

Daniel Galeazzi

**SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL COM SENSORIAMENTO  
LASER: ANÁLISE E MELHORIAS DE CONDIÇÕES  
OPERACIONAIS PARA AUMENTO DA CONFIABILIDADE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Florianópolis  
2019

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

Galeazzi, Daniel  
SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL COM SENSORIAMENTO  
LASER: ANÁLISE E MELHORIAS DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS  
PARA AUMENTO DA CONFIABILIDADE / Daniel Galeazzi ;  
orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, 2019.  
194 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

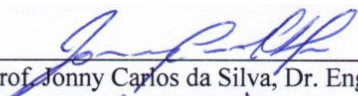
1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem Orbital. 3.  
Sensor Laser. 4. Processos Avançados de Soldagem. 5.  
Automação em Soldagem. I. Gonçalves e Silva, Régis  
Henrique. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. III. Título.

Daniel Galeazzi

**SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL COM SENSORIAMENTO  
LASER: ANÁLISE E MELHORIAS DE CONDIÇÕES  
OPERACIONAIS PARA AUMENTO DA CONFIABILIDADE**

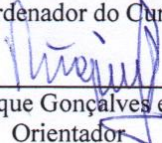
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e, aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 05 de abril de 2019.



---

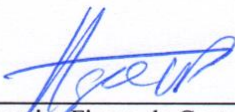
Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng  
Coordenador do Curso



---

Prof. Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng  
Orientador

**Banca Examinadora:**




---

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng



---

Prof. Carlos Enrique Niño Bohorquez, Dr. Eng



---

Leonardo da Paixão Carvalho, M. Eng.  
PETROBRAS

Aos meus pais Marli e Gilson.  
Ao meu irmão Eduardo e ao meu  
amigo Marcelo (*In memoriam*)



## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, à Petrobras pelo fomento e incentivo a pesquisa no país;

Ao meu Orientador Prof. Dr. Regis Henrique Gonçalves e Silva pela orientação e incentivo neste dentre outros trabalhos conduzidos no Labsolda;

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

Ao Alberto Bonamigo Viviane pela auxílio e orientação;

A todos os bolsistas de graduação e pós-graduação do Labsolda que contribuíram de alguma forma para consecução deste trabalho.

À minha família, em especial à minha mãe Marli Amaral Galeazzi, meu pai Gilson Daniel Galeazzi e meu irmão Eduardo Galeazzi.



O maior inimigo do conhecimento não  
é a ignorância, é a ilusão do  
conhecimento.

(Stephen Hawking)





## RESUMO

Este trabalho engloba a avaliação e aprimoramento sistemático de um sistema para soldagem orbital automatizada sob a perspectiva de torná-lo um sistema adaptativo, por meio de um subsistema de sensoriamento da junta por visão, cuja principal ferramenta é um cabeçote de medição por LASER e tratamento de imagem (por isso chamado “sensor LASER”). Para isto é necessário avaliar aspectos operacionais gerais do sistema, que o diferenciam de sistemas de soldagem mecanizada com base fixa, principalmente os problemas associados ao controle e manutenção da capacidade corretiva de trajetórias por meio deste sensor, ao longo das soldas orbitais. Primeiramente, com base em uma análise de hardware e a partir de trabalhos correlatos, foi possível realizar a integração entre o sensor, fonte de soldagem e o manipulador. A partir disso, foi possível realizar uma análise das inconsistências concernentes ao sistema de sensoriamento LASER quando aplicado sobre um manipulador com base móvel (cabeçote de soldagem orbital deslocado sobre trilho) e criar um método de compensação das mesmas, em suma a maior problemática está associada a defasagem (*offset* de medição) necessária entre a tocha de soldagem e o sensor, devido a influência da luz emitida pelo arco elétrico. A contínua alteração de posição da base do manipulador ao qual o sensor LASER está anexado sobre um trilho deformável incorre em desconexão entre causa e ação corretiva de trajetória, o que não acontece quando a base do manipulador permanece fixa. A solução consistiu em mapear a junta sob a ótica da tocha de soldagem e comparar com a leitura do sensor, criando assim um mapa dos erros associados ao mau posicionamento ou interferências geradas pela composição trilho e *offset* de medição, invisíveis ao algoritmo de controle de trajetória. A partir deste método, foi possível melhorar significativamente a operacionalidade do processo de soldagem orbital adaptativa, além de mapear inconsistências de hardware passíveis de reprojeto sobre o manipulador.

**Palavras-chave:** Automação, Soldagem orbital, sensor Laser, Soldagem adaptativa.



## ABSTRACT

This work encompasses the assessment and systematic improvement of an automated orbital welding system from the perspective of making it an adaptive system, through a joint sensing subsystem for vision, whose main tool is a LASER measuring head and image treatment (so called "LASER sensor"). For this it is necessary to evaluate operational aspects of the system, the mechanized welding systems differ with fixed base, mainly the problems associated to the control and maintenance of corrective ability of trajectories through this sensor, along the orbital welds. First, based on an analysis of hardware and from related work it was possible to perform the integration between the sensor and the welding source. From this, it was possible to conduct an analysis of the inconsistencies related to the LASER sensing system when applied on a handler with mobile base (orbital welding head moved on rail) and create a compensation method of the In short, the biggest problem is associated to lag (offset of measurement) required between the welding torch and the sensor, because the influence of the light emitted by the arc. The continuous change of position of the base of the handler to which the LASER sensor is attached on a deformable rail incurs disconnection between cause and corrective action of trajectory, which does not happen when the handler base remains fixed. The solution was to map the gasket under the optics of the welding torch and compare with the reading of the sensor, thus creating a map of errors associated with the bad placement or interference generated by rail offset measurement and composition, invisible to the algorithm of trajectory control. From this method, it was possible to significantly improve the operability of the orbital welding process adaptive, plus map hardware passives inconsistencies of advisory on the handler.

**Keywords:** Automation, Orbital welding, Laser sensor, Adaptive welding.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da montagem do tubo com distorções. ....	30
Figura 2 – Esquema básico de um sistema MIG/MAG. ....	33
Figura 3 – Oscilograma da corrente e tensão do processo MIG/MAG convencional e filmagem de alta velocidade da transferência metálica. ....	35
Figura 4 – Oscilograma de corrente e tensão da versão CCC e filmagem de alta velocidade da transferência metálica. ....	37
Figura 5 – Representação do posicionamento de um cobre-junta. ....	39
Figura 6 – Divisão das posições de soldagem encontradas para a soldagem orbital, onde: $vs$ é sentido de soldagem e $g$ a força da gravidade, adaptado do trabalho de Kindermann [6]. ....	40
Figura 7 – Representação da variação do perfil de penetração em função do posição de soldagem. ....	41
Figura 8 – Representação esquemática do perfil de penetração em função da abertura da raiz. ....	42
Figura 9 – Representação dos diferentes tipos de junta empregados na união de dutos, onde: $\beta$ = Ângulo do Bisel; N = Nariz; A = Abertura da Raiz ou <i>gap</i> . ....	43
Figura 10 – Variação da área de diferentes juntas em função da espessura da parede. ....	44
Figura 11 – Modelos comerciais da empresa Serimax, onde A é o Saturnax 01 e B o Saturnax 09. ....	46
Figura 12 – Modelos comerciais da empresa CRC-Evans, onde A é o P-260 e B o P-625. ....	47
Figura 13 – Sistema P-625 da CRC-Evans utilizando o sensor de triangulação Laser, Rajagopalan [26]. ....	47
Figura 14 – Manipulador Pipeliner II 609 da empresa Magnatech, com detalhe ao tracionador auxiliar, Maganatec [28]. ....	48
Figura 15 – Manipulador Tartflope V3 Orbital da empresa SPS. ....	49
Figura 16 – Representação esquemática do controle adaptativo, adaptado de Bidese [30]. ....	50
Figura 17 – Esquema da variação da corrente em função da variação de DBCP devido ao movimento oscilatório dentro do chanfro, onde $Vap$ : velocidade de aproximação da peça e $va$ : velocidade de alimentação [32].	51
Figura 18 – 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), Reisingen [33]. ....	53

