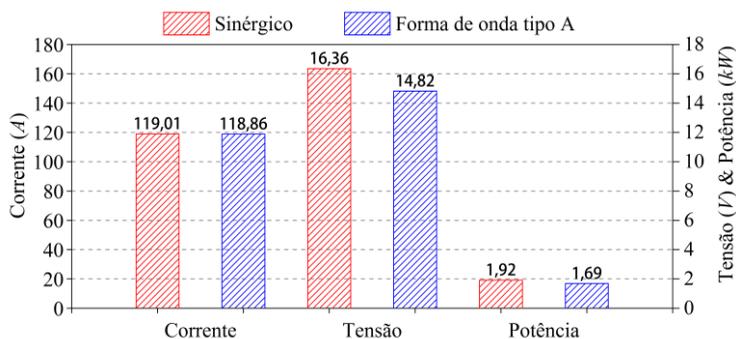


Figura 30: Comparação entre os valores médios da corrente, tensão e potência para o processo CCC na versão sinérgica e na forma de onda A

A tensão média foi reduzida em 9,5 % e a potência média em 11,6 %, sem provocar uma alteração significativa na corrente média. Isto indica um processo CCC com menor energia utilizando a forma de onda A, o que a torna mais adequada para soldagem com abertura da raiz.

3.4.2 Versão com maior energia

Em ensaios exploratórios com o processo STT, que já é bem estabelecido para a soldagem do passe de raiz de dutos, foi constatado que este apresentou uma alta estabilidade na transferência metálica para uma velocidade de arame 5 *m/min*. Neste caso, a forma de onda do processo CCC foi configurada com as variáveis da fase de arco semelhantes ao STT.

A Figura 31 mostra uma sobreposição da variação da corrente para ambos os processos.

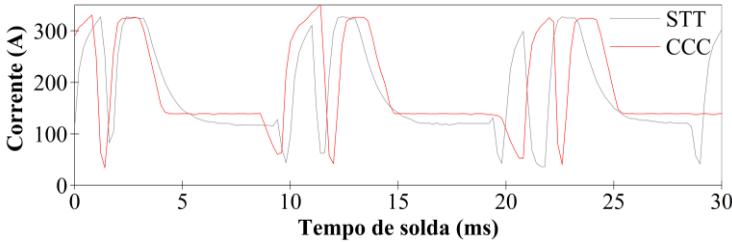


Figura 31: Oscilograma de corrente e tensão do processo STT e CCC com $v_a = 5 \text{ m/min}$

A Tabela 5 mostra as variáveis da fase de arco do processo CCC com velocidade de arame de 5 m/min , que foi convencionalizada como sendo a forma de onda tipo **B**. Na primeira linha de valores da mesma tabela encontram-se as variáveis utilizadas pela versão sinérgica do processo CCC. A configuração das variáveis do sinérgico foram mantidas as mesmas do ensaio de *Sartori et al* [12]: (a) $cta = 1$, (b) $ckr = 0$, (c) $a = 30$.

Tabela 5: Variáveis correspondentes à fase de arco para as duas formas de onda analisadas (1ª linha: sinérgico; 2ª linha: forma de onda tipo **B**)

v_a [m/min]	Período de pulso			Período de patamar intermediário			Período de base
	I_{a1} [A]	t_{a1} [ms]	t_{r1} [ms]	I_{a2} [A]	t_{a2} [ms]	t_{r2} [ms]	I_{a3} [A]
5,0	410	2,3	0,5	100	3,0	0,6	75
5,0	330	1,5	1,5	150	4,5	1,5	120

Para avaliar a estabilidade da forma de onda tipo **B**, o histograma da frequência de curto-circuito foi comparado com a versão sinérgica, conforme mostra a Figura 32. A solda foi obtida em chanfro “V” sem abertura da raiz.

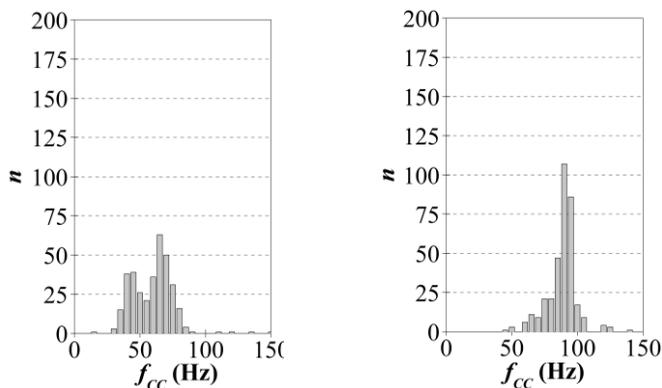


Figura 32: Histogramas da frequência de curto-circuito para o processo CCC sinérgico (esquerda) e para a forma de onda tipo **B** (direita)

A Tabela 6 mostra os índices estáticos calculados pelos histogramas da Figura 32.

Tabela 6: Índices estáticos utilizados para determinar a estabilidade do processo CCC com a forma de onda tipo **B**.

	Média	Desvio-padrão	DPR
Sinérgico	57,3 Hz	16,3 Hz	28,4 %
Forma de onda B	86,4 Hz	14,1 Hz	16,3 %

Com relação à versão sinérgica, a forma de onda tipo **B** apresentou: (a) um aumento da frequência de curto-circuito de 50,8 % e (b) uma redução do DPR de 12,1 %. Isto indica uma maior estabilidade na transferência metálica para a forma de onda tipo **B**.

3.5 Soldagem orbital sem correção

Um resultado preliminar da solda do passe de raiz de um corpo de prova de tubo foi obtido com a forma de onda tipo **A** e a

bancada de ensaios na primeira concepção. O corpo de prova foi preparado com uma abertura de raiz de aprox. 2 a 3 mm, como forma de obter penetração completa.

As variáveis de movimentação do braço robótico foram configuradas conforme mostra a Tabela 7, as quais foram configuradas de acordo com o trabalho de *Sartori et al.* [12].

Tabela 7: Variáveis de movimentação do robô utilizados para soldagem do duto sem correção das variáveis de soldagem.

v_s [cm/min]	A [mm]	$Freq_{prog}$ [Hz]	tp [s]
15,0	3,0	1,5	0,3

A trajetória de soldagem foi programada ponto-a-ponto neste ensaio, sendo que o cabeçote de medição apenas executou uma varredura da abertura da raiz durante a soldagem. O gráfico da variação da abertura instantânea em cada posição de soldagem do tubo é mostrado na Figura 33.

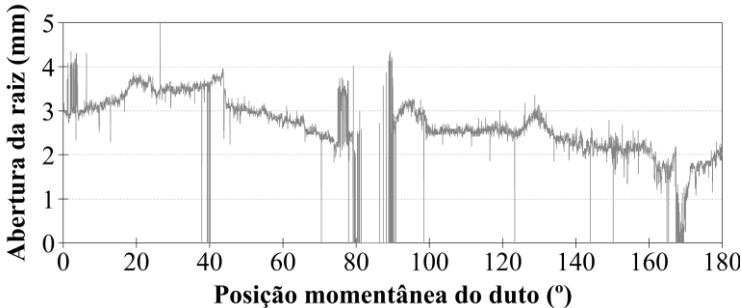


Figura 33: Leitura da abertura da raiz durante a soldagem do tubo

Observa-se que o sinal instantâneo da abertura da raiz é bem ruidoso, sendo inclusive erroneamente detectado em certos momentos. Pelo que se pode perceber nos ensaios, é que a qualidade do sinal é inerente ao sistema de reconhecimento de imagem do cabeçote de medição, que neste trabalho é de fabricação estrangeira.

No resultado da solda foi visualizada uma perfuração da raiz na posição de soldagem aproximada de 20°, destacada na Figura 34. Ela é relacionada ao aumento da abertura da raiz nesta região, podendo ser confrontada com o gráfico da Figura 33.



Figura 34: Perfuração da solda em um passe de raiz de duto com as variáveis de movimentação e elétricas constantes

A Figura 35 mostra as seções transversais da solda nas posições de soldagem aproximadas do tubo.

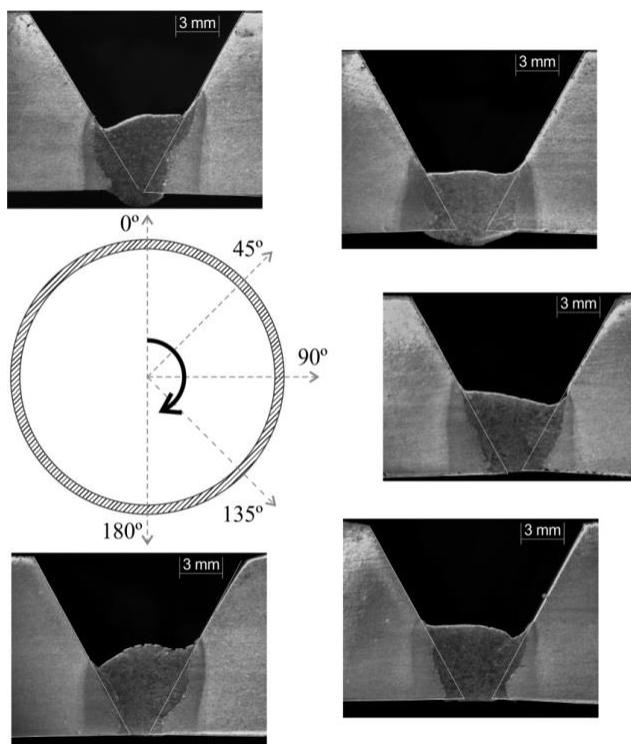


Figura 35: Macrografias da soldagem do passe de raiz em um duto com as variáveis de soldagem constantes, ataque: Nital 10 %

Uma convexidade de 1,6 mm na face do cordão foi calculada na posição sobre-cabeça (180 °).

3.6 Filtragem do sinal da abertura da raiz

Para remoção dos ruídos o sinal da abertura da raiz foi filtrado digitalmente. O método de filtragem é apresentado no fluxograma da Figura 36.

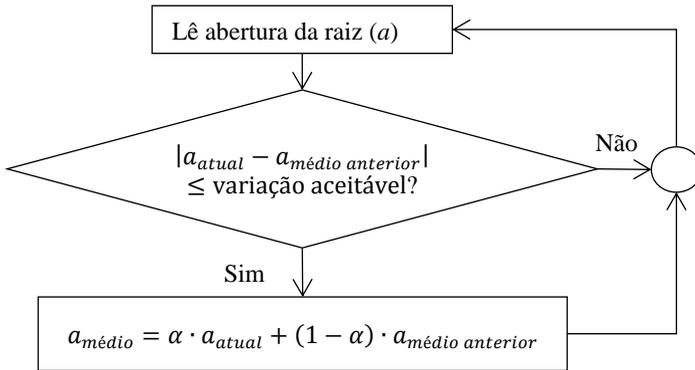


Figura 36: Algoritmos para condicionamento do sinal da abertura da raiz

Após a leitura da abertura da raiz, é averiguado se a variação da abertura da raiz atual (a_{atual}), com respeito ao seu valor médio anterior, estava dentro de um determinado limite. Um valor máximo de 0,3 mm foi utilizado.

Caso estivesse dentro do limite especificado, o valor da abertura da raiz era amortecido com base no método de suavização exponencial (*exponential smoothing*). Este filtro é bastante utilizado em processamento de sinais, atuando como um filtro passa-baixa para remover ruídos de alta frequência.

A Equação (4) descreve a fórmula utilizada pelo programa para suavização do sinal da abertura da raiz:

$$a_{média} = \alpha \cdot a_{atual} + (1 - \alpha) \cdot a_{média anterior} \quad (4)$$

O valor de α é conhecido como coeficiente de amortização. Ele foi definido em 0,1 de forma empírica. A determinação do valor ocorreu após ensaios de leitura em diferentes corpos de prova. O mesmo tipo de filtro já havia sido utilizado no trabalho de *Mendonça* [43], para filtrar os desvios padrões das correções com seguimento de junta via sensor a arco.

Se a variação da abertura da raiz for maior que 0,3 mm, o valor atual é ignorado e a última medida válida é utilizada.

Um exemplo de um sinal de abertura da raiz filtrado é mostrado na Figura 37. Observa-se que o sinal instantâneo, além de apresentar variações bruscas (de alta frequência), se mantém estável por ora em valores fora da sua linha de tendência (ver $x \approx 15$ mm). Esta característica do sinal foi removida pela verificação da variação aceitável.

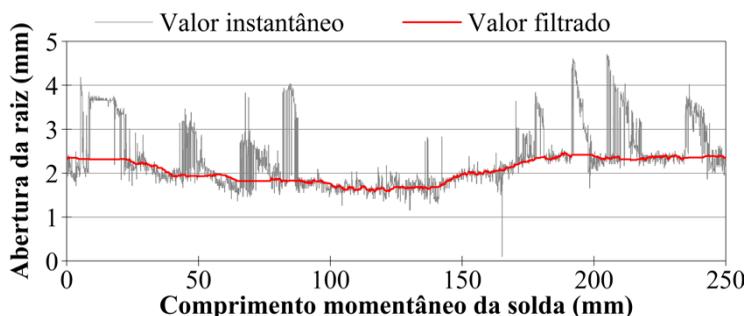


Figura 37: Filtragem do sinal da abertura da raiz fornecido pelo cabeçote de medição LASER durante uma solda do passe de raiz com uma abertura média calculada de $2,20 \pm 0,64$ mm

3.7 Síntese do capítulo

As modificações e contribuições realizadas no Capítulo 3 para o objetivo geral deste trabalho podem ser resumidas conforme segue:

- A adequação da bancada de ensaios e seus componentes mecânicos visou facilitar a execução da soldagem orbital na bancada de ensaios deste trabalho.

- As variáveis do processo CCC foram adaptadas para obter uma solda mais “fria”, em uma velocidade de arame de $3,2 \text{ m/min}$, e uma transferência metálica mais estável, em uma velocidade de arame de $5,0 \text{ m/min}$.
- A soldagem do corpo de prova de tubo com variáveis de soldagem constantes se mostrou susceptível aos seguintes itens: (a) à variação da abertura da raiz, pela perfuração observada, e (b) à posição de soldagem, pela alteração da forma geométrica do cordão de solda.
- Devido à alta quantidade de ruídos, houve necessidade de filtragem do sinal da abertura da raiz fornecido pelo sensor LASER SLS051 da empresa META-VISION. O algoritmo de remoção de ruídos foi utilizado nas demais aquisições do sensor LASER ao longo do trabalho.

4 PARAMETRIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Neste capítulo serão determinados parâmetros de soldagem em chapa plana para cada condição individual de abertura da raiz e posição de soldagem. Os parâmetros alimentarão o controle adaptativo, que é o objetivo principal deste trabalho.

Uma avaliação do processo de soldagem com filmagem de alta velocidade da transferência metálica e estabilidade é também conduzida paralelamente no Apêndice 9.1.

4.1 Procedimento experimental

Para os ensaios em chapa plana, um suporte para fixação das chapas foi adaptado na mesa posicionadora do robô, conforme mostra a Figura 38. A chapa foi fixada somente nos extremos para possibilitar a livre formação da raiz da solda.

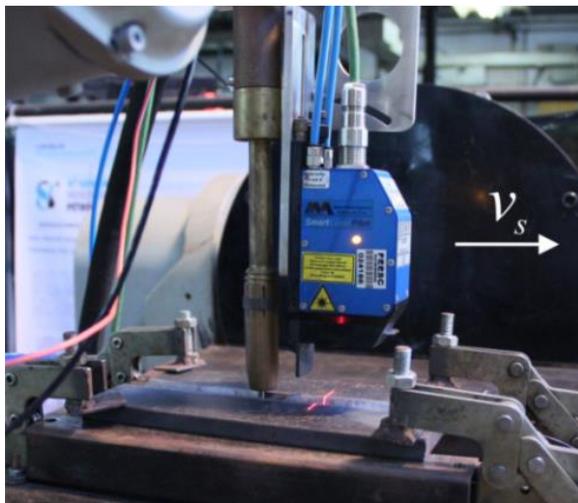


Figura 38: Vista do posicionamento do sensor LASER e da tocha de soldagem ajustados para a posição plana

O *offset* de medição foi ajustado em aprox. 43,6 mm e a base do cabeçote de medição encontrava-se paralelo à superfície da chapa.

A viabilidade dos ensaios em diferentes posições de soldagem ocorreu pela rotação da mesa posicionadora do robô, conforme mostra a Figura 39. A mesa possuía dois graus de liberdade que permaneciam fixos durante os ensaios.

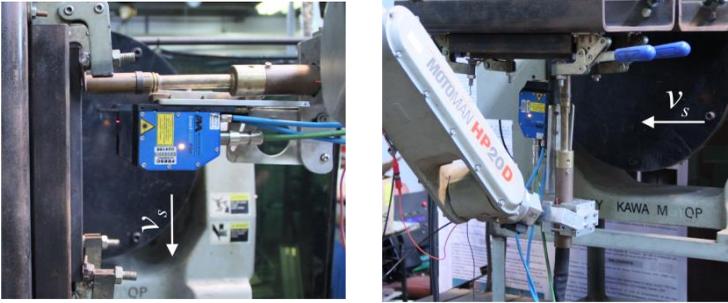


Figura 39: Rotação da mesa posicionadora do robô para a soldagem fora de posição: vertical descendente (esquerda) e sobre-cabeça (direita)

A execução da soldagem do passe de raiz ocorreu em corpos de prova de aço baixo carbono similar a um SAE 1020, com composição química descrita na Tabela 8

Tabela 8: Composição química das chapas. Valores medidos em % de peso

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>
0,177	0,777	0,005	*	0,002	*	0,006

* Valor residual < 0,001 %

As dimensões do corpo de prova e geometria do chanfro são ilustradas Figura 40. O nariz do chanfro foi removido pelos motivos explicados no item 3.3.

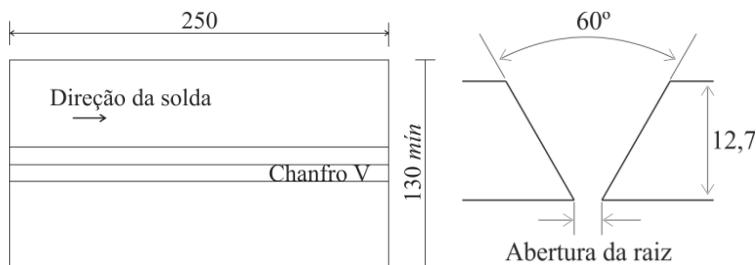


Figura 40: Dimensões do corpo de prova em *mm* (esquerda) e geometria do chanfro (direita)

Para preparação do chanfro, as extremidades das chapas eram inicialmente cortadas termicamente por chama óxido-acetilênica ou arco plasma. Na sequência, a superfície do chanfro era esmerilhada para ajuste de sua geometria e para remoção dos óxidos oriundos do corte térmico.

4.2 Metodologia dos ensaios

A abertura da raiz atendia a três diferentes configurações:

- a) Abertura reduzida: 1 *mm*
- b) Abertura adequada: 2,0 *mm*
- c) Abertura excessiva: 5,0 *mm*.

Salienta-se que as medidas de abertura eram aproximadas, devido às variações dimensionais referentes ao corte térmico e ao lixamento da superfície do chanfro. A verificação do valor instantâneo foi executada pela leitura do cabeçote de medição durante a soldagem.

Para cada conjunto de abertura da raiz e posição de soldagem característica, cordões do passe de raiz foram soldados de modo a apresentar uma penetração completa em todo corpo de prova.

Inicialmente foi obtida a parametrização para a posição de soldagem plana, e na sequência para a posição sobre-cabeça e vertical descendente, respectivamente.

O alinhamento central da tocha de soldagem foi corrigido utilizando a interface *Motoeye*.

4.3 Avaliação da qualidade da solda

Após a soldagem, a solda do passe de raiz era analisada por exame visual e macrográfico. No exame visual, segundo as normas de soldagem de dutos utilizadas [68, 69], o cordão do passe de raiz deveria estar livre de trincas superficiais, penetração incompleta e perfuração.

Para avaliação macrográfica, extraía-se uma amostra no sentido transversal ao cordão de solda, a uma distância de aproximadamente 180 mm do início da solda. As superfícies das amostras eram preparadas por lixamento até uma lixa de 1200 mesh, e posteriormente atacadas com uma solução de Nital 10 %.

As seções transversais das soldas foram observadas com um microscópio estereoscópico modelo *OPTON*. Para cálculo da geometria das soldas utilizou-se o software *Photoshop*.

As medidas calculadas são esquematicamente mostradas na Figura 41. As nomenclaturas relativas à geometria do passe de raiz foram extraídas e adaptadas das normas PETROBRAS [70, 71].

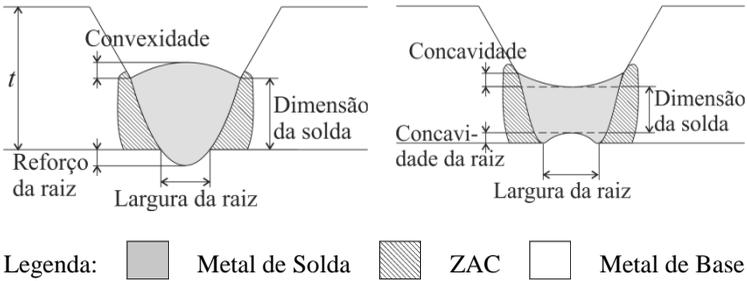


Figura 41: Seção transversal do passe de raiz e definições geométricas em duas situações: uma com saliências do metal de solda (esquerda) e outra com reentrâncias (direita)

Para facilitar o entendimento, convencionaram-se duas situações hipotéticas de geometria do cordão: uma com saliências do metal de solda e outra com reentrâncias.

Os limites máximos para cada descontinuidade, considerados neste trabalho^{IV}, são:

^{IV}Não foram encontradas em uma única norma referência a todas as medidas utilizadas (fosse ela de dutos e tubulações, ou não).

- a) Concavidade da raiz: $\leq 0,05 t$, mas máximo de $0,5 \text{ mm}$, onde t é a espessura da parede ($12,7 \text{ mm}$). Segundo norma ISO 5817 [72] (nível de qualidade B);
- b) Reforço da raiz: $\leq 1 \text{ mm} + 0,2 b$, mas máximo de $3,0 \text{ mm}$, onde b é a largura da raiz. Segundo norma ISO 5817 [72] (nível de qualidade B);
- c) Convexidade ou concavidade: Embora não haja especificidade deste item para o passe de raiz, foi utilizado um valor máximo de $1,5 \text{ mm}$. Este valor seria referente ao passe de acabamento, segundo a norma ASME IX [68];
- d) Dimensão da solda: As normas não especificam, entretanto, alguns trabalhos recomendam um valor entre 4 e 6 mm [67, 73].

4.4 Resultados

4.4.1 Parametrização do processo de soldagem

A parametrização das variáveis de soldagem utilizadas para soldagem dos corpos de prova nas diferentes aberturas de raiz e posições de soldagem é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9: Variáveis de soldagem determinadas para diferentes aberturas de raiz e posições de soldagem

Abertura da raiz [mm]	Posição [°]	v_a [m/min]	A [mm]	$Freq_{prog}$ [Hz]	tp [s]	v_s [cm/min]
1,00	0	5,0	0	0	0	30,0
0,97	90	5,0	0	0	0	45,0
0,88	180	5,0	0	0	0	30,0
1,99	0	3,2	2,0	2,5	0,3	15,6
1,82	90	3,2	2,4	2,5	0,3	18,0
2,11	180	3,2	2,4	2,5	0,3	18,0
4,63	0	3,2	7,6	1,0	1,0	6,0
4,63	90	3,2	6,4	0,8	0,3	7,2
4,71	180	3,2	6,4	0,8	0,3	6,0

Uma melhor visualização da relação entre as variáveis de soldagem podem ser obtidas com a ajuda de gráficos.

A variação da velocidade de arame em função da abertura da raiz é mostrada na Figura 42.