Figura 19 – Representação esquemática do funcionamento de um sensor de triangulação Laser (STL), adaptado de Juneghan [35]. .....	54
Figura 20 – Espectro de intensidade de radiação emitido por comprimento de onda durante uma soldagem por arco elétrico no processo MIG, adaptado de Ye [36]. .....	55
Figura 21 – Aquisição da seção transversal de uma junta tipo V a partir da visão com o filtro passa-faixa do CMOS do STL Metavision SLS – 050 V1, com detalhe em reflexo. ....	56
Figura 22 – Exemplos de perfis de junta programados em um STL comercial, Metavision [37]. .....	57
Figura 23 – Exemplo dos principais pontos virtualizados de uma junta tipo V. ....	57
Figura 24 – Esquema de posicionamento do sensor em relação a tocha de soldagem. ....	59
Figura 25 – Representação das regiões de medição de um sensor de triangulação Laser, Bidese [30]. ....	61
Figura 26 – Bancada de ensaios: (A) Filtros, (B) Fonte de soldagem, (C) Cabeçote alimentador, (D) Robô, tocha, sensor ótico e peça, (E) Trocador de calor, (F) Cilindro de gás, (G) Computador e (H) Controlador do robô e IHM, Viviani [9]. ....	62
Figura 27 – Gráfico da leitura e filtragem ao longo de um comprimento de junta, Viviani [9]. ....	63
Figura 28 – Gráfico da leitura filtrada e linha central obtida a partir da média, Viviani [9]. ....	64
Figura 29 – Esquema de captura do perfil da junta, onde: (A) Posição de início da soldagem; (B) Retorno inicial; (C) Início da medição e localização do TP; (D) Leitura do perfil da junta, Viviani [9]. ....	65
Figura 30 – Interface do software de seguimento de junta, onde: (A) Abas, (B) Comandos de algoritmos, (C) Joystick, (D) Apoio, (E) Ajustes, (F) Botões, (G) Informações, (H) Indicador de qualidade e (I) Temperaturas, adaptado de Viviani [9]. ....	66
Figura 31 – Robô RES 7 4 780 T, desenvolvido pela ENGEMOVI. ....	67
Figura 32 – Configuração utilizada por Kindermann [6] para os ensaios de soldagem adaptativa. ....	68
Figura 33 – Diagrama de blocos referente a integração e comunicação do sistema adaptativo, adaptado de Kindermann [6]. ....	69
Figura 34 – Esquema da divisão da trajetória orbital em trechos Kindermann [6]. ....	69
Figura 35 – Tela inicial da interface desenvolvida, onde: (I) Informações do perfil da junta lido pelo sensor Laser; (II) Campo destinado à definição das variáveis relativas à trajetória do robô; (III) Informações	

referentes as variáveis instantâneas lidas pelo sensor (exceto o <i>gap</i> ); (IV) O trecho atual em que cada um dos componentes do sistema se encontra; (V) Informação de status e configuração do cabeçote de medição, Kindermann [6].	70
Figura 36 – Relção de posição entre TCP e sensor Laser ( <i>Offset</i> ), Kidermann [6].	71
Figura 37 – Esquema de localização e aquisição inicial da junta por meio do algoritmo descrito por Kindermann [6].	72
Figura 38 – Fluxograma da metodologia experimental.	73
Figura 39 – SAP de 5 kHz (Esquerda) e transdutor linear Burster de $50 \pm 0,05\%$ mm (Direita) [39] [40].	74
Figura 40 – Bancada experimental para medição das folgas dos manipuladores Tartílope V3 (Esquerda) e Pipeliner II (Direita).	75
Figura 41 – Esquema de posicionamento do transdutor adotado para medição das folgas, Tartílope V3 (Esquerda) e Pipeliner II (Direita).	76
Figura 42 – Fluxograma da medição das folgas nos eixos Y e Z.	77
Figura 43 – Medidor de velocidade de arame.	78
Figura 44 – Esquema de posicionamento do MVA sobre os trilhos dos manipuladores.	78
Figura 45 – Esquema de fixação do arame nos manipuladores.	79
Figura 46 – Esquema do experimento para medição da velocidade dos manipuladores.	80
Figura 47 – Diagrama de blocos para controle dos eixos em malha fechada.	82
Figura 48 – Representação esquemática do efeito da força de uma mola, sobre a folga no conjunto pinhão e cremalheira.	83
Figura 49 – Esquema de posicionamento do sensor linear para teste no eixo Y.	83
Figura 50 – Bancada experimental adotada para os ensaios de soldagem preliminares, onde: 1 – Fonte de soldagem IMC Digiplus A7; 2 – Robô antropomórfico de 6 eixos MOTOMAN HP20D; 3 – Mesa Rotativa MOTOPOS com 2 eixos; 4 – Unidade de controle do manipulado Modelo DX100; 5 – Pendant NX 100; 6 – Tocha MIG Semiautomática TBI; 7 – Cilindro de gás de proteção com mistura de 75% Argônio e 25% de dióxido de carbono (C25).	86
Figura 51 – Representação gráfica da relação entre corrente em função da tensão para o processo CCC.	87
Figura 52 – Detalhe das principais dimensões do modelo de junta utilizado nos experimentos.	88
Figura 53 – Representação da seção transversal de uma passe de raiz e definições das principais geometrias.	90



Figura 54 – Aquisição da posição Y (eixo de oscilação) pela perspectiva do robô e do STL para criação do mapa da trajetória em Y. ....	92
Figura 55 – Mapa Y da junta “bruto” e mapa Y da junta filtrado. ....	93
Figura 56 – Fluxograma da metodologia desenvolvida para compensação dos desvios concernentes ao sistema. ....	94
Figura 57 – Esquema da leitura prévia com a tocha no TCP (Passo 1). 95	95
Figura 58 – Esquema da leitura prévia com a STL no TCP (Passo 2). . 96	96
Figura 59 – Exemplo genérico da geração da curva de erro para do mapa Y da trajetória do manipulador (Passo 3). ....	97
Figura 60 – Etapa final do método de soldagem adaptativa com leitura prévia para compensação dos desvios concernentes ao sistema. ....	98
Figura 61 – Representação da bancada de experimentos utilizada para validação do método desenvolvido. ....	99
Figura 62 – Gráficos das folgas no eixo Y para o curso mínimo. ....	101
Figura 63 – Gráficos das folgas no eixo Y para o curso médio (região de operação). ....	102
Figura 64 – Gráficos das folgas no eixo Y para o curso máximo. ....	103
Figura 65 – Motor DC PITTMAN GM8224S029 utilizado no eixo Y do Tartilope. ....	104
Figura 66 – Gráficos das folgas no eixo Z para o curso mínimo. ....	105
Figura 67 – Gráficos das folgas no eixo Z para o curso médio (Região de operação). ....	106
Figura 68 – Gráficos das folgas no eixo Z para o curso máximo. ....	107
Figura 69 – Aquisição da velocidade intermediária ao longo do trecho de 0 a 180°. ....	108
Figura 70 – Aquisição da velocidade intermediária ao longo do trecho de 180 a 0°. ....	109
Figura 71 – Aquisição da velocidade máxima ao longo do trecho de 0 a 180°. 110	110
Figura 72 – Aquisição da velocidade máxima ao longo do trecho de 180 a 0°. 111	111
Figura 73 – Aquisição da velocidade máxima do eixo X ao longo do trecho de 0 a 180° para o Tartilope V3. ....	112
Figura 74 – Aquisição da velocidade máxima do eixo X ao longo do trecho de 180 a 0° para o Tartilope V3. ....	112
Figura 75 – Painel de Controle e <i>Joystick</i> do sistema Pipeliner II da Magnatec. ....	115
Figura 76 – Representação de uma folga em um conjunto de engrenagens de dentes retos. ....	117