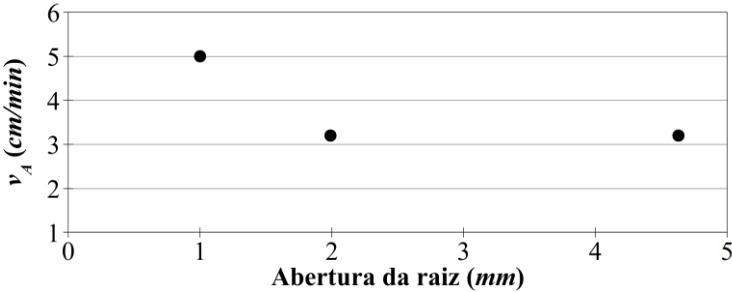


Figura 42: Parametrização da velocidade de arame (v_A)

Não houve uma alteração da velocidade de arame com relação à posição de soldagem, pois os efeitos da variação da penetração em função da posição foram contornados com o ajuste nos parâmetros de movimentação do robô.

Sendo assim, a Figura 43 mostra o gráfico da variação da velocidade de soldagem para diferentes aberturas da raiz e posições de soldagem.

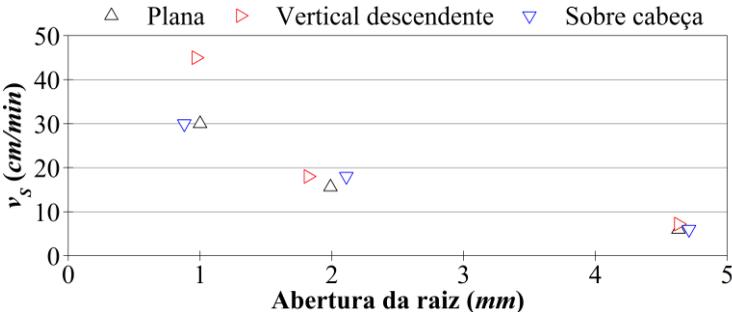


Figura 43: Parametrização da velocidade de soldagem (v_S)

Na abertura de raiz reduzida, a v_S da posição plana e sobre-cabeça foi definida em 30 *cm/min*. Já na posição vertical descendente, a velocidade foi elevada para 45 *cm/min* (um aumento de

50 %). Isto para evitar a falta de penetração da raiz, que ocorria devido ao escorrimento da poça de fusão.

Na abertura de raiz adequada, a v_S da posição plana foi inicialmente definida em $15,6 \text{ cm/min}$. Na posição sobre-cabeça, a mesma configuração provocava uma convexidade acima de $1,5 \text{ mm}$. Neste caso, para reduzir a convexidade, a solução mais adequada foi aumentar a velocidade de soldagem para $18,0 \text{ cm/min}$, que foi mantida a mesma na posição vertical descendente.

Na abertura de raiz máxima, houve uma dificuldade para parametrização inicial, a qual foi solucionada com a soldagem manual do corpo de prova por um soldador experiente. Com base na filmagem de sua movimentação, os parâmetros foram calculados de forma aproximada, e, na sequência, melhorados. A velocidade de soldagem média utilizada pelo soldador foi de $6,0 \text{ cm/min}$ com uma amplitude de $7,6 \text{ mm}$ (Figura 44) e um tempo de parada $1,0 \text{ s}$ (Figura 45).

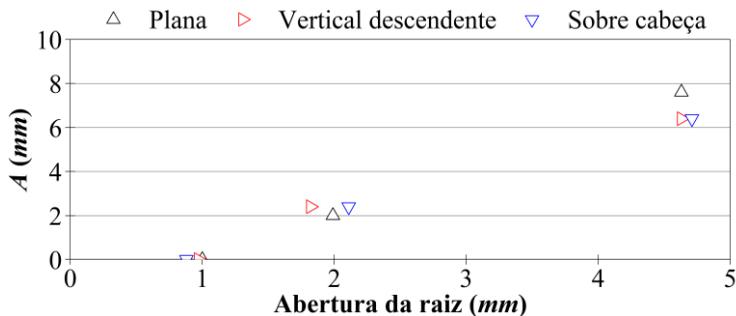


Figura 44: Parametrização da amplitude de tecimento (A)

No caso da posição vertical descendente e sobre-cabeça a amplitude para a abertura da raiz excessiva foi reduzida para $6,4 \text{ mm}$ e o tempo de parada mantido em $0,3 \text{ s}$ para que não houvesse falta de penetração.

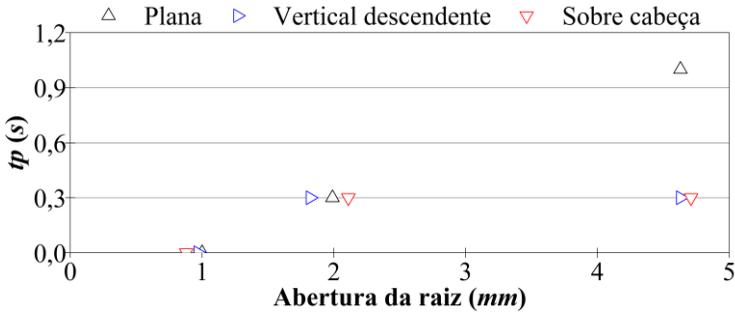
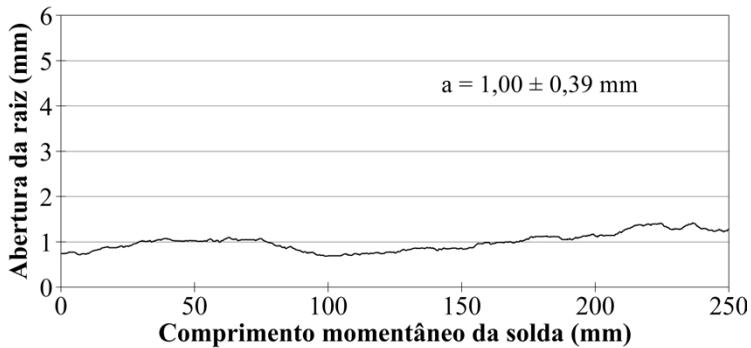


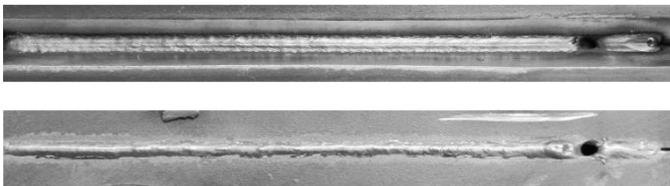
Figura 45: Parametrização do tempo de parada (tp).

4.4.2 Resultados de solda

A Figura 46 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $1,00 \pm 0,39$ mm na posição plana.



a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER



b) Vista superior e inferior da solda.

Figura 46: Resultado da solda na posição plana com um resultado de medição da abertura da raiz de $1,00 \pm 0,39$ mm

Pela análise visual do passe de raiz pode ser vista uma perfuração da raiz, a qual não é permitida por norma. Contudo, como se pode ver no gráfico da leitura do sensor LASER, a causa da perfuração foi o aumento da abertura da raiz nesta região. Sob esta consideração, o corpo de prova foi validado.

A Figura 47 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $0,97 \pm 0,47 \text{ mm}$ na posição vertical descendente.

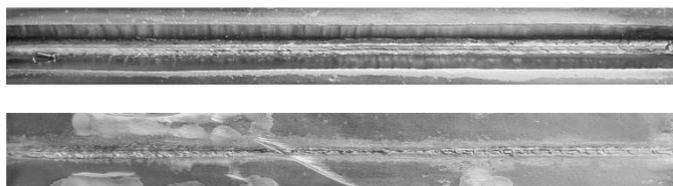
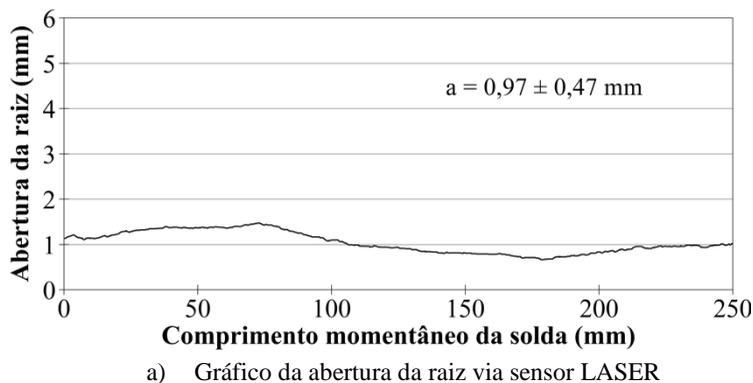
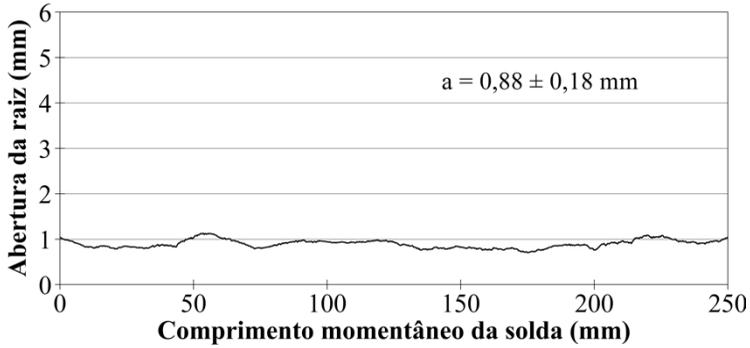


Figura 47: Resultado da solda na posição vertical descendente com um resultado de medição da abertura da raiz de $0,97 \pm 0,47 \text{ mm}$

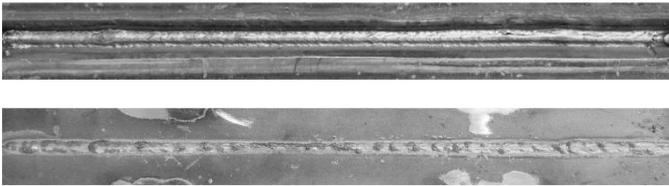
A penetração do passe de raiz foi alcançada em todo corpo de prova. Na região central, a raiz apresentou uma menor largura, evidenciando um risco de falta de penetração. Como se pode ver no gráfico da leitura do sensor LASER, esta menor largura é associada à menor abertura da raiz na região central do corpo de prova.

A Figura 48 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $0,88 \pm 0,18 \text{ mm}$ na posição sobre-cabeça. Nes-

te corpo de prova, a penetração completa foi alcançada em todo corpo de prova sem objeções.



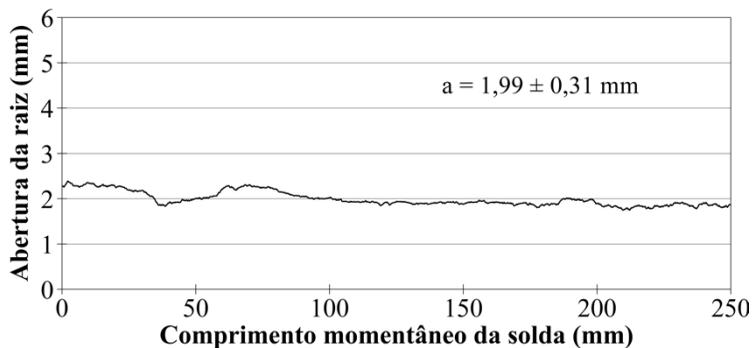
a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER



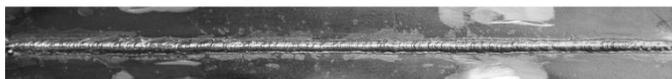
b) Vista superior e inferior da solda

Figura 48: Resultado da solda na posição sobre-cabeça com um resultado de medição da abertura da raiz de $0,88 \pm 0,18 \text{ mm}$

A Figura 49 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $1,99 \pm 0,31 \text{ mm}$ na posição plana.



a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER

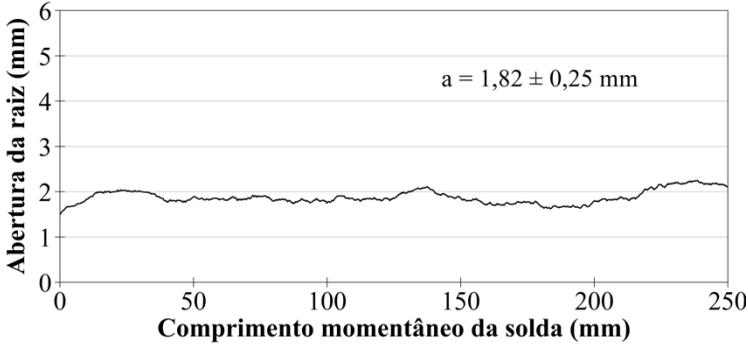


b) Vista superior e inferior da solda

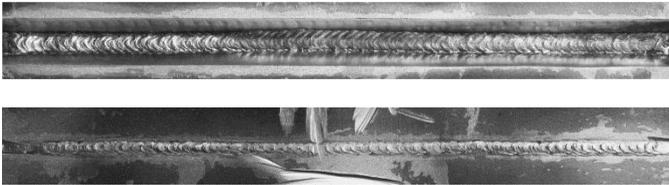
Figura 49: Resultado da solda na posição plana com um resultado de medição da abertura da raiz de $1,99 \text{ mm} \pm 0,31 \text{ mm}$

Pela análise visual do passe de raiz pode-se ver que a penetração total foi alcançada em todo comprimento do corpo de prova.

A Figura 50 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $1,82 \pm 0,25 \text{ mm}$ na posição vertical descendente.



a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER

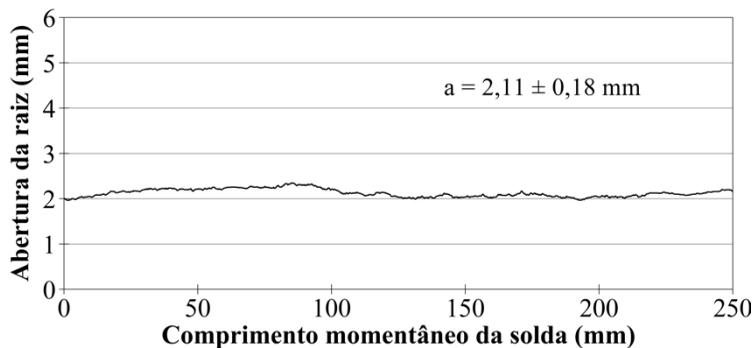


b) Vista superior e inferior da solda

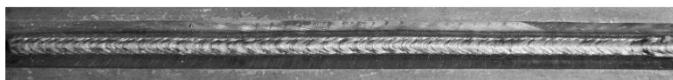
Figura 50: Resultado da solda na posição vertical descendente com um resultado de medição da abertura da raiz de $1,82 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$

Pela análise visual do passe de raiz pode-se ver que a penetração total foi alcançada em todo comprimento do corpo de prova. Ela é ainda garantida mesmo diante de uma falha momentânea de seguimento de junta, conforme mostra o trecho de solda aproximado de 100 a 150 mm. Esta instabilidade foi causada pelas configurações da interface *Motoeye*, as quais não serão abordadas neste trabalho.

A Figura 51 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $2,11 \pm 0,18 \text{ mm}$ na posição sobre-cabeça.



a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER

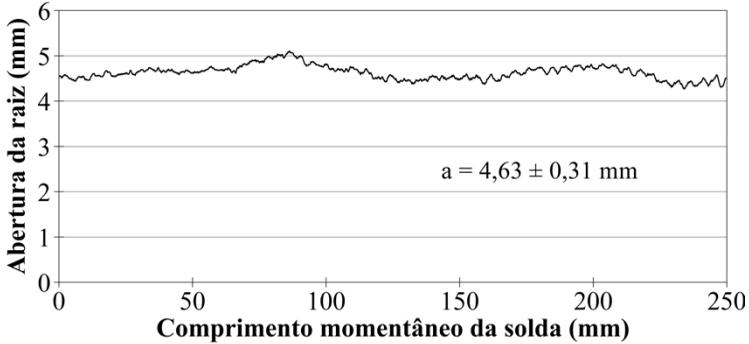


b) Vista superior e inferior da solda

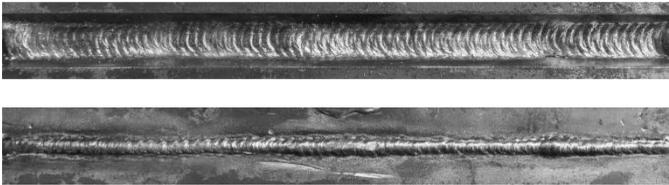
Figura 51: Resultado da solda na posição sobre cabeça com um resultado de medição da abertura da raiz de $2,11 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$

Pela análise visual do passe de raiz pode-se ver que a penetração total foi alcançada em todo comprimento do corpo de prova.

A Figura 52 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $4,63 \pm 0,31 \text{ mm}$ na posição plana.



a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER



b) Vista superior e inferior da solda

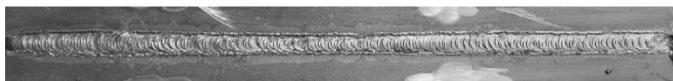
Figura 52: Resultado da solda na posição plana com um resultado de medição da abertura da raiz de $4,63 \text{ mm} \pm 0,31 \text{ mm}$

Pela análise visual do passe de raiz pode-se ver que a penetração total foi alcançada em todo comprimento do corpo de prova.

A Figura 53 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $4,63 \pm 0,22 \text{ mm}$ na posição vertical descendente.



a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER



b) Vista superior e inferior da solda

Figura 53: Resultado da solda na posição vertical descendente com um resultado de medição da abertura da raiz de $4,63 \text{ mm} \pm 0,22 \text{ mm}$

Pela análise visual do passe de raiz pode-se ver que a penetração total foi alcançada em todo comprimento do corpo de prova.

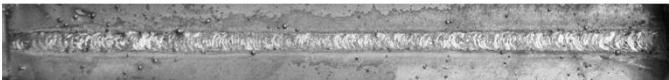
A Figura 54 mostra o resultado do passe de raiz para uma abertura de raiz de $4,71 \pm 0,57 \text{ mm}$ na posição sobre-cabeça.



a) Gráfico da abertura da raiz via sensor LASER



b) Vista superior da solda



c) vista inferior da solda

Figura 54: Resultado da solda na posição sobre-cabeça com um resultado de medição da abertura da raiz de $4,71\text{mm} \pm 0,57\text{mm}$

Pela análise visual do passe de raiz pode-se ver que a penetração total foi alcançada em todo comprimento do corpo de prova. Apesar de no início do cordão ocorrer uma instabilidade no seguimento de junta, isto não influenciou visualmente na penetração total do metal de solda.

4.4.3 Avaliação da geometria da solda

Para avaliação da geometria da solda e de possíveis defeitos na sua seção transversal, uma análise macrográfica foi realizada em todas as situações analisadas. A Figura 55 mostra o resultado.

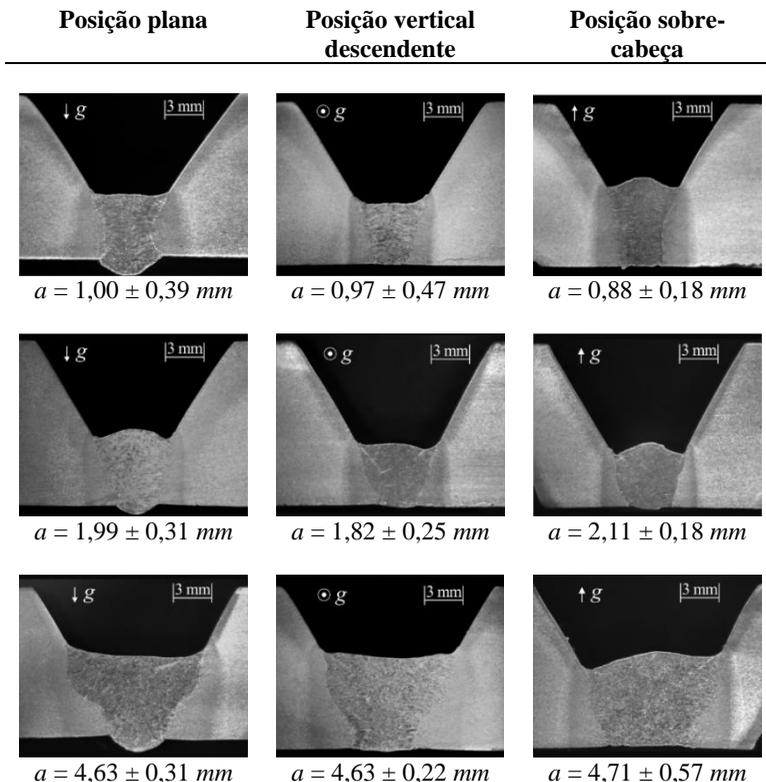


Figura 55: Macrografias da solda do passe de raiz para diferentes aberturas de raiz (a) e posições de soldagem, ataque: Nital 10 %

Como se pode ver pelo aspecto superficial das macrografias, em todas as situações foi obtido um passe de raiz isento de defeitos.

Para avaliação do formato geométrico do cordão de solda perante os critérios das normas utilizadas neste trabalho é mostrado a Tabela 10.

Tabela 10: Cálculo da geometria das soldas do passe de raiz para diferentes aberturas de raiz e posições de soldagem

Abertura da raiz [mm]	Posição [°]	Reforço (+) ou Concavidade (-) da raiz [mm]	Convexidade (+) ou concavidade (-) da face [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura raiz [mm]	Aprovado ?
1,00	0	+ 1,5	n.a.	4,7	5,0	Sim
0,97	90	n.a.	-0,6	4,7	2,5	Sim
0,88	180	n.a.	0,8	6,0	3,1	Sim
1,99	0	+ 0,8	0,7	5,1	3,3	Sim
1,82	90	+ 0,2	0,5	4,2	3,1	Sim
2,11	180	+ 0,2	0,9	4,0	3,3	Sim
4,63	0	+ 1,5	-0,8	6,5	4,5	Sim
4,63	90	+ 0,3	-0,4	7,0	4,9	Sim
4,71	180	- 0,2	1,3	5,9	6,1	Sim

Os cálculos mostraram que todas as geometrias analisadas foram aprovadas.

4.5 Síntese do capítulo

Os resultados apresentados neste capítulo podem ser sintetizados, conforme segue:

- A parametrização da soldagem do passe de raiz para 3 conjuntos de abertura de raiz e 3 posições de soldagem foi obtida satisfatoriamente.
- As soldas foram avaliadas segundo normas técnicas consideradas restritivas para o passe de raiz e todas as situações atenderam os requisitos esperados, salvo as exceções que foram justificadas pelos dados do cabeçote de medição.

5 DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS

No capítulo anterior foram determinadas variáveis de soldagem para condições individuais de variação da abertura da raiz e de posições de soldagem. Para funcionamento do controle adaptativo as variáveis de soldagem são interpoladas em tempo real com base na leitura do cabeçote de medição LASER (abertura da raiz e centro da junta) e na posição de soldagem (via robô). Na sequência, elas são enviadas aos componentes do sistema (fonte de soldagem e robô).

5.1 Detalhamento da comunicação

O diagrama de blocos da Figura 56 ilustra esquematicamente a comunicação do sistema.

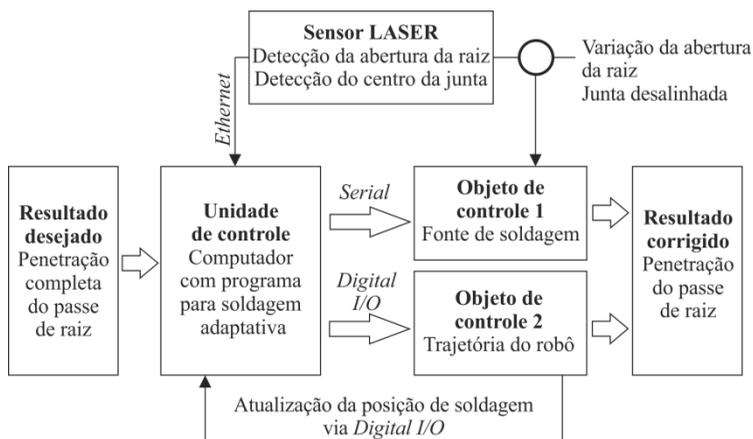


Figura 56: Diagrama de blocos para ilustrar a integração e comunicação do sistema para soldagem adaptativa

As variações da abertura da raiz e o desalinhamento da junta são capturados por um cabeçote de medição LASER. As informações são enviadas ao computador via comunicação *Ethernet*.

No computador foi instalado um programa para soldagem adaptativa, que coordena as operações de medição e de soldagem, fornecendo as variáveis de soldagem necessárias para correção do passe de raiz.

As variáveis de operação da fonte de soldagem (objeto de controle 1) são:

- Velocidade de arame;
- Parâmetros da forma de onda de corrente do processo CCC.

Elas são enviadas à fonte de soldagem via comunicação serial.

As variáveis de operação da trajetória de soldagem (objeto de controle 2), que foram definidas como forma de imitar o movimento do soldador, são:

- Velocidade de soldagem (v_s);
- Amplitude de tecimento (A);
- Tempo de parada (tp);
- Frequência de tecimento ($Freq_{prog}$);
- Correção de altura e alinhamento central.

As variáveis de movimentação e de correção da trajetória da tocha são enviadas ao robô via *digital I/O*, pelo fato de estar ser única forma de comunicação disponibilizada pelo fabricante do robô. Uma porta de 12 *bits* é utilizada, sendo que as variáveis de movimentação (v_s , A , tp) e de correção são enviadas em duas etapas sequenciais, que são sincronizadas pelo JOB do robô (Apêndice 9.2).

A Tabela 11 mostra a quantidade de *bits* utilizada por cada variável individual, o valor mínimo e máximo limitado pelo sistema e a resolução aproximada de correção.

Pela limitação de *bits* disponíveis na porta paralela do computador, foi decidido calcular a frequência de tecimento, $Freq_{prog}$, diretamente no robô. Assim, a resolução das outras variáveis de correção não seria prejudicada.

A partir da relação entre a distância percorrida pela tocha durante um ciclo de tecimento (dobro do valor da amplitude) e o tempo despendido (inverso da frequência de tecimento), é possível encontrar a velocidade média no eixo y . A equação (5) descreve esta relação, sendo que o algarismo 6 foi utilizado para conversão de unidade:

$$v_y = A * 2 * Freq_{prog} * 6 \quad (5)$$

Tabela 11: Variáveis enviadas ao robô via comunicação digital

Variáveis	Bits	Valor mínimo	Valor máximo	Resolução
v_s	5	6 <i>cm/min</i>	45 <i>cm/min</i>	1,258 <i>cm/min</i>
A	4	0 <i>mm</i>	7,6 <i>mm</i>	0,506 <i>mm</i>
tp	3	0,3 <i>s</i>	1,0 <i>s</i>	0,143 <i>s</i>
Correção lateral (eixo y)	5	0 <i>mm</i>	4 <i>mm</i>	0,129 <i>mm</i>
Correção de altura (eixo z)	5	0 <i>mm</i>	4 <i>mm</i>	0,129 <i>mm</i>

A Tabela 12 mostra o cálculo de v_y para o conjunto das variáveis de tecimento obtidas no Capítulo 4.

Tabela 12: Conjunto das variáveis de tecimento obtidos no Capítulo 4, com o respectivo cálculo de v_y

Abertura da raiz [<i>mm</i>]	Posição de soldagem [°]	A [<i>mm</i>]	$Freq_{prog}$ [<i>Hz</i>]	tp [s]	v_y [<i>cm/min</i>]
1,00	0	0	0	0	0
0,97	90	0	0	0	0
0,88	180	0	0	0	0
1,99	0	2,0	2,5	0,3	60,0
1,82	90	2,4	2,5	0,3	72,0
2,11	180	2,4	2,5	0,3	72,0
4,63	0	7,6	1,0	1,0	91,2
4,63	90	6,4	0,8	0,3	61,4
4,71	180	6,4	0,8	0,3	61,4

Com os dados da Tabela 12 foi obtido uma relação simplificada de v_y em função de tp , mostrada na Figura 57. Desta forma, dependendo do tempo de parada e amplitude calculado pelo sistema, a $Freq_{prog}$ é ajustada pelo robô com base na equação (5).

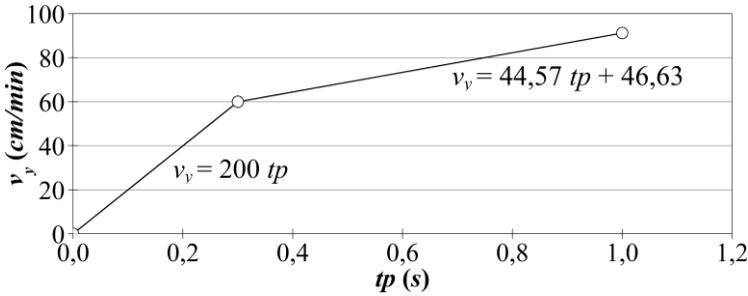


Figura 57: Gráfico com a relação de v_y em função do tempo de parada

5.2 Programação da trajetória orbital no robô

A primeira parte dos algoritmos do sistema para soldagem adaptativa foi programada robô. A função do programa é gerar uma trajetória orbital de forma automatizada.

A trajetória orbital foi dividida em trechos, conforme mostra a Figura 58, para um trecho de 15° . O trecho a ser escolhido é arbitrário no programa.

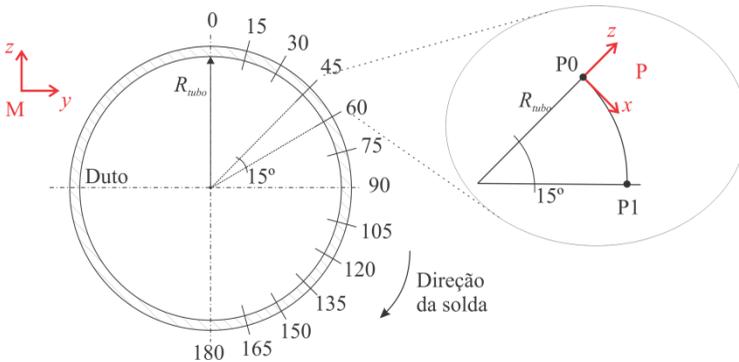


Figura 58: Ilustração da divisão da trajetória orbital em trechos

O programa utiliza funções aritméticas para cálculo do deslocamento da tocha, com base na informação inicial do raio interno do tubo, R_{tubo} . Entre cada um dos trechos um sistema de coordenadas P é atualizado, e o mesmo deslocamento entre os

pontos P0 a P1 é utilizado na movimentação da tocha, que é linearmente interpolada.

A orientação da tocha é incrementada com base em uma variável contadora, como forma de manter o ângulo de ataque da tocha constante.

5.3 Programação da trajetória no computador

A segunda parte dos algoritmos do sistema para soldagem adaptativa foi programada no computador utilizando a linguagem C#. A interface do programa desenvolvido pode ser visualizada na Figura 59.

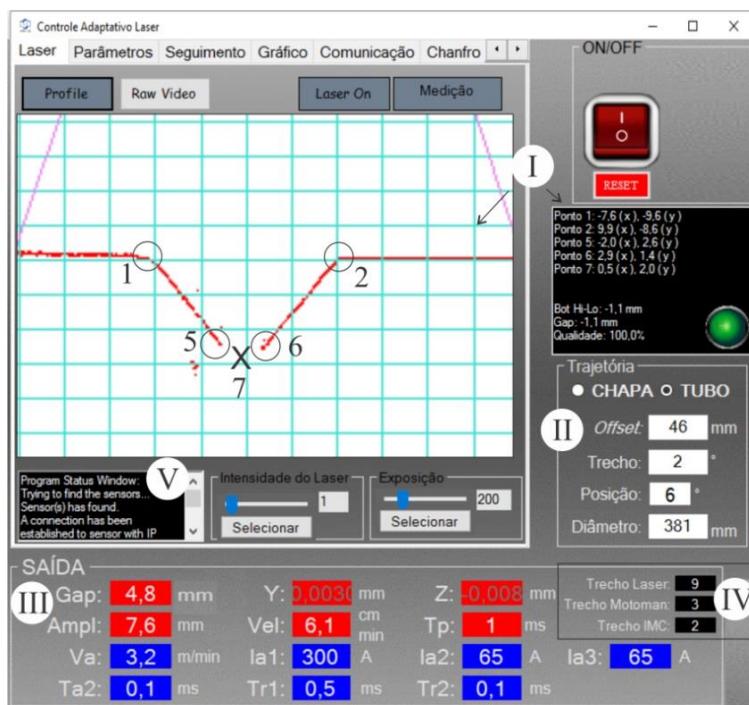


Figura 59: Tela principal do programa para soldagem adaptativa

A seguir é dado um breve detalhamento da interface do programa:

- I. Perfil da junta informado pelo cabeçote de medição LASER. Nele são destacados os pontos característicos e o *tracking point*. No quadrado preto da direita são disponibilizadas as seguintes informações: (a) coordenada dos pontos característicos e do *TP*, (b) medida da abertura da raiz (*gap*), (c) medida do desnivelamento (*Bot Hi-Lo*), (d) índice percentual relativo ao número de leituras válidas em relação ao total de leituras.
- II. Campo destinado à definição das variáveis relativas à trajetória do robô, que são: (a) *offset* de medição, (b) trecho para divisão da trajetória orbital, (c) posição de soldagem atual e (d) diâmetro interno do duto.
- III. Campo destinado a informar as variáveis momentâneas que estão sendo enviadas em tempo real para o robô (em vermelho, com exceção do *gap*) e para a fonte de soldagem (em azul).
- IV. O trecho atual em que cada um dos componentes do sistema se encontra: (a) trecho LASER, (b) trecho IMC (fonte de soldagem), (c) trecho *Motoman* (robô).
- V. Informação de status e configuração do cabeçote de medição.

As variáveis da trajetória são explicadas com a ajuda da ilustração da Figura 60.

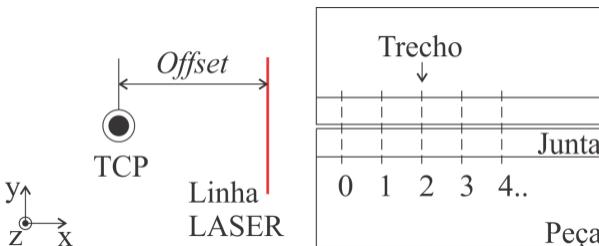


Figura 60: Ilustração das variáveis relativas à trajetória do robô no sistema de soldagem adaptativa

À medida que o robô se desloca pelos trechos programados no robô, o computador enumera sequencialmente os trechos, com base em um sinal digital enviado pelo robô.

A relação entre o “*offset*” de medição e a distância entre cada trecho, determina a quantidade de trechos que o robô e a fonte de soldagem estão atrasados em relação à linha LASER.

Simplificadamente, o computador precisa, durante a varredura do cabeçote de medição: (a) salvar os dados da aquisição (abertura da raiz e posição central da junta), (b) filtrá-los, (c) calcular as variáveis de soldagem mais adequada e (d) enviá-las à fonte de soldagem e ao robô.

5.3.1 Etapa de procura de junta

O ponto inicial da junta é determinado pelo trecho “0”. Este ponto é adquirido pelo sensor LASER em uma etapa inicial, chamada de procura de junta. Os algoritmos para procura da junta são executados somente pelo JOB, e não pelo computador.

A Figura 61 ilustra o funcionamento da procura de junta com o sensor LASER.

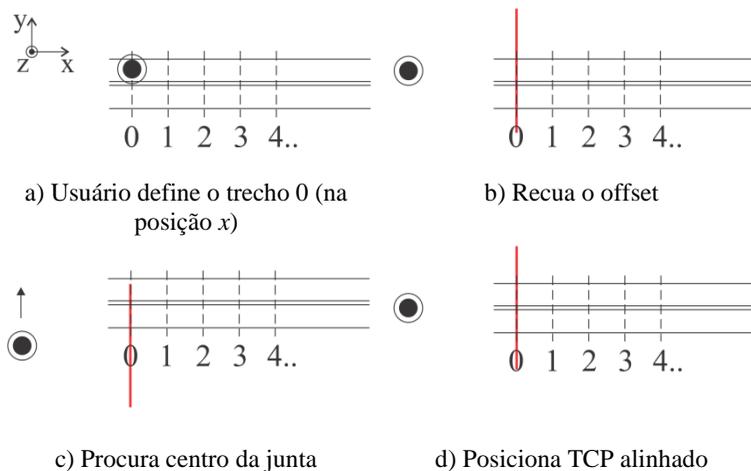


Figura 61: Ilustração da etapa inicial de procura de junta utilizando o cabocete de medição LASER

Inicialmente, o programador movimenta o robô até uma posição aproximada do início da junta (trecho “0”). A posição programada define o início da junta somente na coordenada x (Figura 61a). Nos eixos y e z , a posição do centro da junta será determinada pelo cabeçote de medição LASER.

Durante a execução da procura da junta, há um recuo de *offset* da tocha (Figura 61*b*), partindo da posição inicial. Em seguida, o conjunto sensor/tocha é deslocado lateralmente até que uma leitura válida da junta seja adquirida (Figura 61*c*). A posição encontrada é salva e o robô se movimenta para ficar alinhado lateral e verticalmente ao início da junta encontrado (Figura 61*d*).

5.3.2 Etapa de execução da trajetória com correção das variáveis

Após a tocha estar corretamente alinhada ao início da junta, a comunicação entre o cabeçote de medição e o computador é efetivamente iniciada. Paralelamente, o robô inicia sua movimentação em direção ao trecho “0”.

Na etapa de varredura inicial, ilustrada esquematicamente na Figura 62, o trecho em que a tocha se encontra é negativo. Em trechos negativos, o computador comanda o robô com a velocidade máxima do sistema que é de 45 cm/min . A posição da tocha não é corrigida pelo computador durante a varredura inicial (erro de posição = 0).

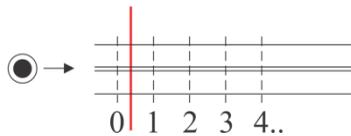


Figura 62: Ilustração esquemática da varredura inicial

Quando a tocha chega ao início da junta, conforme mostra a Figura 63, as variáveis de soldagem correspondentes à varredura inicial já foram devidamente processadas e ordenadas pelo computador. Elas são salvas temporariamente na forma de uma tabela e são enviados ao robô e à fonte de soldagem no momento correto em que a tocha se encontra, sempre descontando a quantidade de trechos contida no “*offset*” de medição.

No trecho “0”, a solda é iniciada e as variáveis da fonte de soldagem e de movimentação do robô passam a ser corrigidos a cada trecho.

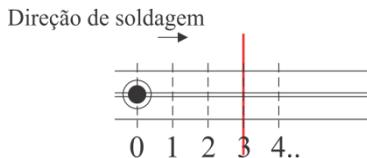


Figura 63: Ilustração esquemática da tocha posicionada no início da junta

5.4 Interpolação das variáveis de soldagem

A Figura 64 mostra uma tela secundária do programa, na qual são inseridas as variáveis de soldagem para cada condição individual de variação do processo de soldagem, que neste trabalho foram determinadas no Capítulo 4.

Modo	Gap Mínimo	Gap Ideal	Gap Máximo
PLANA	Gap: 1 mm	Gap: 1,99 mm	Gap: 4,63 mm
PLANA	Ampl: 0 mm	Ampl: 2 mm	Ampl: 7,6 mm
PLANA	Vel: 30 cm/min	Vel: 15,6 cm/min	Vel: 6 cm/min
PLANA	Tp: 0,3 s	Tp: 0,3 s	Tp: 1 s
PLANA	Va: 5 m/min	Va: 3,2 m/min	Va: 3,2 m/min
PLANA	Ia1: 330 A	Ia1: 300 A	Ia1: 300 A
PLANA	Ia2: 150 A	Ia2: 65 A	Ia2: 65 A
PLANA	Ia3: 120 A	Ia3: 65 A	Ia3: 65 A
PLANA	Ta2: 4,5 ms	Ta2: 0,1 ms	Ta2: 0,1 ms
PLANA	Tr1: 1,5 ms	Tr1: 0,5 ms	Tr1: 0,5 ms
PLANA	Tr2: 1,5 ms	Tr2: 0,1 ms	Tr2: 0,1 ms
Interpolação	Full Range	Half Range	

Figura 64: Tela secundária do programa para soldagem adaptativa com as variáveis de soldagem do banco de dados

Com a interpolação do banco de dados, o programa atualiza as variáveis de soldagem para diferentes situações de abertura da raiz e posição de soldagem.

A interpolação dos parâmetros com respeito à abertura de raiz e à posição de soldagem ocorre de forma distinta.

5.4.1 Com respeito à variação da abertura da raiz

O método empregado para interpolação com respeito à variação da abertura da raiz é baseado na *análise de regressão linear*. Nele, o programa verifica qual a linha de tendência que melhor se adequa aos valores inseridos no banco de dados. Em uma primeira etapa, quatro possibilidades são averiguadas: (a) regressão linear, (b) regressão logarítmica, (c) regressão exponencial e (d) regressão potencial.

A adequabilidade do modelo foi verificada pela análise de variância. Foi analisado se o fator F_0 excedia o valor tabelado para um dado nível de significância (α). Caso exceda, a hipótese aceita é de que o parâmetro da regressão (β_1) não é igual a zero (teste para $H_0: \beta_1 = 0$ e $H_1: \beta_1 \neq 0$) e que o R^2 é significativamente diferente de zero [74]. Em outras palavras, o modelo analisado é estatisticamente adequado.

Outro índice analisado é o fator P, o qual indica a probabilidade de se errar ao afirmar que o modelo escolhido tem impacto significativo sobre a variância do parâmetro analisado.

Caso o modelo não seja adequado é realizado uma interpolação linear simples entre cada abertura individual. Este método de interpolação é chamado de *half range* pelo programa.

É importante ressaltar que o modelo escolhido pode não representar fielmente o fenômeno físico envolvido já que, devido às dificuldades experimentais, a quantidade de amostragem é relativamente baixa.

5.4.1.a Amplitude de tecimento

A Tabela 13 apresenta os resultados da análise da adequabilidade dos modelos nas três posições de soldagem. Os modelos escolhidos para cada posição de soldagem estão destacados. Observa-se que nos modelos escolhidos, para um $\alpha = 5\%$, tem-se que: $F_0 > 161,4$ (valor tabelado para $F_{(0,05;1;1)}$) e $P < 5\%$.

Tabela 13: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para a amplitude de tecimento nas três posições de soldagem

Posição da tocha	Curva	F ₀	P	GL	R ²
Plana	<i>lin.</i>	470,60	2,93 %	2	0,9979
	<i>log.</i>	42,75	9,66 %	2	0,9771
	<i>exp.</i>	1,99	39,27 %	2	0,6653
	<i>pot.</i>	5,04	26,68 %	2	0,8344
Vertical descendente	<i>lin.</i>	40,74	9,89 %	2	0,9760
	<i>log.</i>	947,53	2,07 %	2	0,9989
	<i>exp.</i>	1,52	43,43 %	2	0,6025
	<i>pot.</i>	3,44	31,47 %	2	0,7750
Sobre-cabeça	<i>lin.</i>	284,64	3,77 %	2	0,9965
	<i>log.</i>	34,32	10,76 %	2	0,9717
	<i>exp.</i>	2,27	37,30 %	2	0,6942
	<i>pot.</i>	7,16	22,77 %	2	0,8774

A Equação (6) descreve o modelo linear para variação da amplitude (A) na posição plana conforme a abertura da raiz:

$$A = -1,9197 + 2,0681 \cdot a \quad (6)$$

Sendo válido para $1,0 \leq a \leq 4,6 \text{ mm}$.

A Equação (7) descreve o modelo logarítmico para a posição vertical descendente:

$$A = -0,0557 + 4,1091 \cdot \ln(a) \quad (7)$$

Sendo válido para $1,0 \leq a \leq 4,6 \text{ mm}$.

A Equação (8) descreve o modelo linear para a posição sobre-cabeça:

$$A = -1,3028 + 1,6504 \cdot a \quad (8)$$

Sendo válido para $0,9 \leq a \leq 4,6 \text{ mm}$.

A Figura 65 mostra o gráfico dos três modelos calculados.

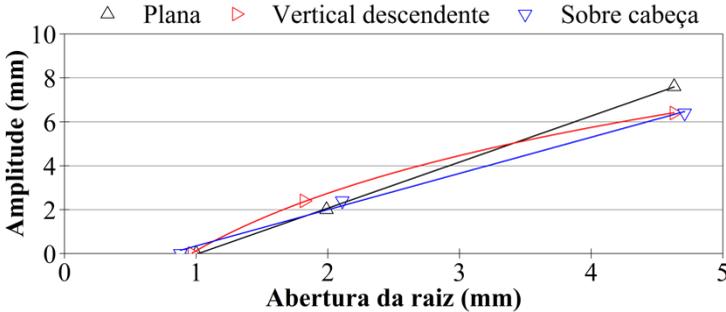


Figura 65: Interpolação da amplitude de tecimento para diferentes aberturas da raiz e posições de soldagem

5.4.1.b Velocidade de soldagem

A Tabela 14 apresenta os resultados da análise da adequabilidade dos modelos nas três posições de soldagem. Os modelos escolhidos para cada posição de soldagem estão destacados. Observa-se que no caso da posição plana e sobre-cabeça, para um $\alpha = 5\%$, tem-se que: $F_0 > 161,4$ e $P < 5\%$.

No caso específico da posição vertical descendente, a adequabilidade do modelo foi avaliada para um $\alpha = 10\%$, sendo o $F_0 > 39,86$ (valor tabelado para $F_{(0,1;1;1)}$) e o fator $P < 10\%$.

A Equação (9) descreve o modelo potencial para a variação da velocidade de soldagem (v_s) na posição plana conforme a abertura da raiz:

$$v_s = 30,764 \cdot a^{-1,053} \quad (9)$$

Sendo válido para $1,0 \leq a \leq 4,6 \text{ mm}$.

A Equação (10) descreve o modelo potencial para a posição vertical descendente:

$$v_s = 40,496 \cdot a^{-1,158} \quad (10)$$

Sendo válido para $1,0 \leq a \leq 4,6 \text{ mm}$.

A Equação (11) descreve o modelo exponencial para a posição sobre-cabeça:

$$v_s = -43,551 \cdot e^{-0,421a} \quad (11)$$

Sendo válido para $0,9 \leq a \leq 4,6 \text{ mm}$.

Tabela 14: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para a velocidade de soldagem nas três posições de soldagem

Posição	Curva	F_0	P	GL	R^2
Plana	<i>lin.</i>	6,58	23,66 %	2	0,8681
	<i>log.</i>	32,45	11,06 %	2	0,9701
	<i>exp.</i>	44,45	9,48 %	2	0,9780
	<i>pot.</i>	416,53	3,12 %	2	0,9976
Vertical descendente	<i>lin.</i>	2,75	34,53 %	2	0,7335
	<i>log.</i>	7,30	22,57 %	2	0,8795
	<i>exp.</i>	10,46	19,09 %	2	0,9127
	<i>pot.</i>	79,08	7,13 %	2	0,9875
Sobre-cabeça	<i>lin.</i>	23,45	12,97 %	2	0,9591
	<i>log.</i>	1650,39	1,57 %	2	0,9988
	<i>exp.</i>	57924,18	0,26 %	2	1,0000
	<i>pot.</i>	17,85	14,80 %	2	0,9469

A Figura 66 mostra o gráfico dos três modelos calculados.