Figura 77 – Gráfico de amplitude programa e amplitude executada pelo eixo Y, para uma frequência de 1 Hz, amplitude de 2 mm e tempo de parada de 0,3 ms.....	118
Figura 78 – Representação do efeito das imperfeições do trilho sobre a posição do TCP da tocha de soldagem. ....	120
Figura 79 – Representação do efeito da flexão sobre o trilho junto a trajetória corrigida.....	121
Figura 80 – Representação do efeito da torção no trilho, junto a sua correção.....	122
Figura 81 – Representação dos desvios gerados na leitura do sensor devido ao trilho.....	124
Figura 82 – Representação em CAD da alteração realizada na aleta para acoplamento do sensor Laser.....	128
Figura 83 – Representação em CAD do suporte montado ao STL. ....	129
Figura 84 – Representação em CAD da peça de ajuste do TCP.....	130
Figura 85 – Representação em CAD da peça de acoplamento montada ao conjunto Tocha/Laser.....	130
Figura 86 – Representação em CAD da montagem do conjunto Tocha/Laser.....	131
Figura 87 – Vista explodida do suporte do mangote.....	132
Figura 88 – Aparência final do manipulador após a montagem dos acessórios (Tocha, STL, Suporte da tocha e do mangote).....	133
Figura 89 – Esquema de posicionamento da mola no manipulador para limitação da folga em Y.....	134
Figura 90 – Gráficos da posição em Y com e sem a mola para a limitação da folga.....	135
Figura 91 – Representação das regiões de corrente do formato de onda típico do processo CCC.....	136
Figura 92 – Esquema de leitura de tensão pelo algoritmo de controle da versão CCC do processo MIG.....	138
Figura 93 – Oscilograma do processo CCC descrito por Kindermann [6] (Parâmetro de menor energia).....	140
Figura 94 – Imagens referentes a aquisição via filmagem em alta velocidade do fenômeno de oscilação da poça de fusão e curto-circuito prematuro, para o parâmetro de menor energia.....	142
Figura 95 – Potência instantânea do parâmetro de menor energia.....	143
Figura 96 – Ciclograma do conjunto de parâmetros do formato de onda de menor energia descrito por Kindermann [6].....	144
Figura 97 – Histograma de tempo de permanência em curto para o parâmetro de menor energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos.....	145

Figura 98 – Histograma de tempo de permanecia com arco aceso para o parâmetro de menor energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos. ....	146
Figura 99 – Oscilograma do formato de onda de menor energia após as melhorias. ....	147
Figura 100 – Potência instantânea do parâmetro de menor energia após as modificações. ....	148
Figura 101 – Ciclograma referente ao conjunto de parâmetros de menor energia após a melhoria. ....	149
Figura 102 – Histograma de tempo de permanecia em curto para o parâmetro de menor energia após as correções, para um período de 10 segundos. ....	150
Figura 103 – Histograma de tempo de permanecia com arco aceso para o parâmetro de menor energia após as correções, para um período de 10 segundos. ....	151
Figura 104 – Comparação entre as frequências de destacamento antes e depois das melhorias realizadas no parâmetro de menor energia. ....	152
Figura 105 – Oscilograma do processo CCC descrito por Kindermann [6] (Parâmetro de maior energia). ....	153
Figura 106 – Imagens referentes a aquisição via filmagem em alta velocidade do fenômeno de oscilação da poça de fusão e curto-circuito prematuro, para o parâmetro de maior energia. ....	155
Figura 107 – Potência instantânea do parâmetro de maior energia. ....	157
Figura 108 – Ciclograma do conjunto de parâmetros do formato de onda de maior energia descrito por Kindermann [6]. ....	157
Figura 109 – Histograma de tempo de permanecia em curto para o parâmetro de maior energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos. ....	158
Figura 110 – Histograma de tempo de permanecia com arco aceso para o parâmetro de maior energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos. ....	159
Figura 111 – Comparação entre os diâmetros de gota, antes e depois da modificação do formato de onda. ....	160
Figura 112 – Oscilograma do formato de onda de maior energia após as melhorias. ....	161
Figura 113 – Potência instantânea para o parâmetros de maior energia após as modificações. ....	162
Figura 114 – Ciclograma referente ao conjunto de parâmetros de maior energia após a melhoria. ....	162

Figura 115 – Histograma de tempo de permanência em curto para o parâmetro de maior energia após as correções, para um período de 10 segundos. ....	163
Figura 116 – Histograma de tempo de permanência com arco aceso para o parâmetro de maior energia após as correções, para um período de 10 segundos. ....	164
Figura 117 – Comparação entre as frequências de destacamento antes e depois das melhorias realizadas no parâmetro de maior energia.....	165
Figura 118 – Resultados para os ensaios na posição plana. ....	167
Figura 119 – Macrografias para a posição plana. ....	168
Figura 120 – Resultados dos ensaios não destrutivos de raios-x para a posição plana. ....	169
Figura 121 – Resultados para os ensaios na vertical descendente.....	170
Figura 122 – Macrografias para a posição vertical descendente. ....	171
Figura 123 – Resultados dos ensaios não destrutivos de raios-x para a posição vertical descendente, com detalhe a leve concavidade na raiz.	172
Figura 124 – Resultados para os ensaios na posição sobre-cabeça. ....	173
Figura 125 – Macrografias para a posição sobre-cabeça.....	174
Figura 126 – Resultados dos ensaios não destrutivos de raios-x para a posição sobre-cabeça.....	175
Figura 127 – Tela inicial da plataforma de controle adaptativo. ....	177
Figura 128 – Aquisição dos mapas de deslocamento em Y para uma junta tubular.....	178
Figura 129 – Aquisição dos mapas de deslocamento em Z para uma junta tubular.....	179
Figura 130 – Erro Absoluto entre os mapas do eixo Y e Z. ....	181
Figura 131 – Comparação entre os mapas Y e Z com o método com e sem leitura prévia. ....	182
Figura 132 – Teste utilizando o método sem leitura prévia com detalhe aos defeitos constatados. ....	183
Figura 133 – Corpo de prova 1 da matriz de ensaios com solda. ....	184
Figura 134 – Corpo de prova 2 da matriz de ensaios com solda. ....	185
Figura 135 – Variação do Gap do corpo de prova 1. ....	187
Figura 136 – Variação do Gap do corpo de prova 2. ....	187



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de dois modelos comerciais de sensores de triangulação Laser [30] [37].	60
Tabela 2 – Lista de equipamento que compõem o sistema de aquisição de imagens em alta velocidade IDT [41], adaptado de Marques [42].	85
Tabela 3 – Conjunto de ensaios realizados para qualificação dos parâmetros de soldagem quanto a defeitos.	89
Tabela 4 – Modelos de tochas selecionados para o possível uso na soldagem orbital adaptativa [48] [49] [50].	127
Tabela 5 – Variáveis elétricas descritas por Kindermann [6] para o processo CCC.	137
Tabela 6 – Variáveis elétricas para o parâmetro de menor energia com destaque aos parâmetros alterados	146
Tabela 7 – Variáveis elétricas para o parâmetro de maior energia com destaque aos parâmetros alterados	159
Tabela 8 – Banco de dados para os parâmetros de movimentação descritos por [6].	166
Tabela 9 – Parâmetros de movimentação da tocha de soldagem para a posição plana	166
Tabela 10 – Parâmetros de movimentação da tocha de soldagem para a posição vertical descendente.	169
Tabela 11 – Parâmetros de movimentação da tocha de soldagem para a posição sobre-cabeça.	172
Tabela 12 – Parâmetros de movimentação atualizados.	175
Tabela 13 – Relação <i>Gap</i> e erro percentual permissível para raiz adequada.	180
Tabela 14 – Limites de referência para o reforço da raiz (mm).	186
Tabela 15 – Medições do reforço e concavidade da raiz (mm).	186