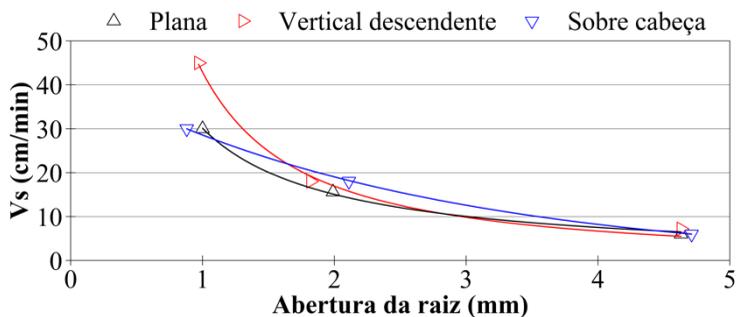


Figura 66: Interpolação da velocidade de soldagem (v_s) para diferentes aberturas da raiz e posições de soldagem

5.4.1.c Tempo de parada

A Tabela 15 apresenta os resultados da análise da adequabilidade dos modelos nas três posições de soldagem. Observa-se que somente na posição plana pode ser utilizada uma curva linear de forma confiável para um $\alpha = 5\%$.

Tabela 15: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para o tempo de parada nas três posições de soldagem

Posição	Curva	F ₀	P	GL	R ²
Plana	<i>lin.</i>	2075,55	1,40 %	2	0,9995
	<i>log.</i>	31,66	11,20 %	2	0,9694
	<i>exp.</i>	2,97	33,45 %	2	0,7484
	<i>pot.</i>	8,66	20,86 %	2	0,8965
Vertical descendente	<i>lin.</i>	0,86	52,42 %	2	0,4620
	<i>log.</i>	1,84	40,46 %	2	0,6476
	<i>exp.</i>	0,86	52,42 %	2	0,4620
	<i>pot.</i>	1,84	40,46 %	2	0,6476
Sobre-cabeça	<i>lin.</i>	1,26	46,30 %	2	0,5580
	<i>log.</i>	3,37	31,77 %	2	0,7710
	<i>exp.</i>	1,26	46,30 %	2	0,5580
	<i>pot.</i>	3,37	31,77 %	2	0,7710

A Equação (12) descreve o modelo linear para a variação do tempo de parada (tp) na posição plana conforme a abertura da raiz:

$$tp = -0,261 + 0,273 \cdot a \quad (12)$$

Sendo válido para $1,0 \leq a \leq 4,6 \text{ mm}$.

A Figura 67 mostra a curva de interpolação utilizada para o tempo de parada (tp).

Na posição vertical descendente e sobre-cabeça foi utilizada uma interpolação linear entre os pontos individuais.

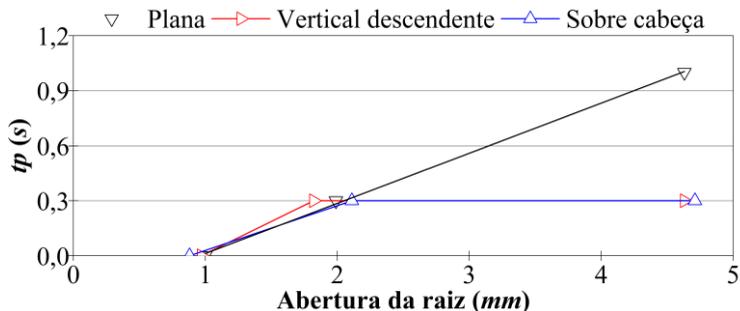


Figura 67: Interpolação do tempo de parada (t_p) para diferentes aberturas da raiz e posições de soldagem

5.4.1.d Velocidade de arame

A Tabela 16 mostra o resultado da análise dos modelos para a velocidade de arame. Devido à alta probabilidade de erro mostrada pelo fator P e ao valor de F_0 ser menor que o F tabelado, nenhum modelo é adequado para a velocidade de arame.

Ressalta-se que não houve uma alteração da velocidade de arame com relação à posição de soldagem. Os efeitos da variação da penetração em função da posição foram contornados somente com o ajuste nos parâmetros de movimentação do robô.

Tabela 16: Resultados do coeficiente de determinação e da análise de variância para a velocidade de arame

Curva	F_0	P	GL	R^2
<i>lin.</i>	1,02	49,67 %	2	0,5052
<i>log.</i>	2,31	37,08 %	2	0,6975
<i>exp.</i>	1,02	49,67 %	2	0,5052
<i>pot.</i>	2,31	37,08 %	2	0,6975

A Figura 68 mostra a interpolação do cálculo da velocidade de arame, utilizando o modo *half range*.

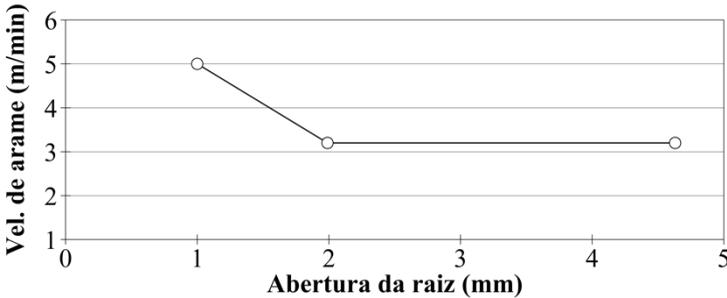


Figura 68: Interpolação da velocidade de arame para diferentes aberturas da raiz

O modo “*half range*” é também utilizado para os demais parâmetros da fase de arco do processo CCC, conforme mostra a Tabela 17.

Tabela 17: Parâmetros do processo CCC para a velocidade de arame de 3,2 *m/min* e de 5,0 *m/min*

v_a [m/min]	Período de pulso			Período de patamar intermediário			Período de base
	I_{a1} [A]	t_{a1} [ms]	t_{r1} [ms]	I_{a2} [A]	t_{a2} [ms]	t_{r2} [ms]	I_{a3} [A]
3,2	300	1,5	0,5	0	0	0	65
5,0	330	1,5	1,5	150	4,5	1,5	120

5.4.2 Com respeito à posição de soldagem

A interpolação das variáveis de soldagem com respeito à posição é calculada por uma média ponderada dos valores obtidos para cada abertura da raiz entre as posições de soldagem características (entre 0 - 90° e entre 90 - 180°).

5.5 Síntese do capítulo

Os desenvolvimentos apresentados neste capítulo podem ser sintetizados, conforme segue:

- Um programa de computador foi desenvolvido para sincronizar os algoritmos desenvolvidos no programa do robô com a medição do sensor LASER. A sincronização ocorre com base na divisão da trajetória do tubo em trechos .
- Este programa é responsável por interpolar as variáveis de soldagem, que ocorre com respeito à variação da abertura da raiz e da posição de soldagem.
- A interpolação para a abertura da raiz é realizada por uma análise de regressão, sendo que cada modelo escolhido foi verificado com base em uma análise de variância.
- A interpolação para a posição de soldagem é executada por uma média ponderada utilizando os modelos da abertura da raiz.

6 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Para validar os algoritmos do controle adaptativo foram executadas soldas do passe de raiz em corpos de prova de chapas e de tubos.

Este capítulo analisará somente os resultados dos tubos, sendo que a validação em chapas é mostrada no Apêndice 9.3.

6.1 Procedimento experimental

A Tabela 18 apresenta a composição química dos tubos utilizados neste trabalho, que foi calculada por um espectrômetro de emissão óptica com base em duas amostras. Este aço se assemelha a um API 5L Grau B.

Tabela 18: Composição química dos corpos de prova de tubo (valores medidos em % de peso)

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>
0,269	1,29	0,012	*	0,003	0,003	0,008

* Valor residual < 0,001 %

A configuração do chanfro do tubo é ilustrada na Figura 69. A usinagem foi realizada por uma biseladora da marca PRO-TEM modelo US150.

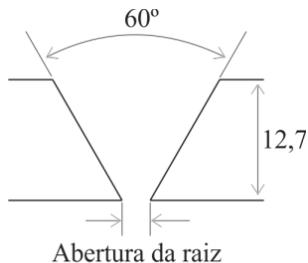


Figura 69: Chanfro do tubo

Para facilitar a validação em laboratório foram utilizados anéis de tubos que apresentavam uma largura de aproximadamente 150 mm. O diâmetro externo do tubo era de 406,4 mm (16").

Durante a preparação foi procurado manter as juntas sem desalinhamento interno. A fixação dos tubos era realizada por quatro cantoneiras metálicas (“cachorros”) soldadas em cada quadrante do interior do tubo. Um exemplo da fixação é destacado pelo círculo amarelo na Figura 70.



Figura 70: Montagem do corpo de prova para soldagem

O sensor LASER apresentava um *offset* de medição de 47 *mm* e uma inclinação com relação à tocha em torno de 10 °. A inclinação do sensor é em função do diâmetro do tubo, como

forma de manter a sua base aproximadamente paralela à superfície de medição da junta.

Com relação à variação da abertura da raiz nos tubos para validação do controle adaptativo, foram analisadas duas situações: (a) abertura da raiz crescente (1 a 4,5 mm) e (b) abertura decrescente (4,5 a 1 mm).

A Figura 71 mostra duas juntas do corpo de prova previamente ao processo de soldagem.

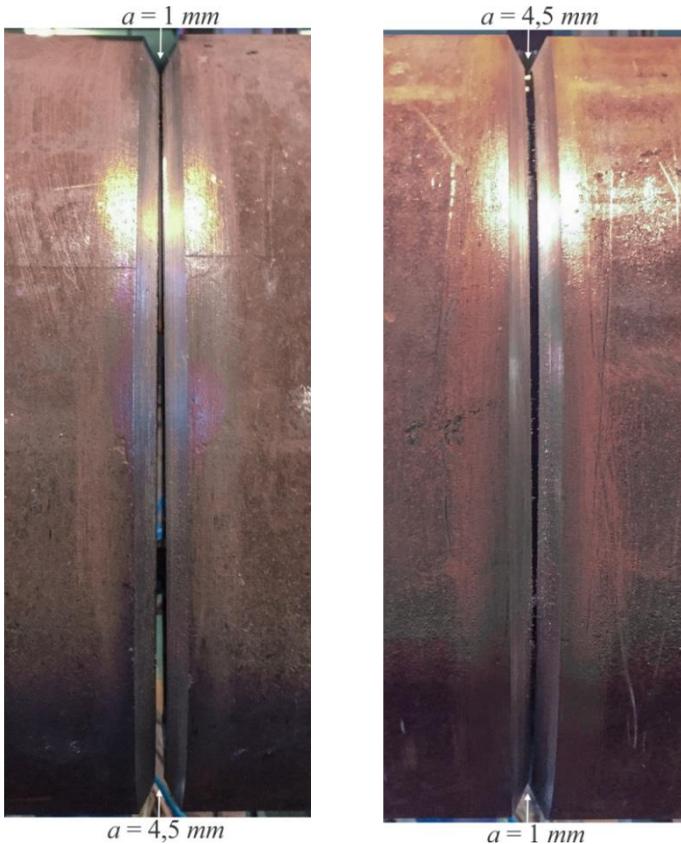


Figura 71: Corpo de prova de tubo utilizado para validação com abertura da raiz crescente (esquerda) e decrescente (direita)

Durante a solda do passe de raiz, os parâmetros de soldagem controlados pelo algoritmo e os dados de medição do sensor

LASER eram salvos no computador para gerar gráficos de acompanhamento da soldagem.

Para avaliação do resultado da solda, macrografias da seção transversal do tubo foram realizadas, sendo que os critérios avaliados foram apresentados no item 4.3 (pg. 78).

6.2 Resultados obtidos

6.2.1 Tubo com abertura da raiz crescente

A Figura 72 apresenta os parâmetros automaticamente ajustados pelo controle adaptativo durante a soldagem do tubo em cada trecho de 2°.

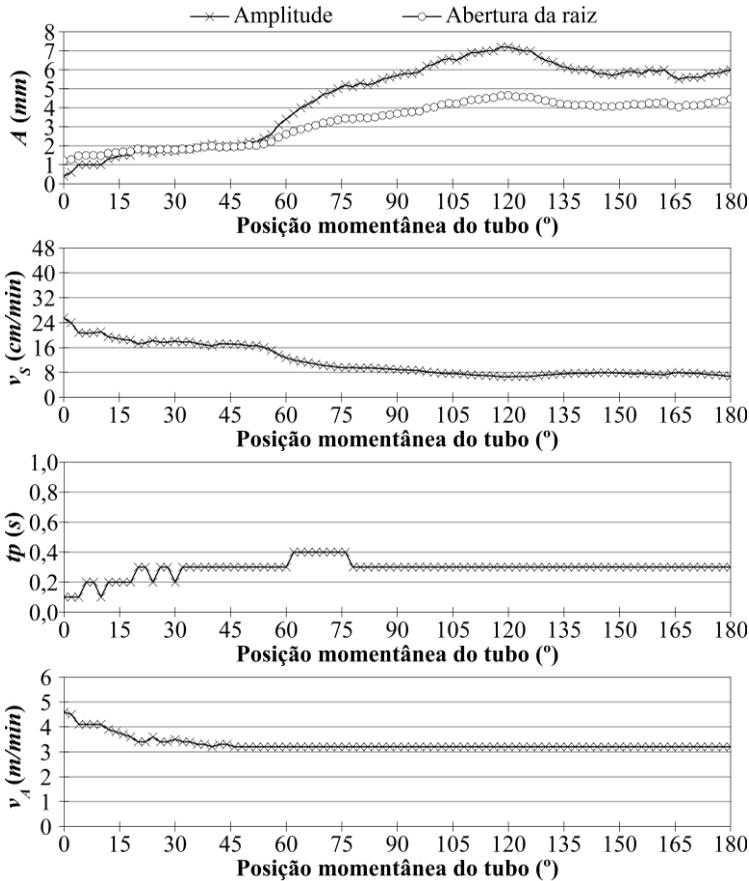


Figura 72: Gráficos das variáveis de soldagem controladas pelo computador durante a soldagem adaptativa do tubo com abertura da raiz crescente

A Figura 73 mostra o resultado do passe de raiz observado pela parte externa e interna do tubo. A parte externa mostra que o acabamento superficial do cordão mostrou-se de excelente qualidade em toda a extensão da solda, independente da posição de soldagem e da abertura da raiz avaliada. A geometria do cordão é adequada para a posterior soldagem dos passes subsequentes. Pelo lado interno do tubo é possível visualizar uma boa fusão da raiz. Na região da sobre cabeça ocorreu uma leve concavidade,

que foi medida com base na macrografia da seção transversal da solda.

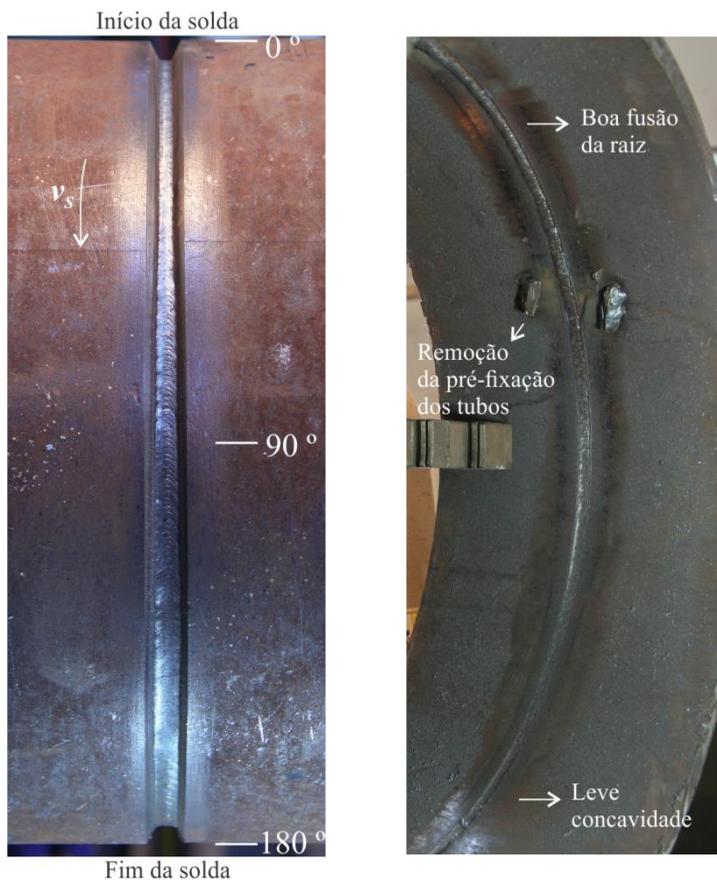


Figura 73: Vista da solda do passe de raiz pelo lado externo do tubo (esquerda) e interno do tubo (direita) soldado na posição 5G com abertura da raiz crescente

As macrografias da solda do passe de raiz são mostradas na Figura 74 para as posições de soldagem destacadas. A avaliação visual mostrou que as soldas se encontram livres de defeitos visíveis.

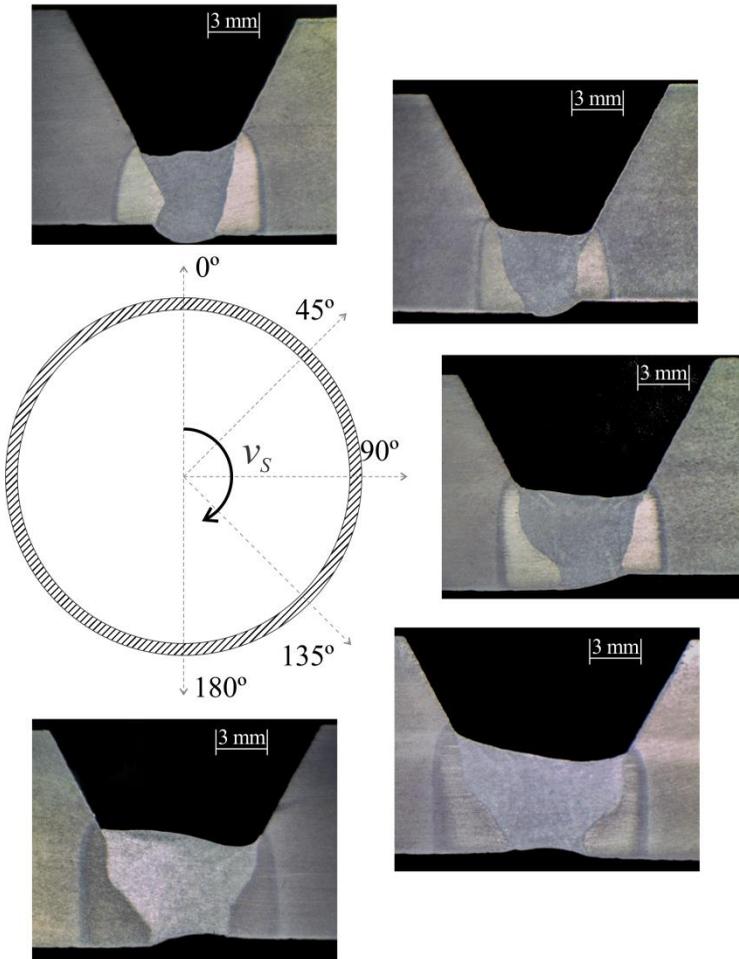


Figura 74: Macrografias do tubo com abertura de raiz crescente em cinco diferentes posições, ataque: Nitral: 10 %

A Tabela 19 apresenta o cálculo da geometria das soldas. Todas as macrografias analisadas atenderam os requisitos das normas utilizadas neste trabalho (item 4.3), inclusive na posição 180° , onde a concavidade foi mais elevada.

Tabela 19: Cálculo da geometria das soldas do passe de raiz

Posição [°]	Reforço (+) ou Concavidade (-) da raiz [mm]	Convexidade (+) ou concavidade (-) da face [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura raiz [mm]	Desalinhamento [mm]	Aprovado ?
0	+1,0	+0,7	4,0	3,8	0,7	Sim
45	+1,0	+0,5	3,9	3,3	0,8	Sim
90	+0,9	+0,4	4,4	3,7	0,9	Sim
135	-0,5	+1,5	4,9	4,7	0,4	Sim
180	-0,8	+1,0	5,1	4,7	0,5	Sim *

* Concavidade da raiz aprovada segundo o nível C da norma ISO 5817 [72].

Durante a soldagem do tubo os dados elétricos do arco vol-
taico foram mensurados e os dados médios relacionados à varia-
ção da velocidade de arame. O resultado é mostrado na Figura 75,
para ilustrar a correção automática das variáveis elétricas durante
o procedimento de soldagem do passe de raiz. Como se pode ver
há uma compensação da potência média conforme a velocidade
de arame é alterada.

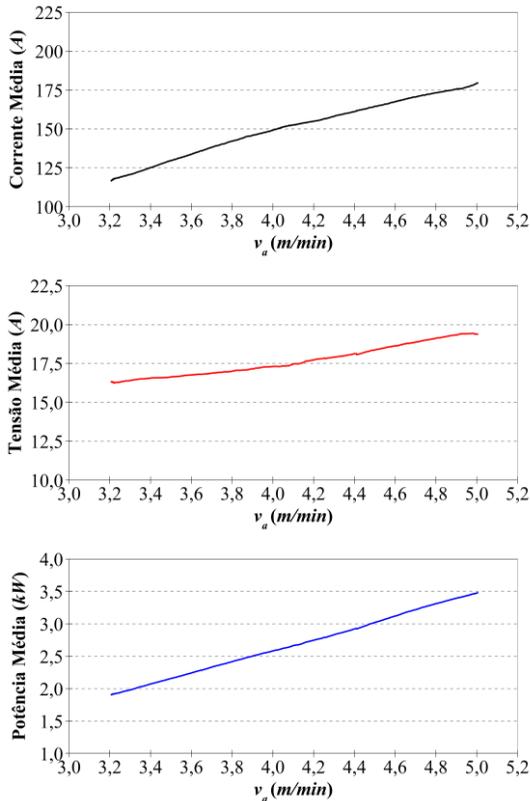


Figura 75: Gráficos dos valores elétricos médios em função da velocidade de arame durante a soldagem adaptativa do tubo

6.2.2 Tubo com abertura da raiz decrescente

O segundo tubo soldado com o programa adaptativo apresentava uma abertura da raiz decrescente (de 4,5 a 1 mm).

A Figura 76 evidencia os gráficos dos parâmetros automaticamente ajustados pelo controle adaptativo em cada trecho de 2° do tubo.

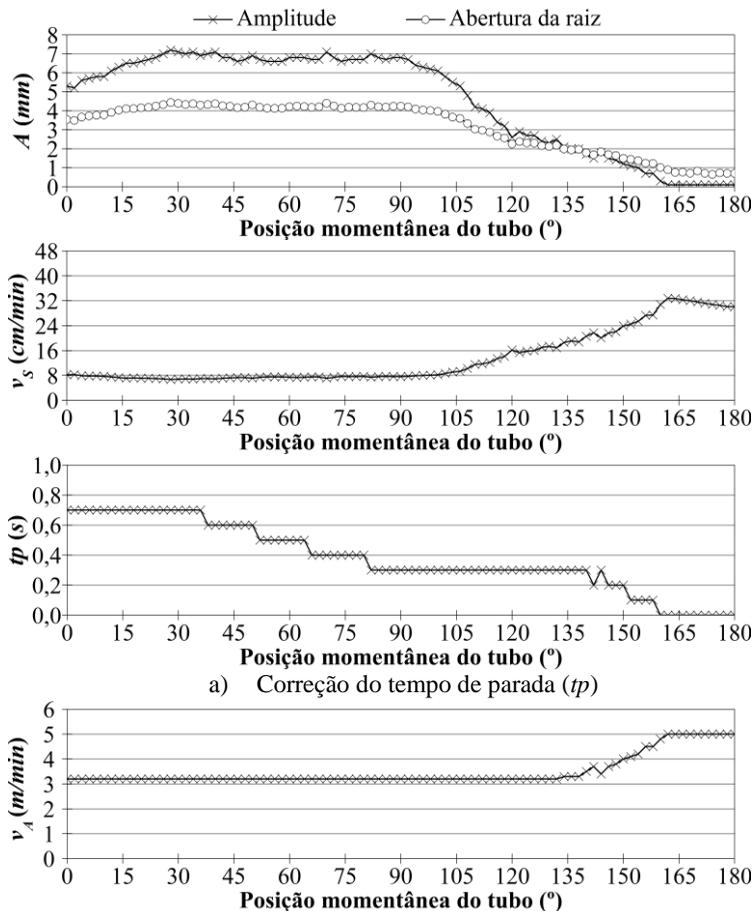


Figura 76: Gráficos das variáveis de soldagem controladas pelo computador durante a soldagem adaptativa do tubo com abertura da raiz decrescente

A Figura 77 mostra o resultado do passe de raiz observado pela parte externa e interna do tubo. A parte externa mostra que o acabamento superficial do cordão mostrou-se contínuo em toda a extensão da solda, independente da posição de soldagem e da abertura da raiz avaliada. A geometria do cordão é adequada para a posterior soldagem dos passes subsequentes. Pelo lado interno do tubo é possível visualizar uma boa fusão da raiz. Novamente presencia-se na região da sobre cabeça uma leve concavidade.