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

STL	Sensor de triangulação Laser
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission
TCP	Tool center point
CCC	Curto-circuito controlado
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
STT	Surface Tension Transfer
CMT	Cold Metal Transfer
MRR	Módulo de Redução de respingos
FCAW	Fluxed Core Arc Welding
SPS	Sistema e processos de soldagem
DBCP	Distância bico de contato peça
CMOS	Complementary Metal-oxide-semiconductor
CCD	Charge Coupled Device
TP	Tracking point
V <sub>s</sub>	Velocidade de soldagem
Amp	Amplitude
tp	Tempo de parada
Freq	Frequência de tecimento
PCA	Plataforma de controle adaptativo
SAP	Sistema de aquisição portátil
MVA	Medidor de velocidade de arame
U <sub>cc</sub> /U <sub>r</sub>	Referência de tensão de curto-circuito
KR	Coefficiente de destacamento





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>31</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>32</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E BASES TECNOLÓGICAS.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1</b>	<b>Fundamentos da soldagem MIG/MAG convencional e variante moderna.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2</b>	<b>Conceitos fundamentais sobre a soldagem orbital.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3</b>	<b>Estado da arte de alguns modelos de manipuladores comerciais para soldagem MIG/MAG orbital.....</b>	<b>45</b>
<b>2.4</b>	<b>Soldagem orbital adaptativa.....</b>	<b>50</b>
2.4.1	Sensoriamento baseado no processo de soldagem.....	51
2.4.2	Sensores baseados na geometria da peça.....	53
<b>2.5</b>	<b>Antecedentes.....</b>	<b>62</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>73</b>
<b>3.1</b>	<b>Análise das folgas e velocidades dos manipuladores Tartilope e Pipeliner II.....</b>	<b>74</b>
<b>3.2</b>	<b>Adequações físicas realizadas no sistema Tartilope V3 para soldagem orbital adaptativa.....</b>	<b>81</b>
3.2.1	Seleção da tocha de soldagem e criação mecanismos para acoplamento dos periféricos destinados à soldagem adaptativa.....	81
3.2.2	Ação corretiva para limitação da folga.....	81
3.2.3	Critérios para quantificação e qualificação dos parâmetros de soldagem quanto à estabilidade e qualidade.....	84
<b>3.3</b>	<b>Adequação dos algoritmos existentes para soldagem adaptativa com o Tartilope V3.....</b>	<b>91</b>
3.3.1	Algoritmo de seguimento de junta.....	91
3.3.1.1	Mapa da junta.....	91
3.3.1.2	Método de leitura prévia no TCP.....	94
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>100</b>
<b>4.1</b>	<b>Referente à análise das folgas e velocidades dos manipuladores Tartilope e Pipeliner II.....</b>	<b>100</b>
4.1.1	Resultados quanto à análise das Folgas dos manipuladores.....	100
4.1.2	Resultados quanto a análise das velocidades dos manipuladores disponíveis para soldagem orbital.....	108
<b>4.2</b>	<b>Sobre os problemas mecânicos concernentes aos manipuladores de soldagem orbital.....</b>	<b>116</b>
4.2.1	A respeito da Folga.....	116
4.2.2	A respeito dos desvios gerados pelo trilho.....	119

<b>4.3</b>	<b>Adequações físicas realizadas no Tartilope V3.....</b>	<b>125</b>
4.3.1	Resultados quanto à seleção da tocha e criação do mecanismo para acoplamento dos periféricos.....	125
4.3.2	Resultados quanto a ação corretiva para limitação da folga no eixo Y do manipulador.....	133
<b>4.4</b>	<b>Critérios de avaliação e qualificação dos parâmetros de soldagem</b>	<b>136</b>
4.4.1	Parâmetro de menor energia.....	140
4.4.2	Parâmetro de maior energia.....	153
4.4.3	Parâmetros de movimentação.....	166
<b>4.5</b>	<b>Validação do método de leitura prévia.....</b>	<b>176</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>188</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>188</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>190</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>191</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos com o crescimento da demanda de uso de dutovias em função do aumento da produção de petróleo no Brasil, este segundo o relatório publicado em maio de 2018, o qual prevê a implementação de novos investimentos na exploração e produção de óleo e gás a fim de atingir a produção de 4,4 e 5,4 milhões de bopd (barris de petróleo por dia), na média, entre 2020 e 2030 [1]. Com isto, se tem a expectativa da criação de novas linhas dutoviárias e manutenção das existentes, onde para consecução destas obras, há necessidade de se melhorar o processo de manufatura atual, tanto em qualidade quanto em tempo de construção.

Um dos gargalos da montagem de dutovias é o processo de soldagem destes tubos, que são realizados em maioria de forma manual e em alguns casos semiautomatizado [2].

Os processos de soldagem são largamente utilizados na construção de dutovias para transporte de fluidos, o que fomenta a pesquisa em diversos campos do conhecimento, sendo alguns deles, a melhoria dos processos de soldagem quanto ao controle e manutenção da transferência metálica e aporte de energia, desenvolvimento de técnicas e equipamentos para minimizar descontinuidades, além de melhorar a produtividade e a repetibilidade dos mesmos [3].

Na construção de sistemas dutoviários cada empreiteira concorre de forma agressiva, tanto em seus cronogramas, quanto nos preços, desta forma, exige-se demasiadamente eficiência da mão de obra, que em função dos prazos inicialmente estabelecidos é compelida a jornadas longas de trabalho. Neste sentido há uma fomento pela pesquisa e implementação da utilização de sistemas de soldagem automatizados, para aprimorar a produtividade e a repetibilidade, onde se minimizaria a influência do operador sobre o processo de soldagem [4].

A automatização dos processos de fabricação por soldagem segue como tendência desde o seu surgimento, pois estes processos configuram operações de caráter insalubre, oferecendo risco e desgaste à mão de obra, além de necessitarem de repetibilidade para assegurar determinada qualidade. Devido ao avanço tecnológico gerado nos últimos anos, as operações de soldagem tendem cada vez mais a alocar à máquina as responsabilidades de movimentação da tocha e reação às características dinâmicas da poça de soldagem. Entretanto, mesmo com mecanização dos processos, ou seja, a inserção de manipuladores

robóticos, ainda há necessidade da interferência humana para funcionamento adequado do equipamento [5] [6] [7].

Para que o procedimento não seja realizado em dependência das habilidades do soldador, é necessário emular não somente seus movimentos como também seus sentidos e expertise. Para isso, o uso de sensores e de equipamentos com precisão, repetibilidade e inteligência agregada é indispensável. Os avanços tecnológicos nessa área permitem aos processos se tornar adaptáveis às condições adversas que venham a ser encontradas durante a operação de soldagem, conferindo robustez aos mesmos.

As soluções comerciais para automação da soldagem orbital enfrentam algumas dificuldades, como as distorções geradas na etapa de preparação da junta, resultantes da usinagem do chanfro ou da montagem da junta, refletindo em variações na posição e abertura da junta, na concentricidade/ovalizações, que podem gerar descontinuidades como o *high-low*, representado na Figura 1. Estas distorções afetam a estabilidade do processo de soldagem e posição da tocha, que não podem ser mantidos constantes ao longo da seção de interesse do tubo [5].

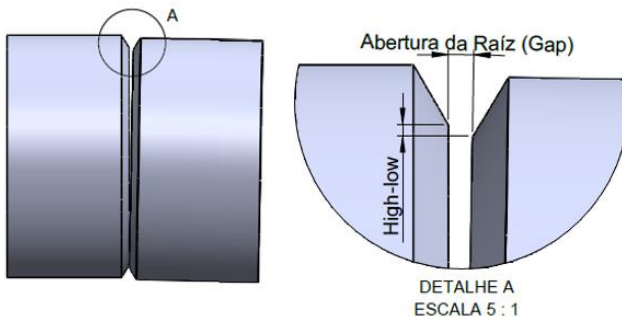


Figura 1 – Representação da montagem do tubo com distorções.