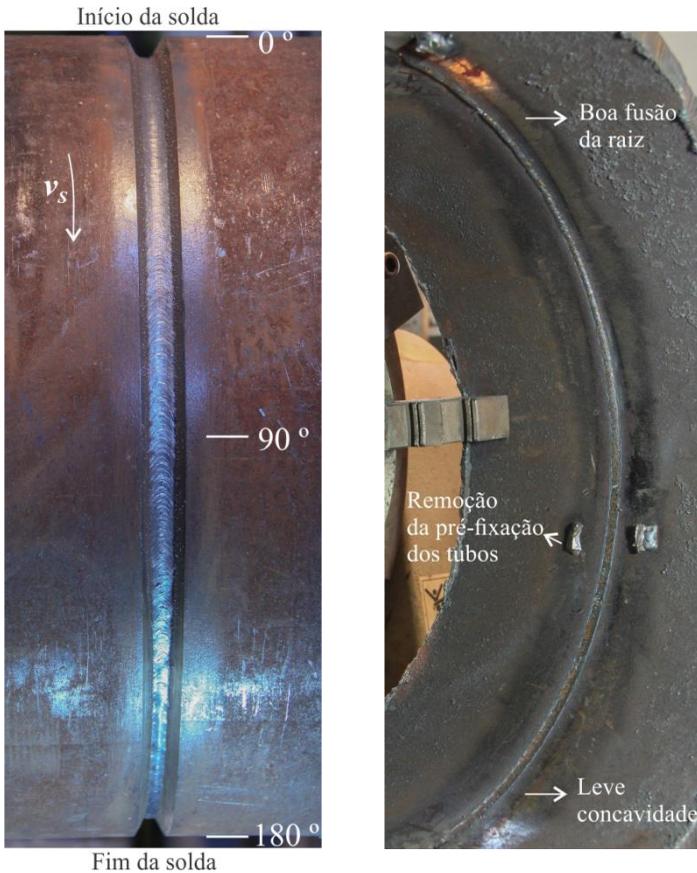


Figura 77: Vista da solda do passe de raiz pelo lado externo do tubo (esquerda) e interno do tubo (direita) soldado na posição 5G com abertura da raiz decrescente

A Figura 78 mostra as macrografias do tubo soldado com uma abertura da raiz decrescente. A avaliação visual mostrou que as soldas se encontram livres de defeitos aparentes.

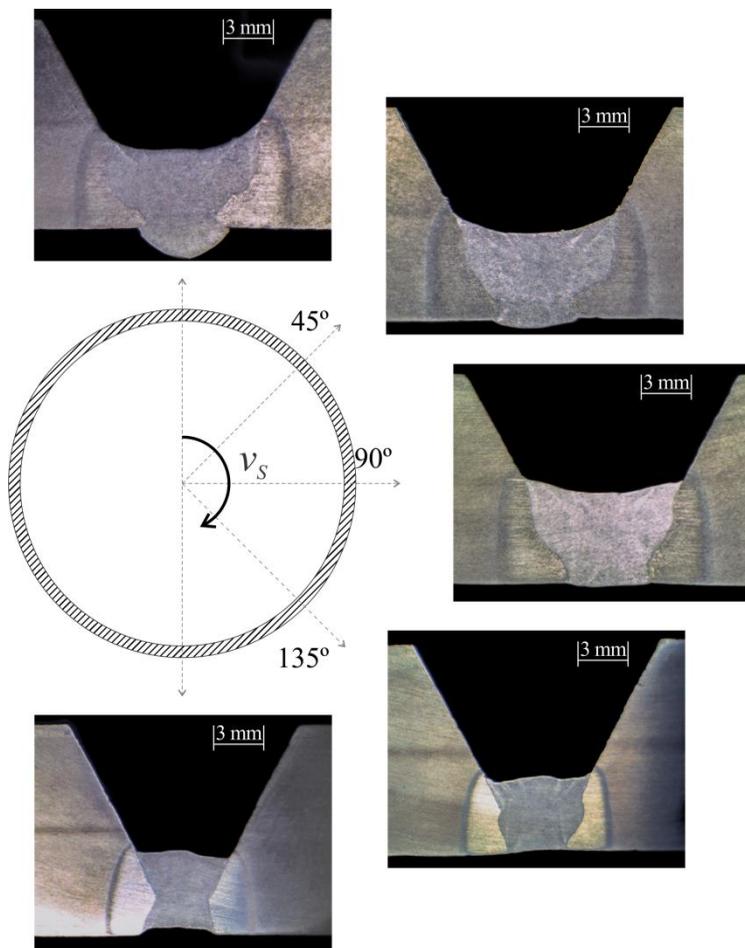


Figura 78: Macrografias do tubo com abertura de raiz decrescente, ataque: Nital: 10 %

A Tabela 20 apresenta o cálculo da geometria das soldas do passe de raiz. Como se pode constatar, todas as macrografias foram aprovadas perante os critérios utilizados neste trabalho.

Tabela 20: Cálculo da geometria das soldas do passe de raiz para a soldagem do corpo de prova de tubo com abertura da raiz crescente e decrescente

Posição [°]	Reforço (+) ou Concavidade (-) da raiz [mm]	Convexidade (+) ou concavidade (-) da face [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura raiz [mm]	Desalinamento [mm]	Aprovado ?
0	+ 1,9	- 1,3	4,8	5,5	-	Sim
45	+ 0,7	- 1,3	5,0	5,1	-	Sim
90	+ 0,3	- 0,8	5,4	5,2	-	Sim
135	- 0,3	+0,5	4,0	3,6	0,3	Sim
180	- 0,5	+ 0,5	4,2	4,4	-	Sim

6.2.3 Tubo com abertura da raiz crescente e decrescente

O terceiro tubo soldado com o programa adaptativo apresentava uma abertura da raiz crescente no início da junta e decrescente no final.

Uma curiosidade da terceira validação é que o sistema identificou uma redução brusca na abertura da raiz na posição aproximada de 75 ° (Figura 79).

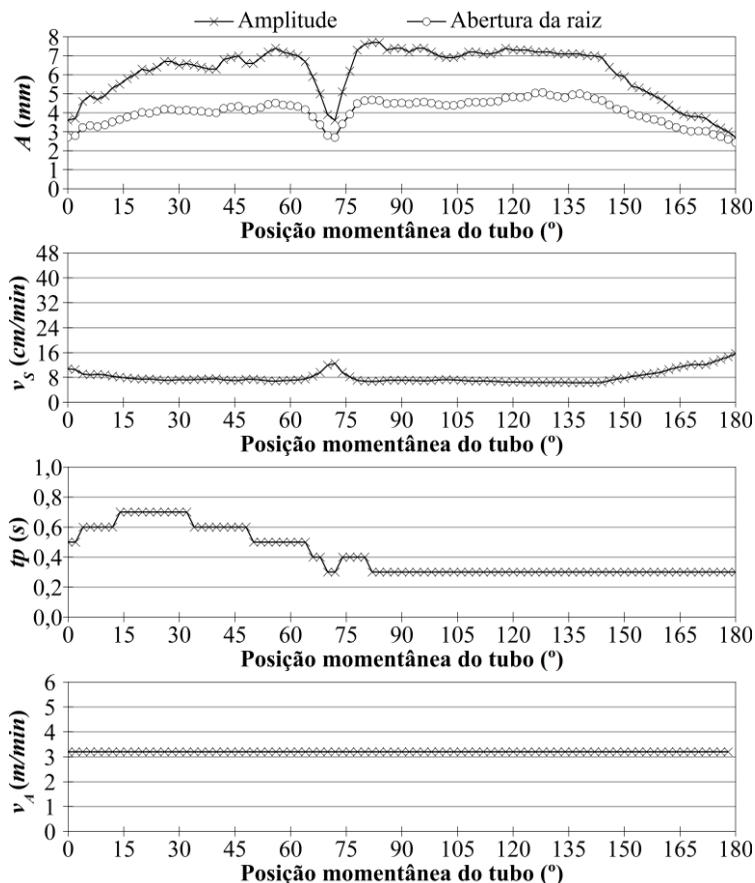


Figura 79: Gráficos das variáveis de soldagem controladas pelo computador durante a soldagem adaptativa do terceiro corpo de prova de tubo

A Figura 80 mostra o resultado do passe de raiz observado pela parte externa e interna do tubo. A parte externa mostra que o acabamento superficial do cordão mostrou-se de excelente qualidade em toda a extensão da solda, mesmo diante de uma redução brusca na abertura da raiz. A causa da redução se deve a solda de costura longitudinal reduzir o valor da abertura da raiz. Mesmo diante da redução da abertura é possível visualizar uma boa fusão da raiz. Novamente, na região da posição sobre cabeça observa-se uma leve concavidade.

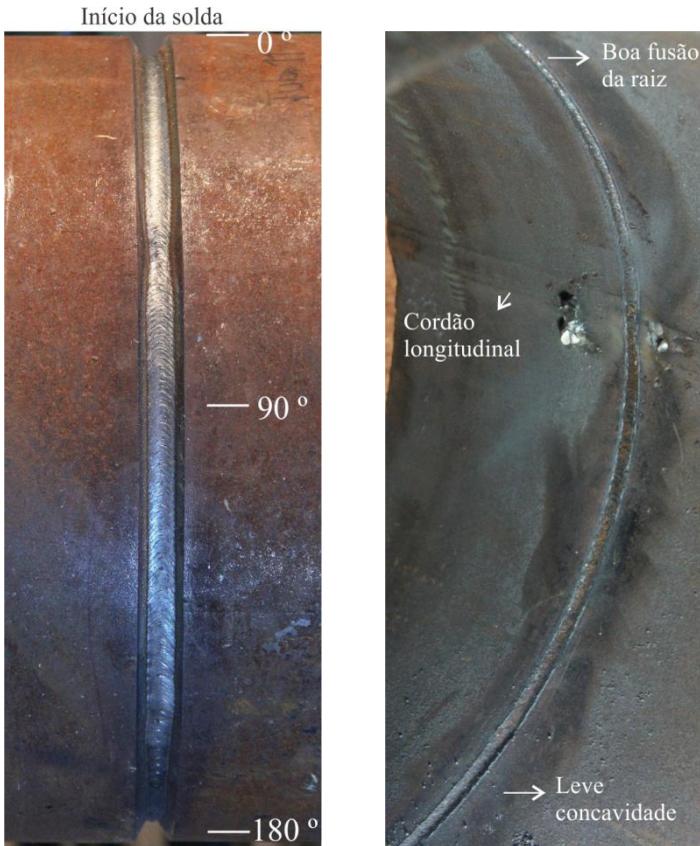


Figura 80: Vista da solda do passe de raiz pelo lado externo do tubo (esquerda) e interno do tubo (direita) soldado na posição 5G com abertura da raiz crescente no início e decrescente no final da junta

6.3 Conclusões e observações das validações

As conclusões e observações da validação apresentadas neste capítulo são:

- O sensor LASER mostrou ser uma ferramenta confiável para detecção da posição inicial da junta do tubo.

- Apesar das instabilidades de medida da abertura da raiz, a filtragem do sinal foi considerada satisfatória para soldagem dos corpos de prova analisados.
- A correção da trajetória e das variáveis de soldagem em trechos de 2° se mostrou satisfatória.
- O controle adaptativo desenvolvido neste trabalho se mostrou robusto para uma tolerância da abertura da raiz de aproximadamente $3 \pm 2 \text{ mm}$.
- A qualidade superficial do passe de raiz mostrou um passe de raiz com excelente acabamento, boa na fusão da raiz e uma leve concavidade na posição sobre cabeça.
- As macrografias não evidenciaram a presença de defeitos e mostraram um passe de raiz com forma geométrica adequada, sendo que não serão necessárias operações de remoção de material excedente.
- Durante as validações, a soldagem com abertura da raiz excessiva se mostrou mais susceptível a perfurações na posição plana e a instabilidades do arco voltaico na posição sobre-cabeça. A recomendação é que se utilize a abertura máxima na posição vertical descendente, pois o controle da poça de fusão tende a ser bem elevado. Assim, para a posição plana e sobre-cabeça recomenda-se uma abertura da raiz entre 1 a 3 *mm*.
- A estabilidade do processo CCC foi mantida constante durante a interpolação da forma de onda da corrente e de velocidade de arame.

7 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

Este trabalho mostrou o desenvolvimento e validação de um sistema de soldagem com controle adaptativo aplicado à soldagem do passe de raiz de chapas e de tubos. O sistema atualmente funciona com um robô comercial, que, no entanto, será futuramente substituído por um robô dedicado, que esta sendo fabricado por uma das parceiras do projeto.

As conclusões podem ser formuladas conforme segue:

- O controle adaptativo desenvolvido conseguiu corrigir as variáveis da fonte de soldagem e da trajetória do robô para uma variação da abertura da raiz de aproximadamente $3 \pm 2 \text{ mm}$;
- O robô foi capaz de seguir corretamente o centro da junta utilizando a informação do *tracking point*, que é o centro do perfil da junta na imagem obtida do sensor LASER;
- Com base em nove situações individuais de solda do passe de raiz (3 aberturas da raiz e 3 posições de soldagem) foi possível modelar um controle adaptativo a ser utilizado na soldagem orbital;
- Os algoritmos utilizaram modelos de análise de regressão para determinar os parâmetros de soldagem em função da abertura da raiz. A adequação do modelo aos pontos inseridos foi determinada com base em uma análise de variância e dos coeficientes de regressão;
- Uma interpolação linear entre os modelos da abertura da raiz foi utilizada para cálculo em função da posição de soldagem;
- Os algoritmos levaram em consideração ajustes na velocidade de arame (3,2 a 5 *m/min*) do processo Curto-Circuito Controlado para aumentar/diminuir a penetração do passe de raiz;
- Para ajuste dos parâmetros de movimento do robô foi observado o movimento realizado pelo soldador na junta. Os seguintes parâmetros foram alterados: (a) velocidade de deslocamento lateral a

- junta (ajustada pela frequência de tecimento), (b) amplitude de tecimento, (c) tempo de parada no extremo da junta e (d) velocidade de soldagem.
- Um programa de computador para coordenar as operações de soldagem e de medição da junta utilizando um sensor LASER foi desenvolvido. O programa utiliza a divisão da trajetória orbital em trechos definidos como forma de acionamento do instante de correção da fonte de soldagem e do robô no processo de soldagem;
 - Os algoritmos foram validados em corpos de prova de tubo de 404,6 mm (16 pol.) de diâmetro externo com chanfro em “V” e 12,7 mm de espessura. Os resultados da validação mostraram a efetividade do sistema em compensar a variação da abertura da raiz nas posições de soldagem avaliadas.
 - A avaliação da qualidade da solda aconteceu com base em inspeção visual e macrografias da seção transversal do passe de raiz, atendendo os requisitos técnicos determinados por normas.

7.2 Recomendações para o projeto “Robô de Soldagem”

A utilização de um robô antropomórfico comercial limitou o desenvolvimento da soldagem adaptativa realizado neste trabalho. Observa-se que a divisão da trajetória em trechos não seria necessária se o fabricante fornecesse uma interface específica para a soldagem adaptativa. O principal problema com relação a esta divisão se deve às falhas de movimentação ocasionadas nas transições dos trechos. Este efeito foi chamado de “efeito W”, e é explicado detalhadamente no Apêndice 9.4.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

A metodologia e os algoritmos desenvolvidos, a parametrização do processo de soldagem orbital e o controle adaptativo mostrado neste trabalho poderão servir de continuidade trabalhos futuros nas seguintes áreas: metrologia (desenvolvimento de um cabeçote de medição nacional), soldagem robotizada (desenvol-

vimento de um robô dedicado), soldagem orbital (nova abordagem para parametrização do processo).

O detalhamento de algumas propostas de trabalho é dado a seguir:

- Estudar a viabilidade da soldagem orbital com o processo MIG/MAG na posição vertical ascendente.
- Utilizar variações do processo MIG/MAG com alta energia, como o *RapidArc*, para a soldagem com abertura da raiz nula.
- Continuar o desenvolvimento dos algoritmos para a soldagem dos passes subsequentes. Neste caso, a estratégia não objetivaria um controle da penetração, mas sim da deposição do metal de solda. A informação da área da junta disponibilizada pelo sensor LASER pode ser utilizada para tal controle, conforme mostra um trabalho anterior desenvolvido pelo autor deste trabalho [19, 75].
- Comparar o sinal da abertura da raiz com outros sensores LASER e melhorar o sinal do sensor *Meta-Vision* pela extração direta das imagens da junta do cabeçote de medição e posterior processamento.
- Validar os algoritmos para outras espessuras e diâmetros de tubos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Instituto de Logística e Supply Chain. *País precisa investir R\$ 8 bi em dutos*. 2015 16/11/2015].
2. Scotti, A. and V. Ponomarev, *Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho*. 2ª edição ed. 2008, São Paulo: Artliber Editora. 288 pgs.
3. Yapp, D. and S.A. Blackman, *Recent developments in high productivity pipeline welding*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004. **26**: p. 89-97.
4. Pigozzo, I.O., *Soldagem TIG Orbital: Otimização de Equipamentos e Prospecções Tecnológicas para Procedimentos de Passe de Raiz*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. p. 132 pgs.
5. Nelson, J., *Maximizing Pipeline Welding Efficiency*. Welding Journal, 2013. **92**(6): p. 74-78.
6. Bae, K.Y., T.H. Lee, and K.C. Ahn, *An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **120**(1-3): p. 458-465.
7. Yudodibroto, B.Y.B., *Liquid Metal Oscillation and Arc Behaviour during Welding in Department of Materials Science and Technology*. 2010, Delft University of Technology: Netherlands. p. 155 pgs.
8. Karadeniz, E., U. Ozsarac, and C. Yildiz, *The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes*. Materials & Design, 2007. **28**(2): p. 649-656.
9. Brüggemann, L.C., *Investigações Prospectivas em Processos e Técnicas para o Passe de Raiz na Soldagem MIG/MAG Orbital para a Construção de Dutos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2013, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis/SC. p. 74 pgs.
10. Kim, C., *Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions*. Pricm 7, Pts 1-3, 2010. **654-656**: p. 350-353.
11. Soeiro, J.C., D.B. Rocha, and S.D. Brandi, *A Brief History Review of Development on API Steels Welding for Pipeline*. Soldagem & Inspecao, 2013. **18**(2): p. 176-195.
12. Sartori, F., et al., *Avaliação de Raiz na Soldagem Orbital Mecanizada de Tubos Utilizando Diferentes Versões do*

- Processo MIG/MAG com Curto Circuito Controlado*, in *XLI CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM*. 2015, Associação Brasileira de Soldagem: Salvador - BA.
13. Figueiroa, D.W., et al., *Influence of Orbital TIG Welding Position and Welding Parameters Applied to Low Carbon Steel Pipes*. Soldagem & Inspecao, 2015. **20**(4): p. 446-455.
 14. Johnsen, M.R., *US pipeline industry enters new era*. Welding Journal, 1999. **78**(11): p. 36-41.
 15. Latifi, H., *Advanced Orbital Pipe Welding*, in *Department of Mechanical Engineering*. 2012, Lappeenranta University of Technology: Finland. p. 126.
 16. Huang, W. and R. Kovacevic, *Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. **63**(1-4): p. 235-248.
 17. Yamane, S., et al., *Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate*. Science and Technology of Welding and Joining, 2004. **9**(2): p. 138-148.
 18. Lee, J.I. and K.W. Um, *A prediction of welding process parameters by prediction of back-bead geometry*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **108**(1): p. 106-113.
 19. Kindermann, R.M., *Entwicklung und Erprobung von Algorithmen zum adap-tiven lasersensorgestützten MSG-Mehrlagenschweißen von V- und Kehlnähten*, in *Departamento de Engenharia de Materiais*. 2013, Universidade Federal de Santa Catarina: Munique/Alemanha. p. 84.
 20. Aström, K.J. and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, 2^aed. 2008, New York: Dover Publications, Inc.
 21. Landau, I.D., et al., *Adaptive Control - Algorithms, Analysis and Applications*, 2^a ed. 2011: Springer London.
 22. Direne, H.F., *MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Tansferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
 23. Silva, R.H.G., *Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Aplicada ao Passe de Raiz*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2006, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. p. 111 pgs.

24. Baixo, C.E.I., *Estudo da Soldagem MIG/MAG pela Técnica Hiperbárica a Seco*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 1999, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. p. 169.
25. Gohr, R., *Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2002, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis/SC. p. 150.
26. Stava, E.K., *A new, low spatter arc welding machine*. *Welding Journal*, 1993(1): p. 25-29.
27. Cuiuri, D., *Control of Short Circuit Gas Metal Arc Welding Process Using Instantaneous Current Regulation*, in *School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering*. 2000, University of Wollongong: Australia.
28. Scotti, A., V. Ponomarev, and W. Lucas, *A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012. **212**(6): p. 1406-1413.
29. Silva, R.H.G.E., J.C. Dutra, and R. Gohr, *Scientific and technological fundamentals for the development of the controlled short circuiting MIG/MAG welding process (CCC) - A literature review. Part 3 of 3: Principles of the controlled current short-circuiting MIG/MAG systems*. *Soldagem & Inspecao*, 2008. **13**(1): p. 70-81.
30. Hermans, M.J.M., *A Study of Short Circuit Arc Welding*, in *Department of Chemical Engineering and Materials Science*. 1997, Delft University of Technology: Netherlands. p. 153.
31. Hermans, M.J.M. and G. Den Ouden, *Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding*. *Welding Journal*, 1999. **78**(4): p. 137s-141s.
32. Xie, M., *Quality Assurance and Control for Robotic GMA Welding*, in *Department of Production and Materials Engineering*. 1992, Lund University: Sweden. p. 172.
33. Liu, S. and T.A. Siewert, *Metal Transfer in Gas Metal Arc-Welding - Droplet Rate*. *Welding Journal*, 1989. **68**(2): p. S52-S58.
34. Adolfsson, S., *Automatic Quality Monitoring in GMA Welding using Signal Processing Methods*, in *Department of Production and Materials Engineering*. 1998, Lund University: Sweden. p. 269.
35. Magoley, M., *Vollmechanisiertes Orbitales Metall-Schutzgasschweißen*, in *Fakultät für Maschinenwesen*.