Na soldagem adaptativa orbital é necessário além do controle dos parâmetros de soldagem, o controle da posição da tocha de soldagem, pois como visto, há uma influência direta do meio (descontinuidades no duto e no posicionamento do manipulador), o que aumenta a dificuldade de criar um algoritmo de controle efetivo, principalmente para a soldagem do passe de raiz, o qual dita a velocidade de construção de uma dutovia, devido ao grau de confiabilidade requerido [8].

Em maioria, nos manipuladores para soldagem orbital, os cabeçotes deslocam-se sobre trilhos que por sua vez estão acoplados de

forma concêntrica ao tubo. Os primeiros estão sujeitos às deformações advindas dos segundos, que geram variações na posição da tocha em relação ao centro da junta. Junto destas deformações os manipuladores podem apresentar problemas concernentes à parte mecânica do manipulador, como folgas em seus eixos, distorções no trilho, dentre outras que aumentam a dificuldade de automatização dos mesmos.

Frente a tais perturbações, para auxiliar na automação de sistemas de soldagem são utilizados sensores de visão, geralmente sensores de triangulação laser (STL). Para a utilização destes sensores é necessário deslocá-lo a uma certa distância da tocha de soldagem (região do arco), pois a elevada emissão luminosa do arco afeta a leitura deste sensor, essa defasagem pode ser chamada de *offset*.

Neste sentido, algumas tecnologias vêm sendo exploradas, exemplo disto, estão os trabalhos de Viviani [9] e Kindermann [6], qual concentraram-se em criar protocolos de comunicação entre fonte de soldagem, manipulador robótico, por meio de um algoritmo, os quais são continuamente realimentados por um sistema de visão, este um STL. Que fornece informações quanto a geometria do chanfro e associado a informação de posição fornecida pelo manipulador, concatena a possibilidade de atuar sobre o processo de forma a torná-lo, em função destas variáveis, adaptativo.

Nos sistemas de soldagem orbital que se deslocam sobre trilho devido aos desvios citados, associados a defasagem da Tocha/STL se tem uma variação da posição instantânea da tocha em relação ao STL, o que gera um erro da posição registrada *a priori* pelo STL em relação a posição em que a tocha deveria estar de fato, gerando assim inconsistências na correção de trajetória do sistema. Neste sentido, ainda se tem a necessidade de consolidar o processo de automação desta prática, tanto explorando as possibilidades de hardware como as de software, agregando tanto confiabilidade mecânica como algoritmos inteligentes para a condicionamento e tratamento dos dados.

## 1.1 Objetivo geral

Com base no problema apresentado, o objetivo deste trabalho é aprimorar a robustez de um sistema de soldagem orbital adaptativo existente, via adequações mecânicas, desenvolvimento de técnicas de operação e atualização dos algoritmos de correção. Visa-se, assim, maior confiabilidade do posicionamento do ponto central da ferramenta (TCP) na soldagem orbital adaptativa.

## 1.2 Objetivos específicos

Para consecução do objetivo geral, deve-se atender alguns objetivos específicos, sendo estes:

- Caracterizar inconsistências mecânicas em equipamentos de soldagem orbital, considerando o sistema a ser desenvolvido, Tartilope V3, além de um sistema comercial importado.
- Desenvolver dispositivos mecânicos que satisfaçam melhorias operacionais e de desempenho identificadas.
- Criar metodologia de leitura prévia com o sensor Laser no TCP para eliminar o efeito de retroação advinda de irregularidades e imperfeições no trilho e assim compensa-las para auxiliar a correção *online* da trajetória;
- Revalidação dos parâmetros de soldagem utilizados por Kindermann [6] com a variante CCC do processo MIG/MAG, utilizando mistura C25 (25% CO<sub>2</sub> em argônio) como gás de proteção e chanfro tipo V com 60° de abertura, verificando a estabilidade dos mesmos para diferentes aberturas da raiz (*gap*) e posições;
- Validação das metodologias e dos novos componentes do sistema, através da soldagem da raiz de corpos de prova tubulares com chanfro em V com 60°.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E BASES TECNOLÓGICAS

### 2.1 Fundamentos da soldagem MIG/MAG convencional e variante moderna

A soldagem MIG/MAG, segundo [10] é um processo que mantém geração de calor a partir de um arco elétrico gerado pela ionização de um gás de proteção por meio de uma fonte de tensão, no caso do processo convencional. O arco é gerado entre um arame consumível (polo positivo) alimentado continuamente e a peça a soldar (polo negativo), como mostra o esquema da Figura 2.

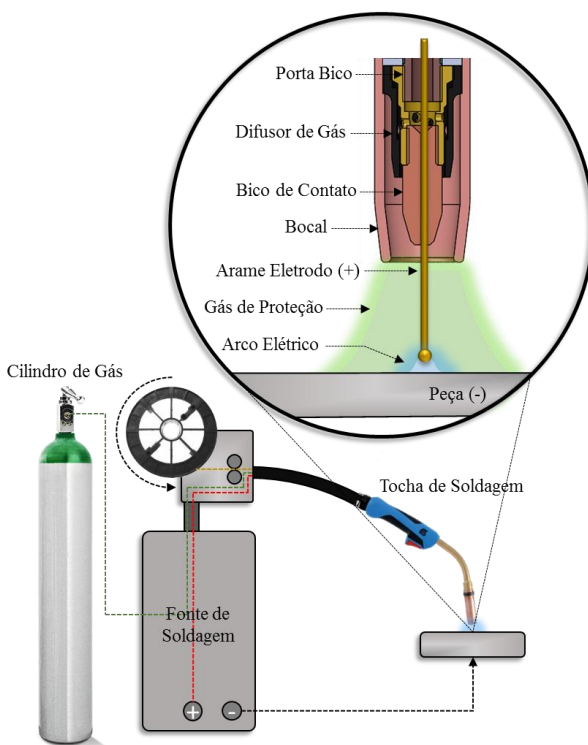


Figura 2 – Esquema básico de um sistema MIG/MAG.

Este processo divide-se entre MIG e MAG, onde MIG (*metal inert gas*) se caracteriza pela utilização de um gás inerte para a soldagem, como Ar e He e MAG (*metal active gas*) pela utilização de

um gás ativo, utilizando como gás de proteção CO<sub>2</sub> puro ou misturas do mesmo. Além do CO<sub>2</sub> pode-se usar O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>.

No processo MIG/MAG convencional, com curto-circuito, quando a transferência metálica ocorre por curto-circuito, caracterizando-se pelo contato entre a gota líquida formada na extremidade do arame eletrodo com a poça de fusão. Sabe-se que quando se tem a passagem de carga através de um condutor, gera-se um campo magnético em torno do mesmo, o que causa a formação de forças perpendiculares a este, direcionadas para o centro do condutor, sendo esta, conhecida como forças de Lorentz.

Este fenômeno físico corrobora para a constrição da região de acoplamento entre a gota e o arame-eletrodo; que é chamado de efeito *pinch*. A constrição ocorre progressivamente até o colapso da ponte metálica e separação da gota e do arame eletrodo, como mostra os *frames* 3 e 4 da Figura 3. Imediatamente após esse evento ocorre a reabertura do arco elétrico, que por sua vez ocorre em uma corrente elevada, o qual gera a emissão de respingos e fumos metálicos, assim como mostra o *frame* 4 da Figura 3. Este modo de transferência é exemplificado detalhadamente explicado em outros trabalhos, sendo bastante explorados por Scotti [10] e Silva [11].

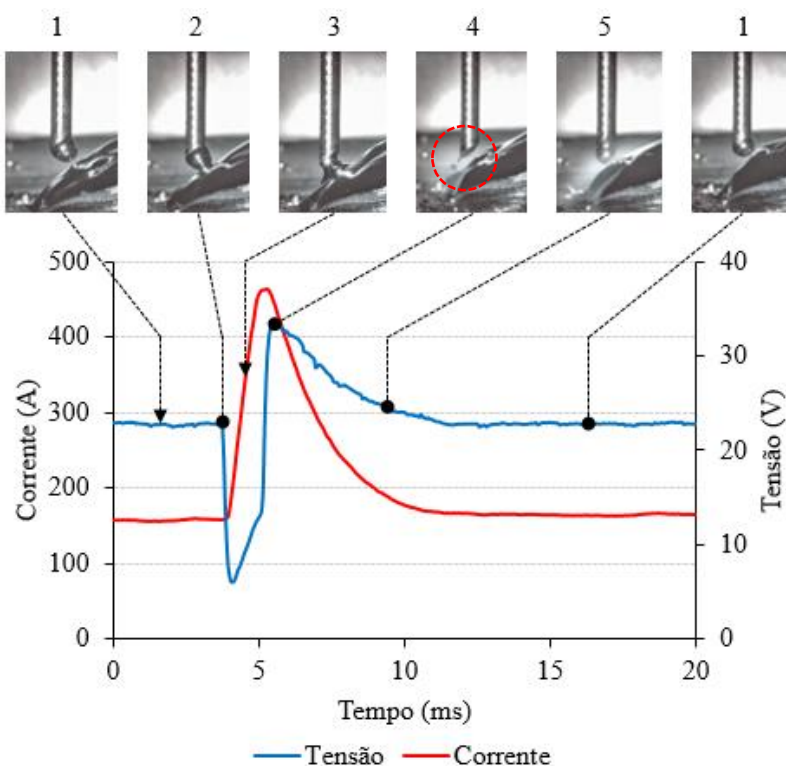


Figura 3 – Oscilograma da corrente e tensão do processo MIG/MAG convencional e filmagem de alta velocidade da transferência metálica.

Na soldagem de dutos, embora existam diversos processos de soldagem, o processo de MIG/MAG é o processo por eletrodo revestido é o mais aplicado e, em segundo lugar, o processo MIG/MAG devido a sua alta taxa de deposição [12]. Por conta das vantagens do MIG/MAG [11], diversas empresas e institutos de soldagem fomentam pesquisas a fim de desenvolver melhorias neste processo, visando maior eficiência, robustez e qualidade dos mesmos.

No escopo de pesquisas que fomentam o desenvolvimento de novos métodos de soldagem MIG/MAG, foram desenvolvidas variantes que possibilitam o controle da transferência metálica e seu aporte térmico, por meio da corrente elétrica. Neste contexto tem-se o processo CCC (Curto-Circuito Controlado) da empresa IMC no Brasil, o processo STT (*Surface Tension Transfer*) da empresa *Lincoln Electric* nos EUA, o RMD (*Regulated Metal Deposition*) da empresa Miller também dos

EUA, o CMT (*Cold Metal Transfer*) da empresa Fronius na Áustria e além destas há outras variantes deste mesmo processo, porém com nomes comerciais diversos, mas com o mesmo intuito, controlar a transferência metálica.

Neste trabalho concentrou-se na utilização da variante CCC do processo MIG/MAG, pelo fato da empresa IMC ser uma marca nacional e diferente das demais empresas fornece fontes com acesso e regulação de todos os parâmetros de soldagem, o que possibilita total flexibilidade e utilização de conjuntos de parâmetros personalizados.

A versão do CCC do processo MIG/MAG como o nome sugere controlar a corrente elétrica durante todo processo, principalmente durante o contato entre a gota e a poça de fusão para um destacamento suave e sem respingos geralmente causados pelo rompimento abrupto da ponte metálica em altas correntes, como visto anteriormente no processo convencional. O formato de onda característico deste processo e o modo de transferência metálica são exibidos na Figura 4. Detalhes funcionais da forma de onda podem ser encontrados nos trabalhos de Silva [11] e Direne Filho [13], que deram origem às versões mais recentes do processo.

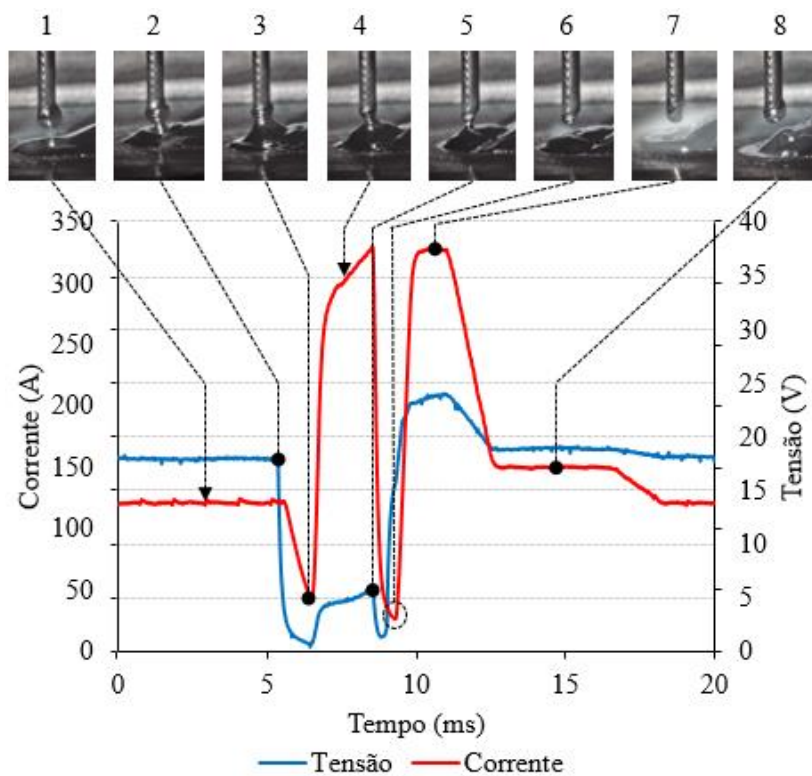


Figura 4 – Oscilograma de corrente e tensão da versão CCC e filmagem de alta velocidade da transferência metálica.

## 2.2 Conceitos fundamentais sobre a soldagem orbital

A soldagem orbital se caracteriza pela trajetória executada pela tocha ao redor dos tubos a serem soldados, sobre a junta formada pelas partes a serem unidas. Para o caso em que os tubos rotacionam, e a tocha permanece parada (não mais “órbita” os tubos), o método é denominado soldagem circunferencial. Quando a tocha orbita o tubo, a designação de posição de soldagem, segundo a norma API 1104 [14], é 5G para os arranjos tradicionais (tubo na posição horizontal e chanfro transversal ao eixo principal do tubo).

A operação de soldagem orbital em campo destina-se em maioria a união de dutos *onshore* (dutos terrestres) e *offshore* (dutos submarinos) para a indústria de petróleo e gás. Este processo de união, tanto em âmbito nacional quanto internacional é realizado de forma manual por meio dos processos TIG e eletrodo revestido, o que gera baixa repetibilidade e taxa de produção, porém no caso do processo TIG se tem uma excelente qualidade com baixo nível de defeitos em relação ao eletrodo revestido, conseqüentemente, menos retrabalho, entretanto, os ciclos de arco aberto, geralmente são mais longos, devido à baixa velocidade de soldagem empregada [2] [15].

Uma das alternativas para aumentar as taxas de repetibilidade e produção, é o emprego de sistemas de soldagem MIG/MAG semiautomatizados, tanto para o passe de raiz quanto para o preenchimento [8] [12] [15].