- 2002, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen: Aachen, Alemanha. p. 145 pgs.
36. Cho, D.W., et al., *A study on V-groove GMAW for various welding positions*. Journal of Materials Processing Technology, 2013. **213**(9): p. 1640-1652.
37. Shirali, A.A. and K.C. Mills, *The Effect of Welding Parameters on Penetration in GTA Welds*. Welding Journal, 1993. **72**(07): p. 347-353.
38. Tokar, A., *Confecção de Canais Subsuperficiais de Resfriamento/Aquecimento em Peças Metálicas Pela Ação de um Arco de Soldagem*, in *Faculdade de Engenharia Mecânica*. 2015, Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia/MG. p. 131.
39. DVS, *Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen*. 2005, DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren. p. 8.
40. Dutra, J.C. and V. Rosa, *O Arco Elétrico como Sensor de Procura de Junta*, in *XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem - ENTS*. 1995, Associação Brasileira de Soldagem: São Paulo - SP. p. 807-822.
41. Costa Filho, A.R., *Desenvolvimento de um Sistema de Seguimento de Junta que Utiliza o Próprio Arco como Sensor*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2003, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. p. 102 pgs.
42. Broering, C.E., *Desenvolvimento de Sistemas para a Automação da Soldagem e Corte Térmico*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2005, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. p. 112 pgs.
43. Mendonça, F.K., *Evolução da Técnica de Seguimento de Junta via Sensoriamento do Arco para Operações de Soldagem em Posições Forçadas*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2013, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. p. 125 pgs.
44. Costa Pinto, T.L.F., *Medição Óptica, Comparação e Sinalização de Superfícies com Forma Livre de Grande Extensão*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2010, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis - SC. p. 189.
45. Kuo, H.C. and L.J. Wu, *An image tracking system for welded seams using fuzzy logic*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **120**(1-3): p. 169-185.

46. Ma, H.B., et al., *Binocular vision system for both weld pool and root gap in robot welding process*. Sensor Review, 2010. **30**(2): p. 116-123.
47. Xu, Y.L., et al., *Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(8): p. 1654-1662.
48. Reisgen, U., et al., *Machine vision system for online weld pool observation of gas metal arc welding processes*. Welding in the World, 2014. **58**(5): p. 707-711.
49. Shen, H.Y., et al., *Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2010. **59**(3-4): p. 283-298.
50. Zhang, G.K., C.S. Wu, and X.F. Liu, *Single vision system for simultaneous observation of keyhole and weld pool in plasma arc welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2015. **215**: p. 71-78.
51. Ye, Z., et al., *Passive vision based seam tracking system for pulse-MAG welding*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **67**(9-12): p. 1987-1996.
52. Wu, C.S., J.Q. Gao, and D.M. Wang, *Observation of weld pool profiles in short-circuiting gas metal arc welding*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2011. **225**(B10): p. 1873-1887.
53. Tsai, C.H., K.H. Hou, and H.T. Chuang, *Fuzzy control of pulsed GTA welds by using real-time root bead image feedback*. Journal of Materials Processing Technology, 2006. **176**(1-3): p. 158-167.
54. Stone, D., J.S. Smith, and J. Lucas, *Sensor for Automated Weld Bead Penetration Control*. Measurement Science and Technology, 1990. **1**(11): p. 1143-1148.
55. Huang, S.J. and C.C. Lin, *A three-dimensional non-contact measurement system*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997. **13**(6): p. 419-425.
56. Blais, F., *Review of 20 years of range sensor development*. Journal of Electronic Imaging, 2004. **13**(1): p. 231-243.
57. Bradley, C. and G.W. Vickers, *Free-Form Surface Reconstruction for Machine Vision Rapid Prototyping*. Optical Engineering, 1993. **32**(9): p. 2191-2200.
58. Bonacorso, N.G., *Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem Visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de*

- Grande Porte*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2004, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis/SC. p. 96.
59. Kim, J.S., et al., *A robust visual seam tracking system for robotic arc welding*. *Mechatronics*, 1996. **6**(2): p. 141-163.
60. Gu, W.P., Z.Y. Xiong, and W. Wan, *Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013. **69**(1-4): p. 451-460.
61. Luo, H. and X. Chen, *Laser visual sensing for seam tracking in robotic arc welding of titanium alloys*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005. **26**(9-10): p. 1012-1017.
62. Nerosky, L.A.R., *Medição de Formas Livres Através da Integração de um Sensor Óptico Tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2001, Universidade Federal de Santa Catarina: Laboratório de Metrologia e Automatização, Florianópolis/SC. p. 89.
63. Beattie, R.J., *Applications of Laser Seam Tracking in Welding Thick Wall Vessels*. *SOJOM*, 2004: p. 1-8.
64. Viviani, A.B., *Integração de um Sensor a Laser a um Manipulador Cartesiano de Soldagem para o Seguimento Automático de Juntas*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis/SC. p. 99.
65. Huang, W. and R. Kovacevic, *A Laser-Based Vision System for Weld Quality Inspection*. *Sensors*, 2011. **11**(1): p. 506-521.
66. Meta-Vision, *Preliminary Specifications SLS-050 Data Sheet*. 2009.
67. Emmerson, J., *Using mechanized welding on large-diameter pipes*. *Welding Journal*, 2007. **86**(6): p. 66.
68. ASME, *ASME IX: Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators*. 2013, The American Society of Mechanical Engineers: New York, NY.
69. API, *API STANDARD 1104 - Welding of Pipelines and Related Facilities, 21ª ed.* 2013, American Petroleum Institute. p. 118.
70. PETROBRAS, *N-1438: Terminologia Soldagem, Rev. E*. 2013, PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

71. PETROBRAS, N-1738: *Descontinuidades em Juntas Soldadas, Fundidos, Forjados e Laminados*, Rev. C. 2011, PETRÓLEO BRASILEIRO S. A.
72. ISO, ISO 5817: *Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections*. 2003, International Standard: Switzerland.
73. Aures, J.E.V., *Avaliação de Processos MIG/MAG Derivativos Utilizando-se Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2013, Universidade de Brasília - UnB: Brasília/DF. p. 151 pgs.
74. Ogunbiyi, T.E.B., *Process Monitoring and Adaptive Quality Control for Robotic Gas Metal Arc Welding*, in *School of Industrial and Manufacturing Science*. 1995, Cranfield University: England. p. 279.
75. Dudziak, M., H. Cramer, and M. Müller, *Sensorgestütztes adaptives MSG-Schweißen*. *Schweißen und Schneiden*, 2014. **66**(11): p. 666-674.

9 APÊNDICES

9.1 Avaliação do processo CCC para o passe de raiz

Os métodos de avaliação utilizados durante os ensaios foram:

- a) Filmagem de alta velocidade para monitoramento da transferência metálica e do comportamento da poça de fusão;
- b) Avaliação do tempo de arco aberto do processo curto-circuito controlado por meio de histogramas;

A Figura 81 mostra um desenho esquemático do arranjo experimental para avaliação das condições de soldagem.

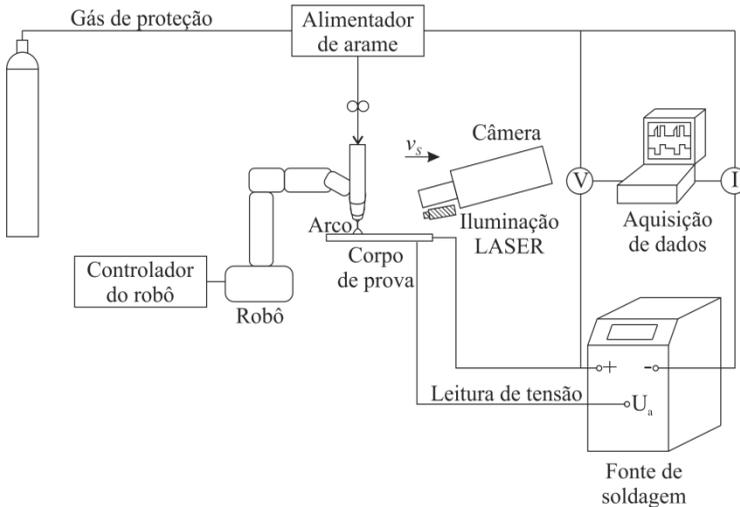


Figura 81: Arranjo experimental para avaliação das condições de soldagem do passe de raiz

a) Filmagem de alta velocidade:

Para filmagem de alta velocidade uma câmera do tipo *IDT* modelo 4-S2 foi utilizada. A câmera foi configurada com uma taxa de aquisição de 2000 imagens por segundo, em uma resolução de 1016 x 1016 pixels.

A distância da câmera à região de interesse foi de aproximadamente 330 mm. Observou-se a poça de fusão pela sua parte frontal, com o movimento da tocha se aproximando da câmera (ver esquema da Figura 81).

Instalada à câmera encontrava-se uma lente macro do tipo *SIGMA* 105 mm / f2.8 em conjunto com espaçadores de 4, 1 e 0,5 mm (para aumentar a distância focal). O tempo de exposição e a abertura foram configurados de forma a obter a melhor visibilidade da poça de fusão. Na maioria dos casos selecionou-se um tempo de exposição de 10 μ s e uma abertura de f16.

Para atenuar a variação de luminosidade do processo de soldagem com curto-circuito, um sistema de iluminação a LASER do tipo *CaviluxHF* foi utilizado. Ele foi posicionado à frente da região de interesse. O comprimento de onda do LASER é de 808 ± 2 nm e sua potência de 500 W. O tempo de pulso foi selecionado em 10 μ s.

Um filtro passa-banda com o mesmo comprimento de onda LASER (para atenuar a luz do arco) foi instalado, juntamente com os filtros anteriormente citados, na lente *SIGMA*.

b) Histogramas:

A avaliação do processo de soldagem também se compreendeu pelo monitoramento dos sinais elétricos da solda (por um tempo maior se comparado com a análise da filmagem de alta velocidade).

Para aquisição dos dados de tensão e corrente utilizou-se um sistema de aquisição portátil dedicado à soldagem do tipo *SAP-4*. A taxa de aquisição deste sistema é de 5 kHz. A tensão do arco foi medida diretamente entre a tocha e a peça. A medição da corrente de solda se deu por meio de um transdutor de corrente com limite máximo de 600 A.

Após a soldagem, os dados salvos no *SAP* eram exportados para uma planilha do *Excel*. Um algoritmo do *Excel* foi gerado para detectar o início e o fim de cada curto-circuito. Com base no

tempo de cada curto-circuito, a frequência de curto-circuito e o tempo de arco aberto foram calculados.

Um tempo de amostragem de 10 s foi analisado. A verificação da validade do algoritmo ocorreu por uma inspeção visual criteriosa da detecção de todos os curtos-circuitos, exemplificado na Figura 82. Pelos valores de tempo de arco calculados, histogramas para averiguação da estabilidade do processo pelo tempo total de arco foram obtidos.

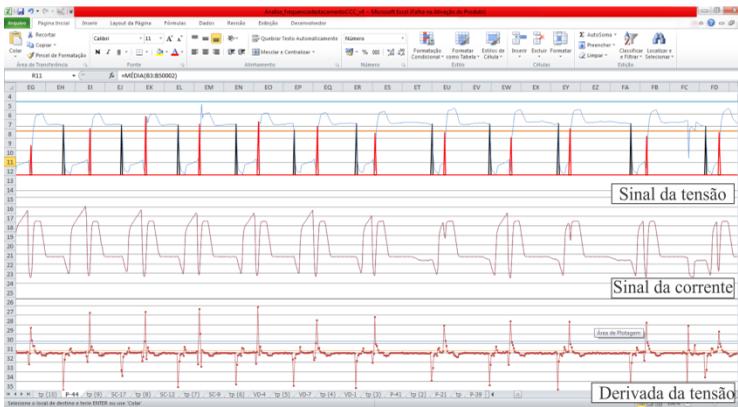


Figura 82: Exemplo da avaliação de um sinal do processo CCC, sendo que os picos azuis são as detecções do início do curto-circuito e os vermelhos do instante de reabertura do arco

Abertura nula na posição plana

[Link para visualização do vídeo](#)

A Figura 83 mostra a análise por filmagem de alta velocidade, com o respectivo oscilograma de corrente e tensão, para a soldagem com uma abertura da raiz nula.

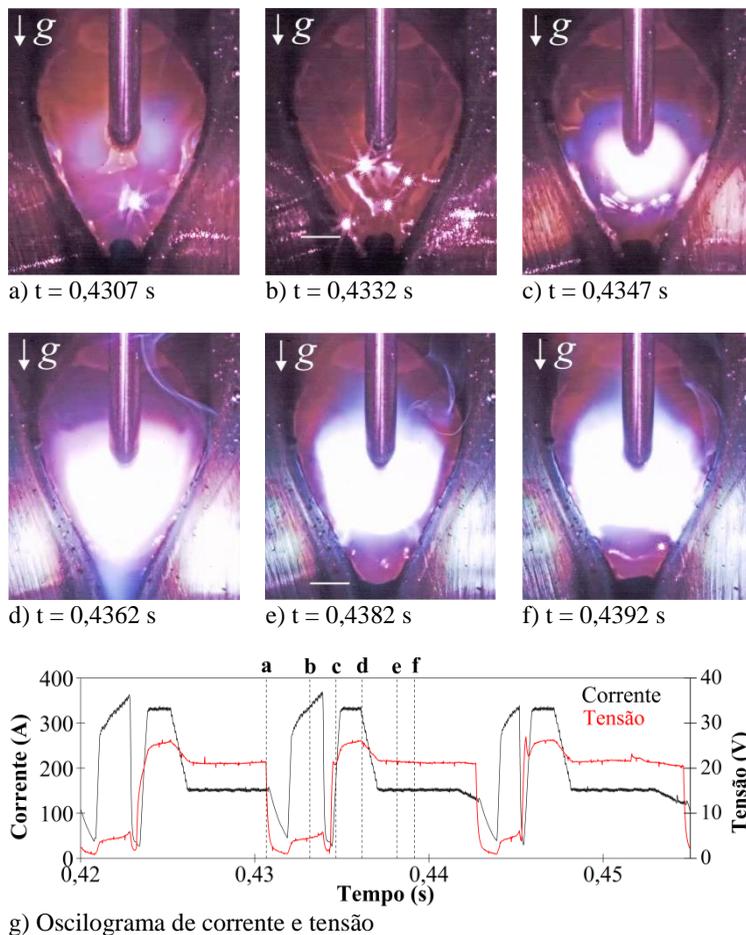


Figura 83: Análise da oscilação da poça de fusão na solda do passe de raiz com abertura da raiz nula na posição plana

A análise da filmagem mostra que a poça de fusão é empurrada para a raiz da junta durante o pulso de corrente (Figura 83d), logo após a ruptura do curto-circuito (Figura 83b).

A poça de fusão continua a ser empurrada após o pulso de corrente (Figura 83d) até o metal líquido na raiz da junta alcançar uma amplitude máxima (Figura 83e). Na sequência, ele retorna seu movimento em direção ao arame (Figura 83f). Pelo fato de a raiz da junta continuar sólida (penetração parcial), o metal líquido colide com a sua superfície, e uma concavidade é observada (Figura 83a). Este retorno provoca um novo curto-circuito, onde outro pulso de corrente inicia uma nova oscilação.

Por não haver penetração completa, a oscilação do metal líquido sustentada pela porção sólida da junta faz com que o processo CCC apresente uma alta estabilidade. Isto pode ser comprovado pelo histograma do tempo de arco, conforme mostra a Figura 84.

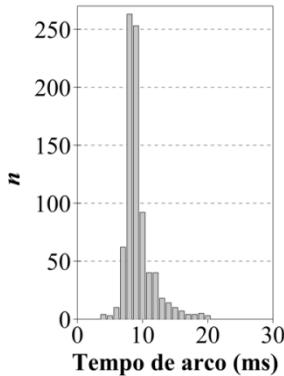


Figura 84: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz raiz com abertura da raiz nula

O tempo de arco médio é de $8,8 \text{ ms}$ e o Desvio-padrão de $2,2 \text{ ms}$.

A macrografia da Figura 85 mostra o resultado de solda obtido. Como se pode ver não foi possível obter penetração total. Ao invés disto, apenas um perfil de penetração parcial foi alcançado.

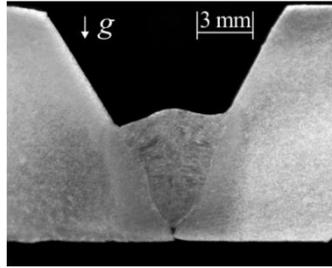


Figura 85: Macrografia de uma solda do passe de raiz com abertura da raiz nula na posição plana, ataque: Nital 10 %

Abertura reduzida na posição plana

[Link para visualização do vídeo](#)

Para avaliação das condições do processo de soldagem, uma filmagem de alta velocidade foi obtida, conforme mostra a Figura 86. Seis instantes característicos nesta filmagem foram escolhidos pelo autor.

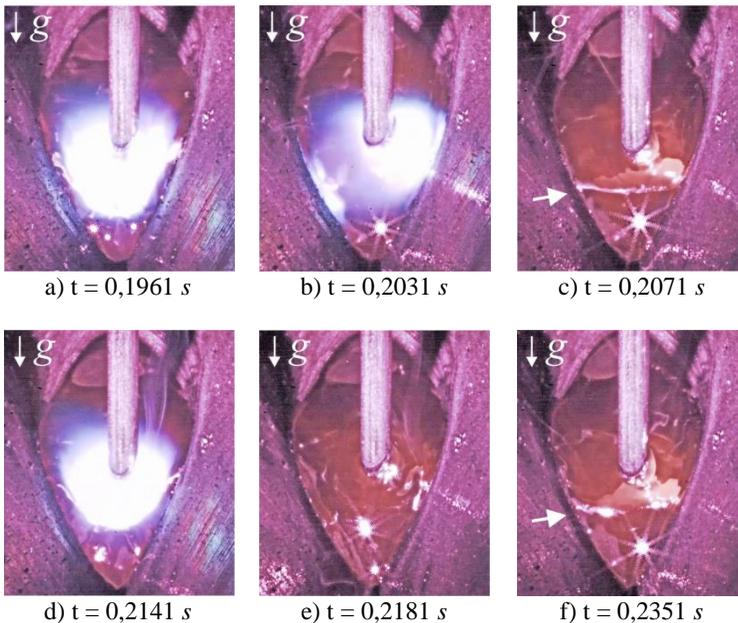


Figura 86: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura de raiz mínima na posição plana

Cada instante da Figura 86 é sincronizado com o oscilograma de corrente e tensão, apresentado no gráfico da Figura 87.

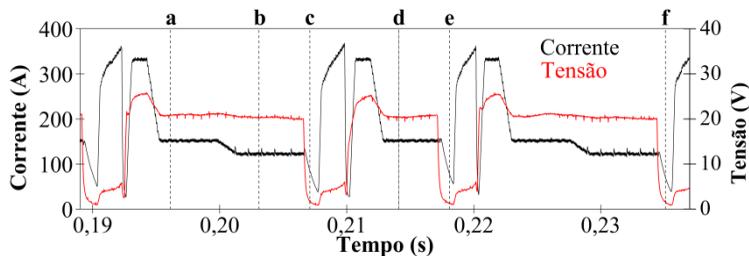


Figura 87: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 86

A seguir, uma análise da filmagem é conduzida:

Durante o pulso de corrente, a poça de fusão é empurrada para a raiz da junta, conforme mostra a Figura 86a. Mesmo com a força do arco plasma, somente uma pequena variação da oscilação do metal líquido na raiz da solda (parte mais inferior da poça) é constatada.

Na Figura 86c, o diâmetro da gota foi medido em aproximadamente 1,3 mm. Embora ele tenha variado em tamanho e forma, ao longo da filmagem ele se mostrou ser sempre maior que o diâmetro do arame utilizado, que é de 1,2 mm.

Uma particularidade observada neste ensaio é a presença de diferentes tempos de arco, conforme pode ser observado no oscilograma da Figura 88.

Analisando a filmagem para um tempo de arco longo, no momento do curto-circuito, constatou-se uma linha branca na superfície da poça de fusão. Ela é destacada pela seta branca na Figura 86c. Esta linha é oriunda da luz refletida pela gota. Ela sugere que uma superfície aparentemente lisa de metal líquido se acumula na frente da região de contato gota-poça.

Com um tempo de arco curto, a linha branca não é presenciada, conforme mostra a Figura 86e.

A incidência de diferentes tempos de arco pode também ser observada pela análise do histograma do tempo de arco, apresentado na Figura 88. Neste caso, um tempo de 10 s foi utilizado para a análise. Uma distribuição bimodal do tempo de arco é constatada.

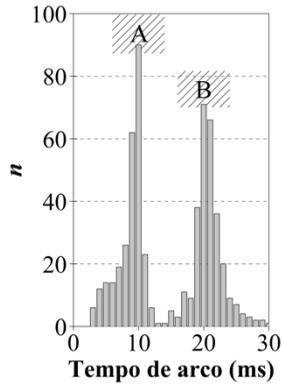


Figura 88: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz raiz com abertura de raiz mínima na posição plana

O pico A (tempo de arco curto) apresenta uma média de $8,6\text{ ms}$ e um Desvio-padrão de $2,7\text{ ms}$. O pico B (tempo de arco longo) apresenta uma média de $20,8\text{ ms}$ e um Desvio-padrão de $2,4\text{ ms}$. Isto sugere a presença de harmônicos na oscilação da poça de fusão.

Abertura reduzida na posição vertical descendente

[Link para visualização do vídeo](#)

Para avaliação das condições do processo de soldagem, uma filmagem de alta velocidade foi obtida, conforme mostra a Figura 89. Seis instantes característicos da filmagem foram escolhidos pelo autor.

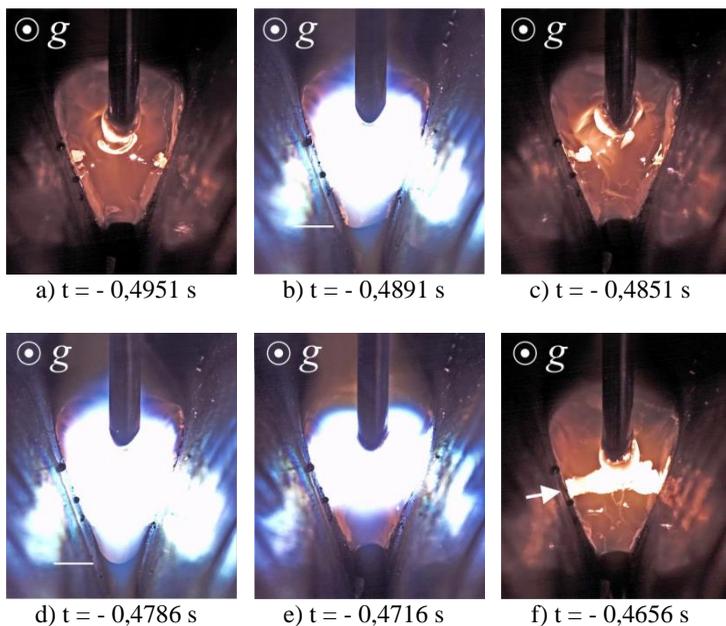


Figura 89: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura de raiz mínima na posição vertical descendente

Cada instante da Figura 89 é sincronizado com o oscilograma de corrente e tensão, apresentado no gráfico da Figura 90.

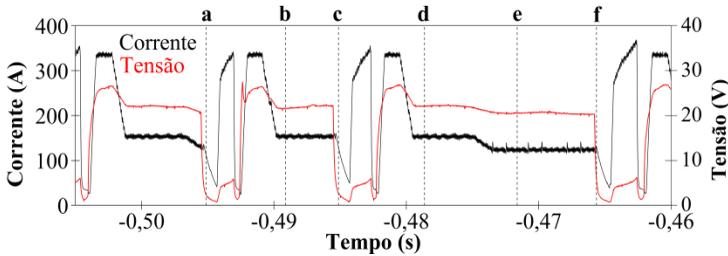


Figura 90: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 89

A seguir, uma análise da filmagem é conduzida:

Como se pode ver nas marcações da Figura 89b e Figura 89d, a oscilação do metal líquido na raiz da junta apresenta variações.

Após o pulso de corrente, presencia-se um retorno do metal líquido, em direção ao arame. Este retorno está sincronizado com término do pulso de corrente e acontece após 1,4 ms do início do pulso.

A forma da gota metálica apresentou maiores variações se comparada com a posição de soldagem plana. Isto, no entanto, não provocou instabilidades no processo de soldagem.