Entretanto mesmo apresentando maior produtividade em relação aos processos TIG e eletrodo revestido, os processos semiautomatizados que utilizam o processo MIG/MAG, geralmente operam no modo convencional com transferência por curto-circuito e comando de tensão. Essa combinação torna a junta soldada suscetível a descontinuidades (falta de fusão, mordeduras, porosidades, respingos e trincas) e seu emprego no passe de raiz é limitado à utilização de cobre-junta (*Backing*). Este um dispositivo de cobre ou cerâmica colocado internamente na região da raiz para sustentação da poça de fusão, com a finalidade de evitar a perfuração da junta (Figura 5). A perfuração pode ocorrer devido a quantidade excessiva de calor imposta pelo processo e/ou pela posição de soldagem que não favorece a estabilidade da dinâmica (sustentação) da poça [2] [8].

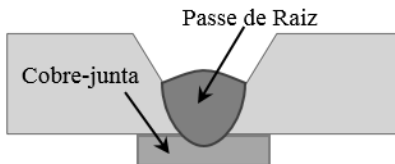


Figura 5 – Representação do posicionamento de um cobre-junta.

O uso de cobre-junta em alguns casos é inviável, devido à dificuldade de acesso ao interior do duto, em função do diâmetro do mesmo ou pela indisponibilidade de um sistema apropriado, também pelos riscos de fragilização do metal de solda pela solubilização do cobre no aço, além de defeitos que podem ser mais expressivos, como por exemplo, porosidades devido ao aprisionamento de gases dentro da poça de fusão, quais podem ser precursores de trincas [6] [8] [16].

No processo de soldagem orbital de dutos terrestres, em geral, a soldagem é realizada na posição horizontal (5G), com a incidência de declives e aclives. A trajetória de soldagem sobre o tubo pode ser dividida em 4 posições, sendo elas: posição plana, vertical descendente, sobre-cabeça e vertical ascendente.

Cada posição apresenta uma peculiaridade em função da força gravidade atuante sobre a poça de fusão ( $\bar{g}$ ), como é mostrado na Figura 6, onde em geral tem-se:

1. Posição plana: A poça de fusão é pressionada para dentro da junta pela força da gravidade.
2. Posição vertical descendente: A poça de fusão formada tem a tendência de escorrer para a frente do arco, no mesmo sentido da direção de soldagem em função da força da gravidade.
3. Posição sobre-cabeça: Contrária a posição plana. Nesta posição, tem-se a força da gravidade pressionando a poça para o exterior da junta.
4. Posição vertical ascendente: Nesta posição tem-se a poça de fusão escoando no sentido oposto ao sentido de soldagem.

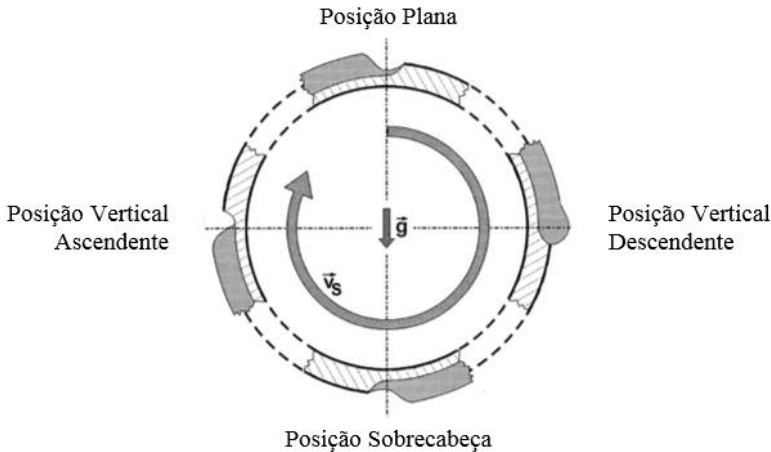


Figura 6 – Divisão das posições de soldagem encontradas para a soldagem orbital, onde:  $\vec{v}_s$  é sentido de soldagem e  $\vec{g}$  a força da gravidade, adaptado do trabalho de Kindermann [6].

Como citado, cada posição apresenta uma particularidade em relação ao efeito da gravidade. Sendo assim, se tem diferentes morfologias dos cordões de solda tanto na face quanto na raiz, além da tendência de variação do perfil de penetração e o surgimento de defeitos característicos de cada posição, como é elucidado na Figura 7.

Na posição plana (Figura 7a) se tem uma tendência a geração de maior penetração por causa da gravidade, que como explicado acima, pressiona a poça para o interior da junta, gerando um reforço que em alguns casos pode ser considerado uma descontinuidade [3].

Na posição vertical descendente a poça de fusão tende a escoar sobre a região do arco elétrico, analogamente como uma gota de água que escorre sobre uma parede, porém ainda assim, se tem uma tendência a cordões convexos na face e, falta de penetração na raiz ou a presença de concavidade excessiva, como mostra a Figura 7b [15] [17] [18].

Na posição sobre-cabeça se tem uma tendência semelhante a posição vertical para formação de cordões convexos, com falta de penetração, fusão e com concavidade excessiva na parte interna da junta (raiz), semelhante ao que é ilustrado na Figura 7c [17] [18].

Em relação a posição vertical ascendente se tem o efeito oposto da vertical descendente, onde observa-se a tendência do arame depositar material em uma região de baixo volume da poça, o que em alguns casos promove a perfuração da mesma [15] [17], além disto, nesta posição se



tem uma suscetibilidade a maior incidência de defeitos como mordeduras, falta de penetração e fusão em relação a vertical descendente [17].

Em geral, na união de tubulações por solda, se realiza a soldagem preferencialmente da posição plana a sobre-cabeça, ou seja, de 0 a 180°. Entretanto é possível realizar a soldagem de forma inversa, sem a presença de defeitos expressivos, no entanto se tem uma perda de produtividade, uma vez que, a velocidade de soldagem e a de alimentação são inferiores as demais posições, comprometendo o tempo de produção além de aumentar a probabilidade de defeitos na junta. Visto isso, neste trabalho foi utilizado a soldagem de 0 a 180° [15] [17] [18] [19].

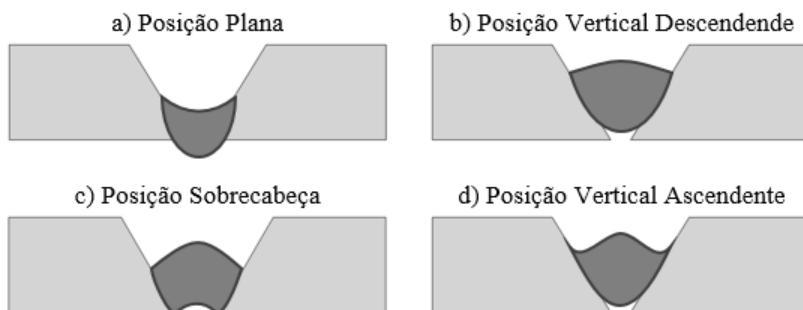


Figura 7 – Representação da variação do perfil de penetração em função do posição de soldagem.

Na soldagem orbital, além da posição de soldagem outras variáveis influenciam sobre o perfil de penetração e na morfologia do cordão de solda.

O alinhamento da junta é crucial, pois um mínimo desalinhamento pode causar falta de fusão e ou penetração das soldas [17] [18], o que é comum em dutos, levando em consideração a dificuldade que se tem ao alinhá-los devido ao seu peso, comprimento total de cada tubo e ovalizações que comprometem sua circularidade. Além deste, outros fatores que influenciam são a abertura da raiz (*gap*) e o tipo de chanfro.

A abertura da raiz influi sobre o perfil de penetração, uma vez que para um determinado parâmetros de soldagem com corrente média igual a X, uma abertura insuficiente, ou seja, pequena ou nenhuma, pode causar falta de penetração, como mostra o esquema da Figura 8a, causando uma redução na resistência da tubulação devido união

defeituosa. Caso a abertura da raiz seja excessiva, acontece o oposto do citado, gerando uma tendência a perfuração da raiz, como mostra a Figura 8c, isso ocorre devido à tensão superficial não conseguir sustentar o próprio peso da poça de fusão. Sendo necessário a parada do processo e execução de reparo na região perfurada.