O histograma do tempo de arco revela que na posição vertical descendente, os menores tempos de arco prevalecem sobre os maiores, conforme mostra a Figura 91.

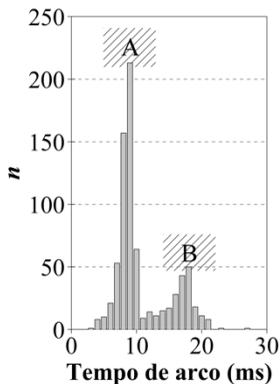


Figura 91: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura reduzida na posição vertical descendente.

O pico A apresenta uma média de 7,8 *ms* e um Desvio-padrão de 1,3 *ms*. O pico B apresenta uma média de 16,2 *ms* e um Desvio-padrão de 2,3 *ms*. A maior intensidade do pico A em relação ao pico B sugere uma menor presença de harmônicos na oscilação da poça, se comparado com o histograma da posição plana (Figura 88).

Abertura reduzida na posição sobre-cabeça

[Link para visualização do vídeo](#)

Para avaliação das condições do processo de soldagem, uma filmagem de alta velocidade foi obtida, conforme mostra a Figura 92. Seis instantes característicos da filmagem foram escolhidos pelo autor.

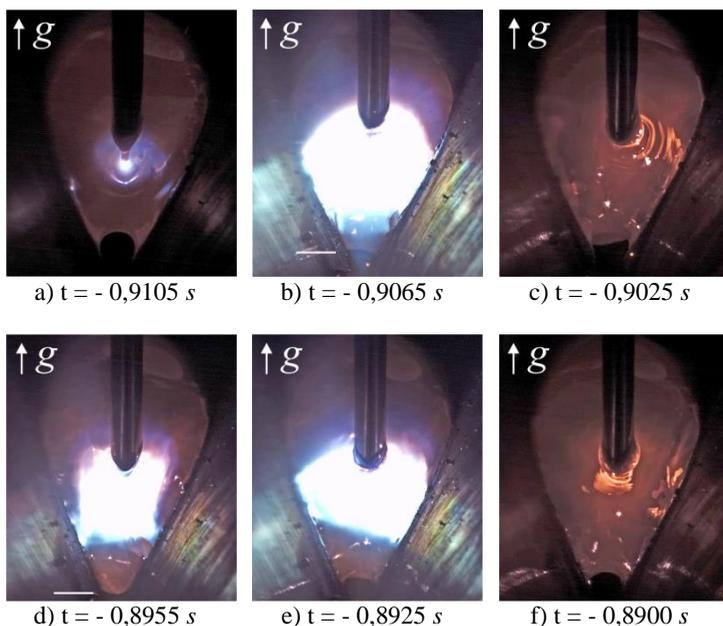


Figura 92: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura de raiz mínima na posição sobre-cabeça

Cada instante da Figura 92 é sincronizado com o oscilograma de corrente e tensão, apresentado no gráfico da Figura 93.

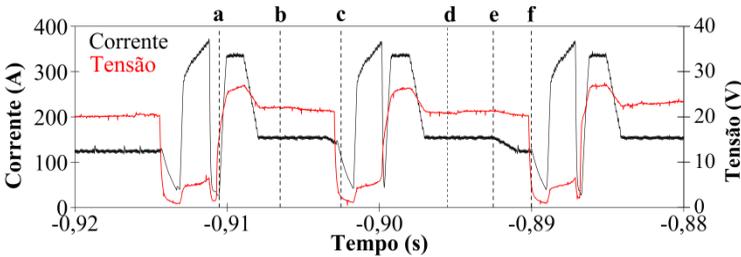


Figura 93: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 92

A seguir, uma análise da filmagem é conduzida:

A influência da força da gravidade sob o comportamento da poça de fusão é maior nesta posição. É possível verificar que todo o metal líquido é atraído pela força da gravidade.

Uma concavidade do metal líquido na raiz da junta é formada. Ela foi medida em aproximadamente 1,0 mm na Figura 92a. Além da força da gravidade, ela se deve também à ação da força de tensão superficial atuar no sentido de “puxar” o metal líquido para fora da raiz.

Durante o pulso de corrente, a força do arco plasma supera a força da gravidade e a força da tensão superficial. O volume de metal líquido é, por consequência, empurrado para a raiz da solda, conforme mostra a Figura 92b.

Assim como na posição vertical descendente, a oscilação do metal líquido na raiz da junta apresentou variações, observável pela diferença entre as marcações da Figura 92b e Figura 92d.

O histograma do tempo de arco, mostrado na Figura 94, revela que na posição de soldagem sobre-cabeça, a presença de harmônicos segue a mesma tendência do resultado na posição de soldagem vertical descendente (Figura 91).

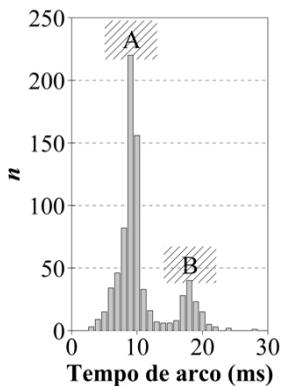


Figura 94: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz raiz com abertura reduzida na posição sobre-cabeça

O pico A apresenta uma média de $8,4 \text{ ms}$ e Desvio-padrão de $1,7 \text{ ms}$. O pico B apresenta uma média de $17,8 \text{ ms}$ e Desvio-padrão de $1,8 \text{ ms}$.

Abertura excessiva na posição plana

[Link para visualização do vídeo](#)

Para avaliação das condições do processo de soldagem, uma filmagem de alta velocidade foi obtida, conforme mostra a Figura 95. Seis instantes característicos nesta filmagem foram escolhidos pelo autor, sendo que três primeiros representam a tocha na extremidade esquerda da junta e os três últimos no centro da junta.

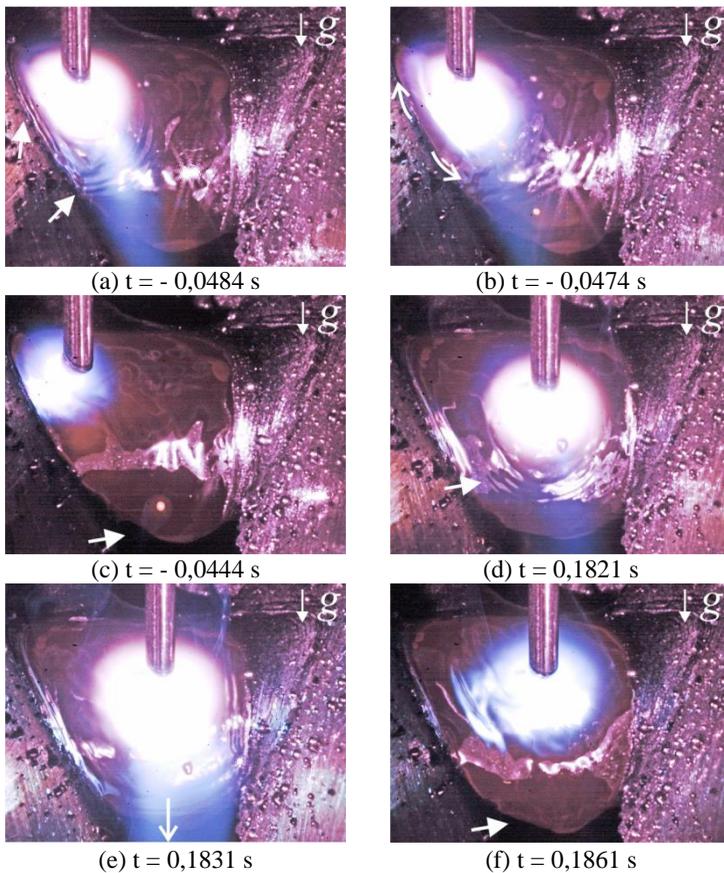


Figura 95: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura excessiva na posição plana

Cada instante da Figura 95 é sincronizado com o oscilograma de corrente e tensão, apresentado no gráfico da Figura 96.

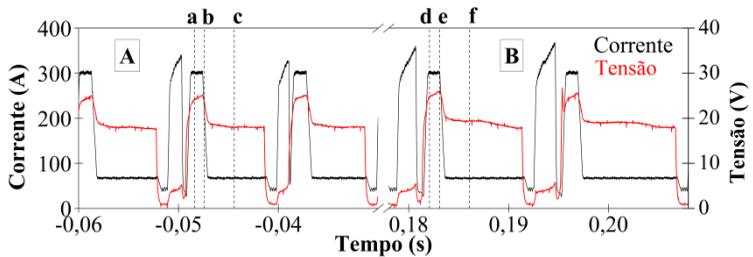


Figura 96: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 95 com uma quebra na escala do tempo (/), Parte A – Tocha na esquerda, Parte B – Tocha no centro da junta

A seguir, uma análise da filmagem é conduzida:

Primeiro o comportamento da poça, quando o arco voltaico se encontra no extremo da junta, será analisado. Durante o pulso de corrente, geram-se cristas de onda na superfície do metal líquido (setas brancas na Figura 95a). Inúmeras cristas de ondas se propagam na superfície da poça. Pela proximidade do arco voltaico com a parede sólida do chanfro, o metal líquido tende a ficar acumulado nesta região (Figura 95b). Com isto, seu escoamento para a raiz da junta é dificultado e o arco voltaico tende a ficar ancorado numa posição mais superior da poça (Figura 95c).

No momento em que o arco voltaico se encontra na região central da poça de fusão, a movimentação das cristas das ondas prevalece no sentido axial (Figura 95d). Isto faz com que, nesta região, o volume de metal líquido alcance mais facilmente a raiz da junta (Figura 95e).

Devido ao metal ser empurrado para baixo, o arco voltaico se ancora numa posição mais inferior da poça (Figura 95f). Uma maior luminosidade é visualizada, com relação ao arco no extremo da poça (Figura 95c).

A diferença de luminosidade sugere que os tempos de arco com a tocha no centro da poça, serão maiores com relação aos tempos de arco com a tocha no extremo da junta, havendo, portanto, uma maior dispersão. Para verificar isto, o histograma de

tempo de arco foi calculado, conforme mostra a Figura 97. A média do tempo de arco é de $13,7 \text{ ms}$ e o Desvio-padrão $5,3 \text{ ms}$. A dispersão dos tempos de arco é considerada elevada.

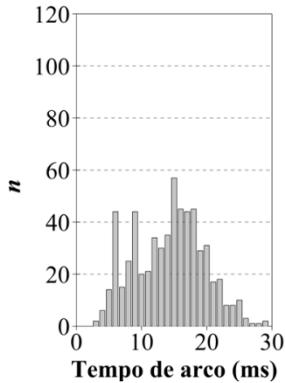


Figura 97: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura excessiva na posição plana

O tamanho da gota, visualizável na Figura 95c, não diverge significativamente do diâmetro do arame (de $1,2 \text{ mm}$), sendo menor que o da gota gerada pela forma de onda com $v_a = 5,0 \text{ m/min}$ (Figura 86).

Abertura excessiva na posição vertical descendente

[Link para visualização do vídeo](#)

Para avaliação das condições do processo de soldagem, uma filmagem de alta velocidade foi obtida, conforme mostra a Figura 98. Seis instantes característicos nesta filmagem foram escolhidos pelo autor, sendo que os três primeiros representam a tocha no centro da junta e os três últimos na extremidade esquerda da junta.

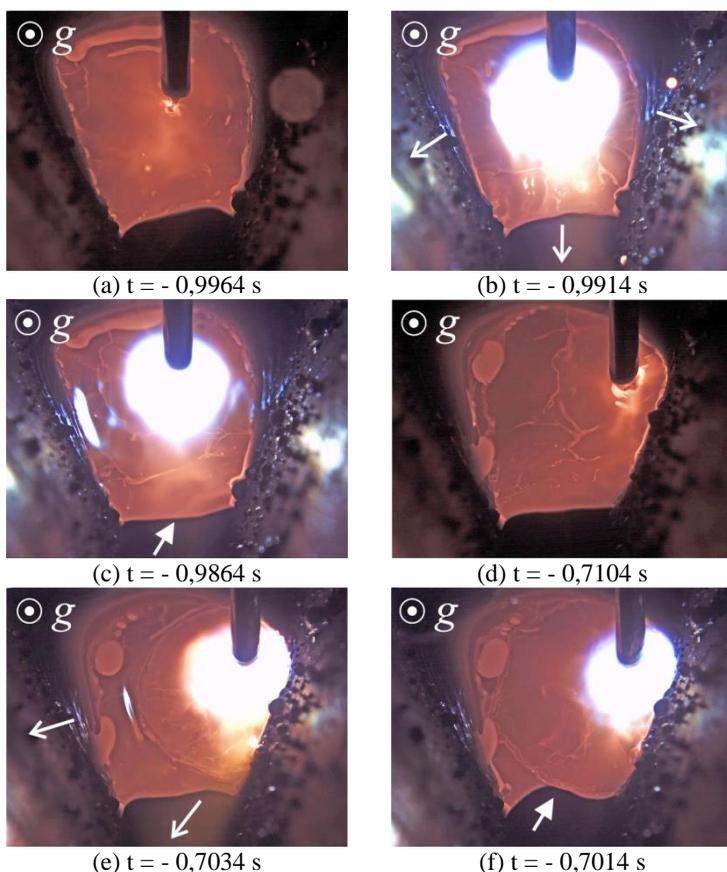


Figura 98: Filmagem em alta velocidade da soldagem do passe de raiz com uma abertura excessiva na posição vertical descendente.

Cada instante da Figura 98 é sincronizado com o oscilograma de corrente e tensão, apresentado no gráfico da Figura 99.

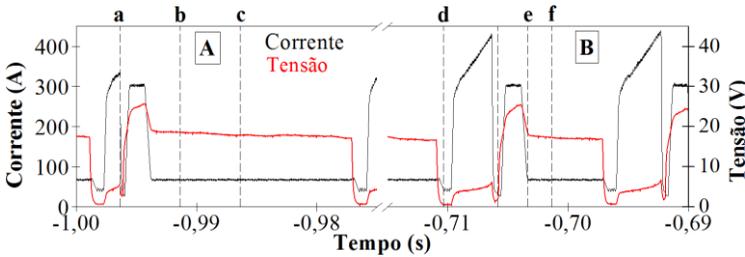


Figura 99: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 98, com uma quebra na escala do tempo (//), Parte A –Tocha no centro, Parte B – Tocha na extremidade da junta

A seguir, uma análise da filmagem é conduzida:

Quando a tocha está no centro da poça de fusão, o movimento do metal líquido parece ser radial (Figura 98b), ao invés de axial como é o caso da posição plana. Nesta situação, no instante anterior à reabertura do arco (Figura 98a), o metal líquido da raiz está mais próximo do arame.

Após o pulso de corrente, são necessários cerca de 5 ms, para que o metal líquido comece a se afastar do arco voltaico (Figura 98b). Somente depois de outros 5 ms (num total de 10 ms), a amplitude máxima de oscilação do metal líquido na raiz da junta é alcançada (Figura 98c). Em seguida, o metal líquido retorna novamente de encontro ao arame, promovendo o contato.

Quando o arco voltaico se encontra na extremidade da poça de fusão, o movimento de metal líquido é novamente radial (Figura 98e). Contudo, a propagação das cristas de ondas influencia a oscilação do metal líquido na raiz da solda, mostrado pela seta branca na Figura 98f, de forma diferente. Ela adquire um aspecto característico de movimentos harmônicos, em função da notória propagação das cristas de ondas.

A Figura 100 mostra o histograma de tempo de arco da solda na posição vertical descendente. Com relação ao resultado da posição plana (Figura 97), o histograma do tempo de arco apresenta uma menor dispersão. Isto porque o tempo de parada

foi diminuído para 0,3 s. O tempo médio de arco calculado é de 11,5 ms com Desvio-padrão de 3,4 ms.

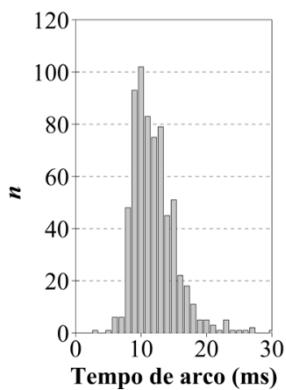


Figura 100: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com uma abertura excessiva na posição vertical descendente

Abertura excessiva na posição sobre-cabeça

[Link para visualização do vídeo](#)

Para avaliação das condições do processo de soldagem, uma filmagem de alta velocidade foi obtida, conforme mostra a Figura 101. Seis instantes característicos nesta filmagem foram escolhidos pelo autor, sendo que os três primeiros representam a tocha extremidade direita e os três últimos no centro da junta.

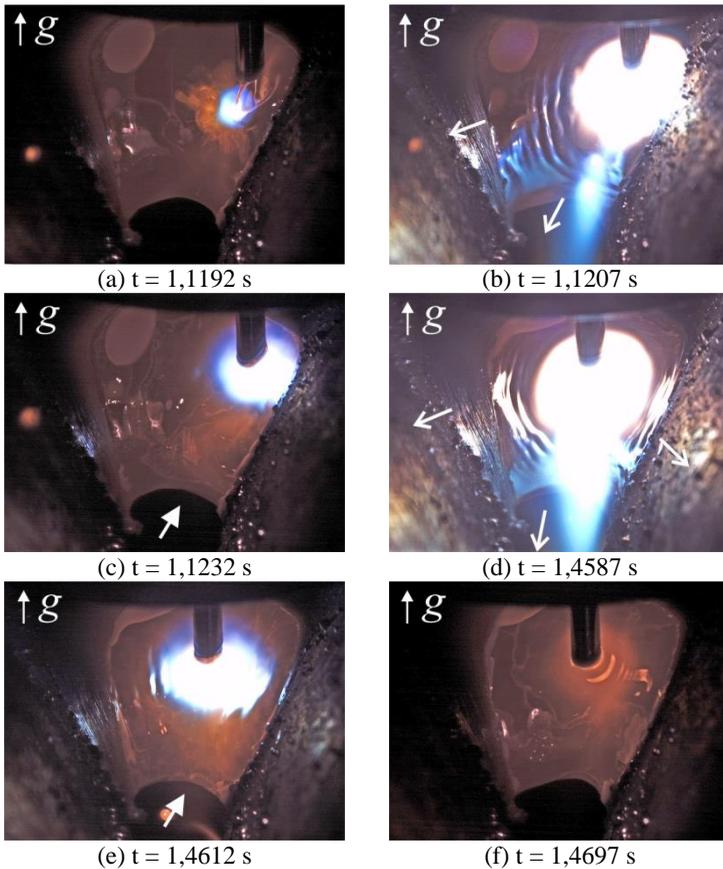


Figura 101: Análise da oscilação da poça de fusão na solda do passe de raiz com abertura de excessiva na posição sobre-cabeça

Cada instante da Figura 101 é sincronizado com o oscilograma de corrente e tensão, apresentado no gráfico da Figura 102.

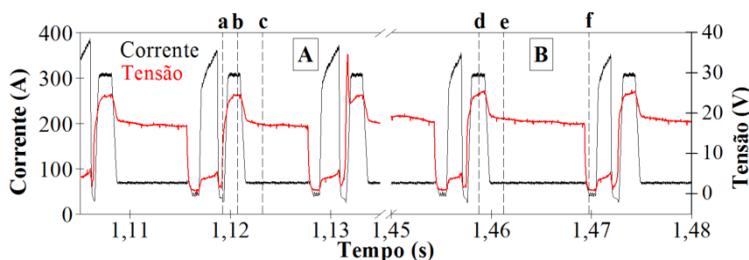


Figura 102: Oscilograma de corrente e tensão sincronizado com a filmagem da Figura 101 com uma quebra na escala do tempo (//), Parte A –Tocha na extremidade, Parte B – Tocha no centro da junta

A seguir, uma análise da filmagem é conduzida:

O metal líquido é continuamente atraído pela força da gravidade. Este efeito é mais perceptível na região da raiz da solda, evidenciada pela seta branca na Figura 101c. Ela fica côncava, devido também à força da tensão superficial. Esta concavidade foi medida em aproximadamente $1,2\text{ mm}$ na Figura 101a.

Quando o arco voltaico se encontra na extremidade da poça de fusão, observa-se que durante o pulso de corrente, o movimento de metal líquido é radial (Figura 101b). Diferentemente da posição vertical descendente não se presenciam, contudo, uma forte interação das cristas de onda com o metal líquido na raiz da solda. De forma que logo após o término do pulso (Figura 101c), a forma da raiz da solda permanece semelhante ao momento anterior ao pulso (Figura 101a).

A mesma observação pode ser feita quando o arco voltaico se encontra no centro da poça de fusão (Figura 101d). O movimento de metal líquido no sentido radial é novamente constatado. Pouca interferência na agitação do metal líquido na raiz da solda é observada, conforme mostra a seta branca na Figura 101e. Até o momento em que ocorre um novo curto-circuito, a poça de fusão na raiz da solda é pouco alterada (Figura 101f).

A Figura 103 mostra o histograma de tempo de arco para a posição de soldagem sobre-cabeça. A média do tempo de arco foi de $12,7\text{ ms}$ e o Desvio-padrão de $3,4\text{ ms}$. Com relação ao

resultado da posição vertical descendente (Figura 100), o tempo de arco não apresentou variações significativas.

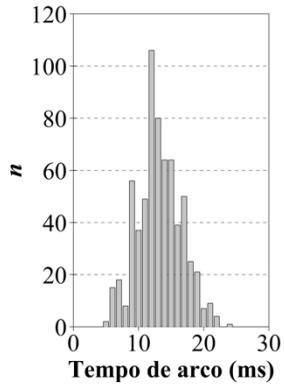


Figura 103: Histograma do tempo de arco para a soldagem do passe de raiz com abertura de raiz máxima na posição sobre-cabeça

9.2 Funcionamento dos algoritmos

O funcionamento simplificado do algoritmo para execução da trajetória adaptativa é mostrado na Figura 104.

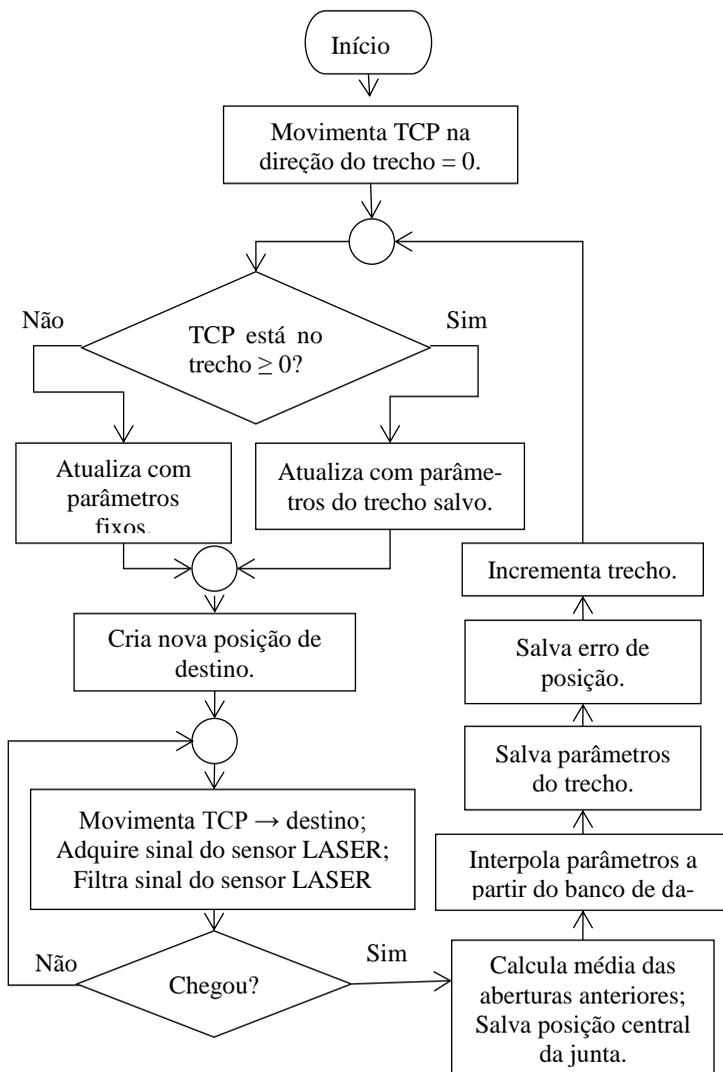


Figura 104: Algoritmo para a execução da trajetória com correção

Este algoritmo parte do principio que a posição inicial já foi detectada pelo sensor LASER.

Os algoritmos programados no JOB do robô na linguagem INFORM III estão sincronizados com o programa desenvolvimento no computador.

9.3 Validação dos algoritmos em chapa

Para validação do controle adaptativo, soldas do passe de raiz foram inicialmente realizadas em chapas. O diagrama de blocos da Figura 105 mostra que a validação do programa para soldagem adaptativa ocorreu em duas etapas.

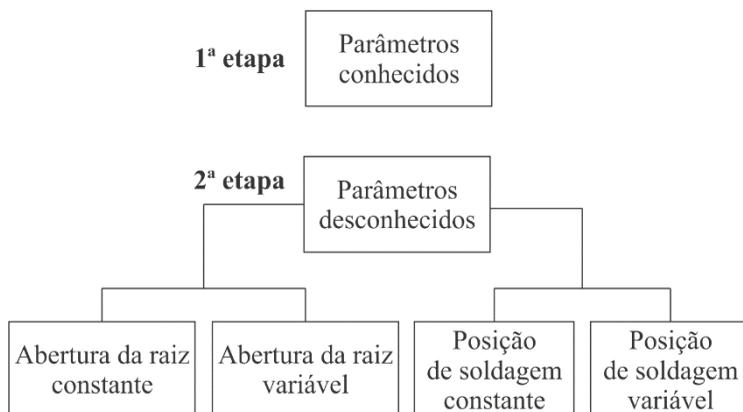


Figura 105: Etapas de validação do sistema para soldagem adaptativa desenvolvido.

Na primeira etapa, o corpo de prova apresentava uma abertura da raiz e posição de soldagem conhecida. Isto quer dizer que o corpo de prova foi soldado com uma mesma abertura da raiz e posição de soldagem já mostrada no Capítulo 4. Um corpo de prova de chapa com abertura da raiz aproximada de 2 mm na posição de soldagem plana foi utilizado.

Na segunda etapa de validação, as variáveis de soldagem eram desconhecidas. A tarefa do sistema era interpolar corretamente todas as variáveis de forma a obter um resultado de solda do passe de raiz dentro das normas.

No primeiro corpo de prova, a abertura da raiz era constante. Um corpo de prova de chapa com uma abertura da raiz aproximada de $3,5\text{ mm}$ na posição de soldagem plana foi escolhido.

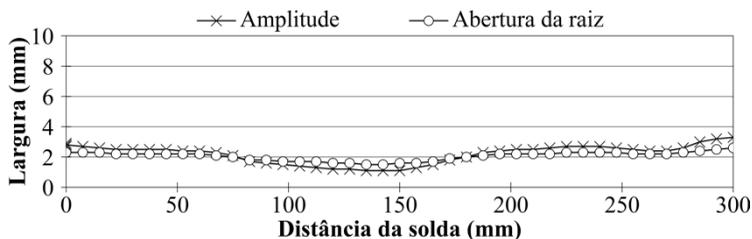
Um segundo corpo de prova foi utilizado para validação com uma abertura da raiz variável. Ela apresentou uma variação de 0 a 5 mm . As variáveis de soldagem foram interpoladas tam-

bém com relação à posição de soldagem, sendo que o corpo de prova foi soldado com uma inclinação de 45° .

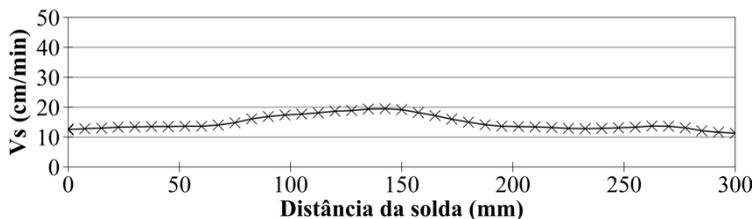
No último corpo de prova, tanto a posição de soldagem como a abertura da raiz era variável. Para tanto, três juntas de tubo foram soldadas com o sistema para soldagem adaptativa, conforme mostra o Capítulo 6.

Parâmetros conhecidos

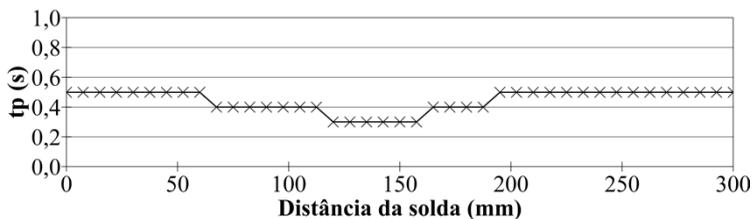
A Figura 106 mostra o resultado da solda do passe de raiz com uma abertura da raiz de $2,20 \pm 0,64 \text{ mm}$ na posição plana.



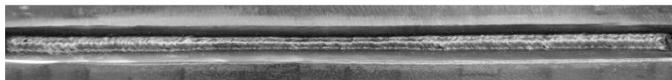
a) Gráfico da correção da amplitude e e leitura da abertura da raiz



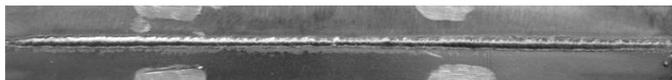
b) Gráfico da correção da velocidade de soldagem (v_s)



c) Gráfico da correção do tempo de parada (t_p)



d) Vista superior da solda

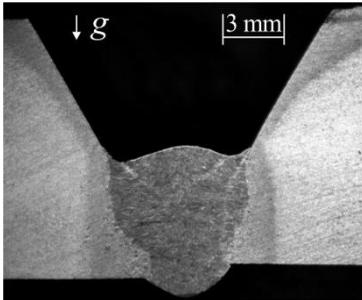


e) Vista inferior da solda

Figura 106: Resultado da solda do passe de raiz com variáveis de soldagem conhecidas

Como se pode ver na vista superior e inferior do corpo de prova, o passe de raiz apresentou uma penetração adequada em todo comprimento do corpo de prova.

Uma análise metalográfica do cordão de solda é mostrada na Figura 107. O passe de raiz atendeu os requisitos técnicos utilizados neste trabalho.

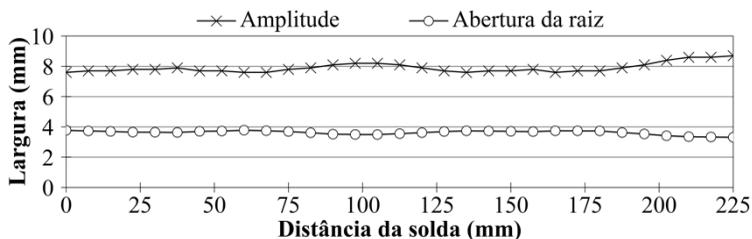


Dimensão da solda:	5,0 mm
Convexidade:	0,8 mm
Largura da face:	7,0 mm
Reforço da raiz:	1,5 mm
Largura da raiz:	4,1 mm

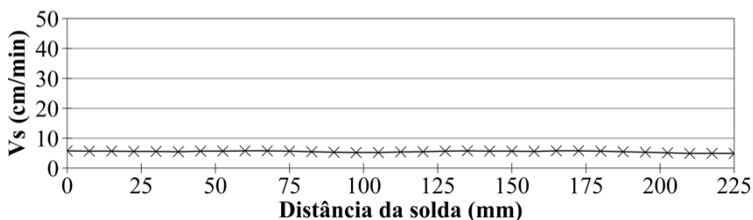
Figura 107: Análise macrográfica da solda do passe de raiz na primeira etapa de validação, Ataque: Nital 10 %

Parâmetros desconhecidos: Abertura da raiz constante e posição constante

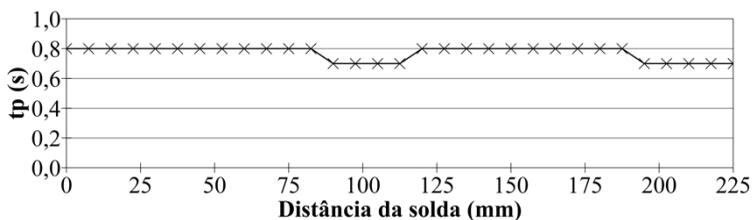
A Figura 108 mostra o resultado da solda do passe de raiz com uma abertura da raiz de $3,65 \pm 0,21 \text{ mm}$ na posição plana.



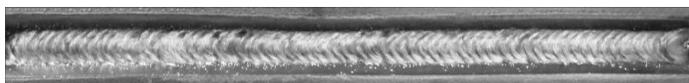
a) Gráfico da correção da amplitude e leitura da abertura da raiz



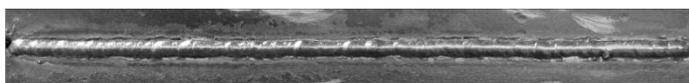
b) Gráfico da correção da velocidade de soldagem (v_s)



c) Gráfico da correção do tempo de parada (t_p)



d) Vista superior da solda



e) Vista inferior da solda

Figura 108: Resultado da solda do passe de raiz na segunda validação

Como se pode ver na vista superior e inferior do corpo de prova, o passe de raiz apresentou uma penetração adequada em todo comprimento do corpo de prova.

A Figura 109 mostra a seção transversal do passe de raiz. A geometria da solda atendeu os requisitos técnicos utilizados neste trabalho.

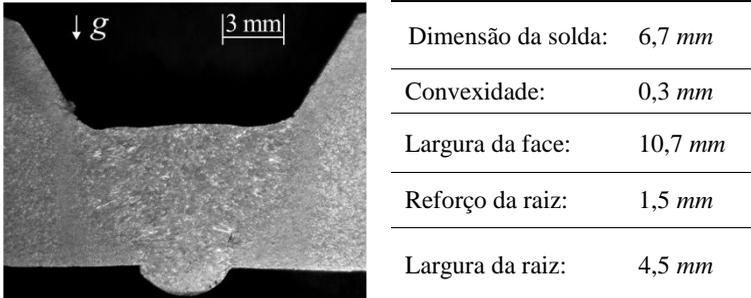
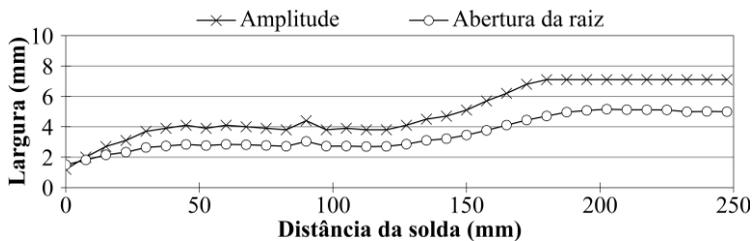


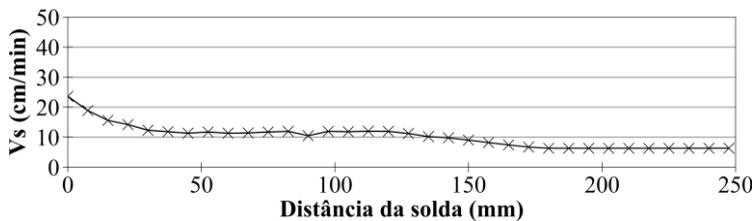
Figura 109: Análise macrográfica da solda do passe de raiz na primeira etapa de validação, Ataque: Nital 10 %

Parâmetros desconhecidos: Abertura da raiz variável e posição constante

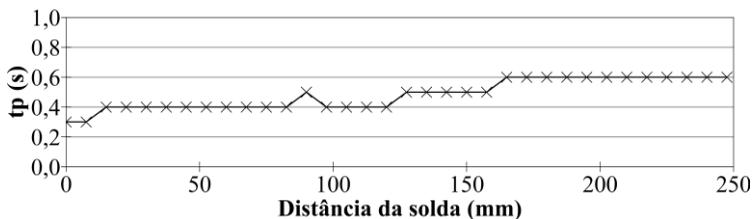
A Figura 110 mostra o resultado da validação.



a) Gráfico da variação da amplitude e da abertura da raiz



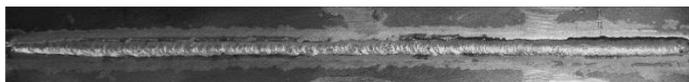
b) Gráfico da variação da velocidade de soldagem (v_s)



c) Gráfico da variação do tempo de parada (t_p)



d) Vista superior da solda



e) Vista inferior da solda

Figura 110: Resultado da solda do passe de raiz com abertura da raiz variável e posição de soldagem constante de 45°

9.4 Efeito “W”

A divisão da trajetória em trechos foi necessária para que as variáveis de soldagem pudessem ser corrigidas em tempo real no robô HP20D. Além da complexa programação do JOB no controlador do robô, uma das dificuldades de se dividir a trajetória é o chamado efeito “W”. Ele é mostrado na Figura 111, a qual apresenta um gráfico com a aquisição da leitura dos “*tracking points*” no eixo *y* gerados durante a trajetória de soldagem. Esta aquisição representa a própria trajetória da tocha de soldagem com o movimento de tecimento.

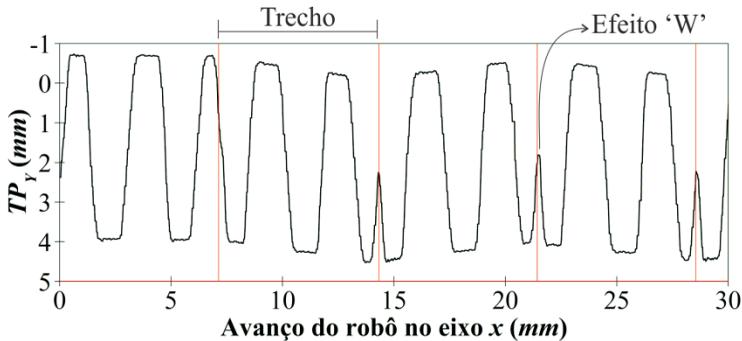


Figura 111: Gráfico da leitura dos “*tracking points*” (TP) na coordenada *y* pelo avanço do robô no eixo *x* com aparecimento do efeito “W”

Durante a execução de cada trecho, o robô reinicia o comando de tecimento para que os parâmetros de tecimento sejam atualizados. A constante troca de parâmetros faz com que em certos trechos o robô reinicie o tecimento para um lado oposto ao trecho anterior. Isto faz surgir o efeito “W”, destacado na Figura 111. Dependendo da quantidade de efeitos “W” durante a soldagem, isto pode prejudicar a qualidade da solda.

Para a correção do efeito “W” foi incorporado uma rotina no JOB do programa. Ela resumidamente verifica qual a direção em que o tecimento está no trecho antes de modificá-lo, e a corrige durante a geração do tecimento do próximo trecho. O gráfico da Figura 112 mostra o gráfico da aquisição da leitura dos “*tracking points*” com o efeito “W” corrigido.

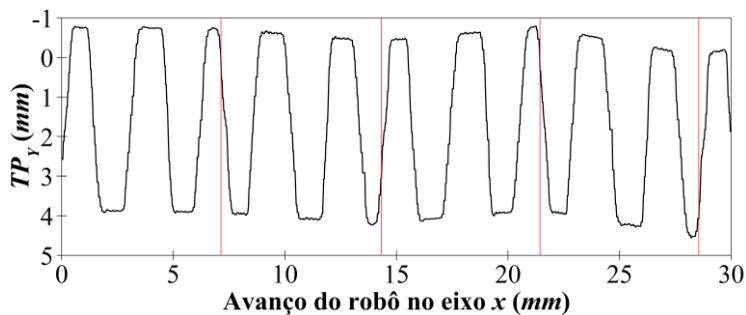


Figura 112: Gráfico da leitura dos “tracking points” (TP) na coordenada y pelo avanço do robô no eixo x com a correção do efeito “W”

10 ANEXOS

Anexo A – Manual de operação do processo CCC na 3ª geração

Na 3ª geração do CCC foi incorporado a fonte Digiplus A7 AC uma chave (IGBT) em série com a saída específica para soldagem com o CCC, conforme mostra a Figura 113. Além da nova chave, foram incorporados outros componentes para evitar a extinção do arco e implementados novos softwares de controle.

Na 3ª geração, com a introdução da chave, o tempo de redução da corrente, no momento da reabertura, ficou por volta de 15 μ s, obtendo-se uma velocidade dez vezes superior a versão anterior. Esta maior dinâmica de redução da corrente, juntamente com evolução na forma de detectar a eminiência de reabertura do arco, permitiu uma redução bastante significativa dos respingos, como também, se obter uma arco mais estável. Aliado a estes avanços foram criados procedimentos sinérgicos para os arames ER70S6 de 1.0 e 1.2 mm, usando o gás C25.

Para operação com o novo CCC, é necessário se conectar o borne macho do manguote ao terminal fêmea no painel da fonte, que é identificado com a designação CCC, conforme mostra a Figura 113.



Figura 113: Fotos mostrando o novo borne para o processo CCC

Nesta saída é recomendado que se opere apenas com o CCC, corrente pulsada ou modo MIX em operações de soldagem em que a corrente média não ultrapasse 250 A.

O acesso ao CCC continua semelhante e é realizado através da opção ESPECIAIS. O modo sinérgico é acessado através da opção CCCI SIN, conforme apresentado na Figura 114. Em vermelho estão identificadas a sequência de opções que devem ser selecionadas.

MIG/ARCO SUB.	ELET REV	CARREGAR
TIG/PLASMA	DESLIGAR	CONFIGURAR

PULSADO	CONVENCIONAL	ESPECIAIS
PRODUCAO	ARCO SUBMERSO	MIX

CCCI	CCCI SIN
------	----------

Aco Carbono C25 1,0 mm	CONFIRMA
------------------------	----------

Usar botões + e - para
Selecionar o material, pressionar CONFIRMA

Va: 3.3 m/min a: 0	HAB. SOLDA
SALVAR	CONFIGURAR

Cta: 0.0	CKr: 0.2
----------	----------

Regulagem transientes
Opção : CONFIGURAR



Figura 114: Acesso ao painel do programa CCC na versão sinérgico

No sinérgico do CCC a variável regulada é a velocidade de arame, v_a . A variável “a” é utilizada para modificar a energia da solda, ela atua sobre as correntes I_{a2} e I_{a3} (Figura 115). Para permitir um refinamento do sinérgico, pode-se usar a opção CONFIGURAR, que disponibiliza a regulagem das variáveis Cta e Ckr , as quais atuam respectivamente sobre o tempo t_{a1} e a variável de detecção Kr .

O sinérgico foi otimizado para operar em passes de raiz. Porém, conforme a configuração do chanfro, distância bico de contato-peça, como também, em aplicações de soldagem com chapas finas, pode ser necessário alterar as variáveis “a”, Cta e Ckr .

A variável “a” tem a função de modificar a corrente média de uma forma geral, já Cta , aumenta/diminui o tempo de atuação da corrente I_{a1} , que é a corrente de pico após a abertura, principal

fonte de energia para formação da gota. A variável Ckr atua sobre a formação de respingos, quanto menor o valor, mais cedo será detectada a reabertura do arco. Porém, valores pequenos de Kr , podem antecipar demais a detecção, fazendo com que a corrente seja reduzida com muita antecedência, diminuindo as forças de destacamento da gota. Isto pode prolongar o tempo de curto circuito, “esfriando” a poça, e com isso tornar o processo instável.

A Figura 115 mostra uma ilustração da forma de onda da corrente do processo CCC com a designação dos parâmetros do processo.

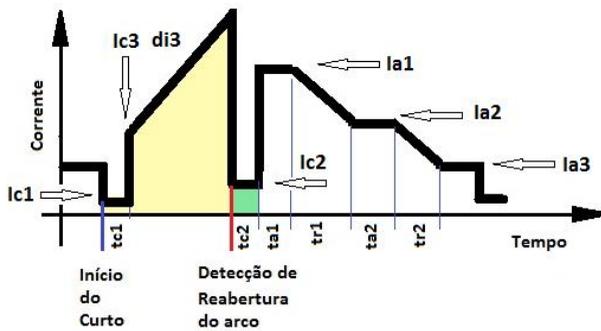


Figura 115: Forma de onda da modalidade MIG/MAG CCC

Nessa nova versão do CCC, na opção não sinérgica, as variáveis t_{c2} e I_{c2} foram suprimidas. Abaixo segue uma descrição das variáveis da Figura 115:

- U_{cc} : Determina a tensão mínima em que a fonte interpretará como sendo um curto-circuito.
- I_{c1} : Corrente de curto-circuito.
- t_{c1} : Tempo em que a fonte mantém a corrente I_{c1} .
- I_{c3} : Corrente de destacamento do curto-circuito.
- d_{i3} : Determina a velocidade de subida da corrente.
- Kr : É uma variável adimensional que altera a detecção do curto circuito. Quanto menor, mais antecipada é a detecção, e quanto maior, mais atrasada.
- I_{a1} : Corrente de pulso.
- t_{a1} : Tempo de pulso.

- t_{r1} : Tempo de descida da corrente de pulso para a corrente de patamar intermediário.
- I_{a2} : Corrente do patamar intermediário.
- t_{a2} : Tempo do patamar intermediário.
- t_{r2} : Tempo de descida da corrente de patamar intermediário para a corrente de base.
- I_{a3} : Corrente de base.

No anexo B é apresentado a tabela de dados que compõem o programa sinérgico. Estes dados podem ser regulados na opção do CCC não sinérgico, e podem servir de ponto de partida para novas aplicações.

Anexo B –Valores das variáveis do processo CCC para arame ER70S-6 de 1,2 mm

v_a	I_{a1}	t_{a1}	I_{a2}	t_{a2}	I_{a3}	I_{c1}	t_{c1}	I_{c3}	d_{13}	t_{r1}	t_{r2}	K Γ	U_{cc}
2	170	1,3	60	3,0	40	30	0,5	175	70	0,5	0,6	1,2	10
2,3	190	1,3	60	3,0	40	30	0,5	175	70	0,5	0,6	1,2	10
2,5	210	1,3	65	3,0	45	30	0,5	175	70	0,5	0,6	1,2	10
2,8	230	1,3	65	3,0	45	30	0,5	175	70	0,5	0,6	1,2	10
3	250	1,3	70	3,0	50	30	0,5	175	70	0,5	0,6	1,2	10
3,3	270	1,3	70	3,0	50	30	0,5	175	70	0,5	0,6	1,2	10
3,5	290	1,3	75	3,0	55	30	0,5	180	70	0,5	0,6	1,2	10
3,8	310	1,3	75	3,0	55	30	0,5	185	70	0,5	0,6	1,2	10
4	330	1,3	80	3,0	60	30	0,5	190	70	0,5	0,6	1,2	10
4,3	350	1,3	80	3,0	60	30	0,5	195	70	0,5	0,6	1,2	10
4,5	370	1,3	85	3,0	65	30	0,5	200	70	0,5	0,6	1,2	10
4,8	390	1,3	85	3,0	65	30	0,5	210	70	0,5	0,6	1,2	10
5	410	1,3	90	3,0	70	30	0,5	220	70	0,5	0,6	1,2	10
5,3	430	1,3	90	3,0	70	30	0,5	230	70	0,5	0,6	1,2	10
5,5	450	1,3	95	3,0	75	30	0,5	240	70	0,5	0,6	1,2	10
5,8	450	1,5	95	3,0	75	30	0,5	250	70	0,5	0,6	1,2	10
6	450	1,5	100	3,0	75	30	0,5	260	70	0,5	0,6	1,2	10