Para um caso onde a abertura da raiz é adequada tem-se uma penetração suficiente para unir duas ou mais peças que formam a junta (Figura 8b), sem excesso no seu verso e sem defeitos superficiais, estes já citamos anteriormente.

Compreende-se também que pode haver perfurações em *gap* zero e construção de cordões largos entretanto são incomuns, sendo consciente a existência de aberturas de raiz adequadas para a operação, estas dependentes de especificações técnicas associadas ao projeto da junta, ou seja os parâmetros de soldagem.

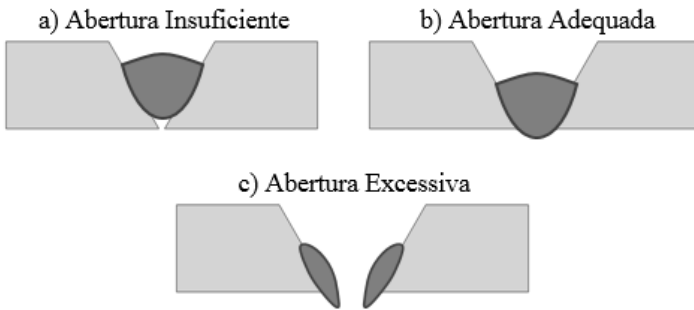


Figura 8 – Representação esquemática do perfil de penetração em função da abertura da raiz.

O formato do chanfro também é uma variável importante para o processo de soldagem, em geral, na soldagem de dutos faz-se o uso de dois tipos, “V” e “U” estes descritos na Figura 9.

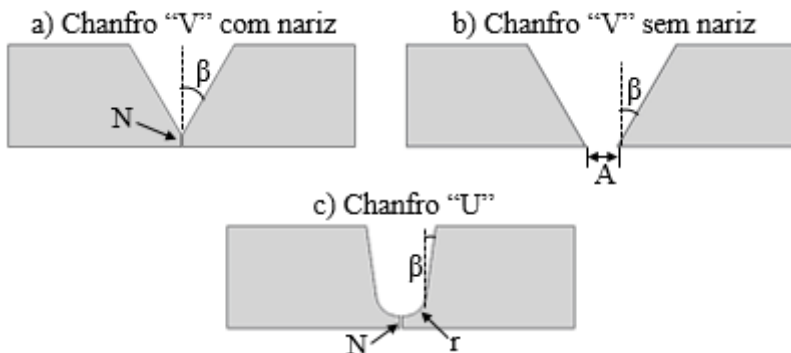


Figura 9 – Representação dos diferentes tipos de junta empregados na união de dutos, onde:  $\beta$  = Ângulo do Bisel; N = Nariz; A = Abertura da Raiz ou *gap*  
r = Raio do Chanfro.

Em comparação com os outros tipos de chanfros, o chanfro tipo "U" possui uma área menor em relação aos demais para espessuras acima de 10 mm, conforme pode-se observar no gráfico da Figura 10, onde se tem a área da seção transversal em função da espessura da parede de um chanfro padrão "U", com ângulo do bisel de  $10^\circ$ , nariz de 1,5 mm e raio do chanfro de 4 mm (Figura 9c) e, em contraponto se tem para os chanfros tipo "V" um ângulo do bisel de  $30^\circ$  (Figura 9b) e o outro além do ângulo um nariz de 1,5 mm (Figura 9a). Esta afirmação é um caso genérico para ilustrar o fenômeno, vide regra geral, pode variar em função das dimensões do chanfro.

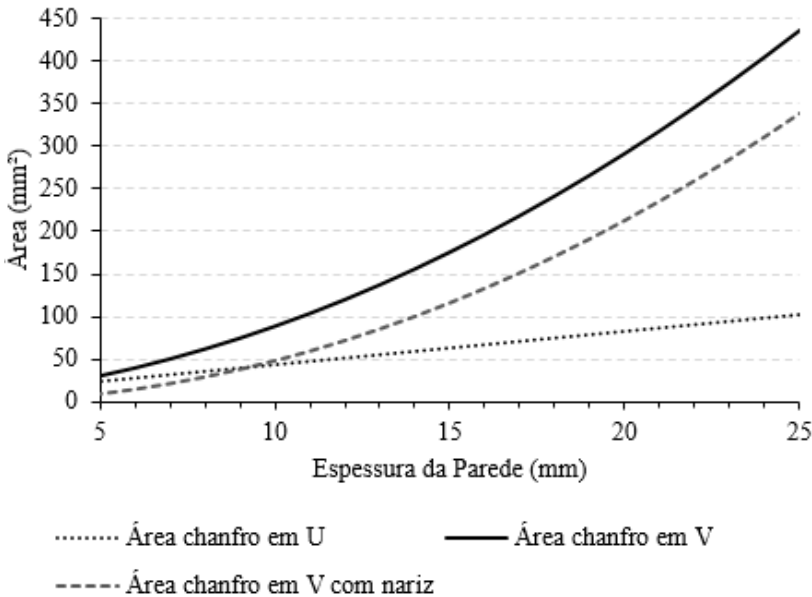


Figura 10 – Variação da área de diferentes juntas em função da espessura da parede.

A utilização do nariz facilita a sustentação da poça de fusão, porém em contrapartida necessita-se de maior quantidade de energia para fundir a porção sólida de material presente no nariz, o que pode aumentar as chances de falta de penetração. Para evitar o problema citado se tem os chanfros sem nariz, que por sua vez possibilitam a união de juntas com menores quantidades de energia (processos mais “frios”).

Porém a quantidade de material depositado tende a ser maior conforme mostra o gráfico da Figura 9, além disto, se tem o risco de perfuração, uma vez que o chanfro pode tender a se abrir e não sustentar a poça, levando em conta processos manuais ou semiautomatizados sem controle de trajetória.

Outro ponto importante é a fabricação destes chanfros, ou seja, sua usinagem, que em geral é feita em campo, por biseladoras hidráulicas. Para chanfros com nariz tanto “U” como “V” a dificuldade em relação aos sem nariz é maior, pois deve-se atentar a manter as dimensões corretas principalmente do nariz o que necessita de ferramentas especiais de usinagem.

Em termos de processo, esse fator se mostra prejudicial e justifica a utilização de chanfros do tipo “V” sem nariz, que tendem a ser mais flexíveis para soldagem podendo ser soldados por diferentes processos [8], além da relativa facilidade para preparação da junta. Neste trabalho dando continuidade aos algoritmos utilizados por Kindermann [6], concentrou-se na utilização do chanfro tipo “V” sem nariz.

### **2.3 Estado da arte de alguns modelos de manipuladores comerciais para soldagem MIG/MAG orbital**

Com o avanço da eletrônica e da robótica determinados projetos puderam ser desenvolvidos, alguns destes destinados a soldagem de tubos em campo de maneira semiautomatizada, ou seja, uma soldagem mecanizada por meio de um manipulador robótico controlado por um operador, que ao invés de soldar manualmente controla a movimentação do mesmo.

A mecanização da soldagem orbital tem sido usada na América do Norte e na Europa na construção de dutovias *onshore* e *offshore* desde a décadas de 1980 [20]. Sendo aplicada no sentido de melhorar os tempos de produção, repetibilidade das operações de soldagem e oferecer um ambiente menos insalubre ao operador. Cabe salientar que este capítulo deteve-se em apresentar um breve histórico de alguns manipuladores utilizados para soldagem orbital com o processo MIG/MAG.

Com a finalidade aumentar a produtividade diversas empresas lançaram no mercado sistemas semiautomatizados para soldagem MIG/MAG de dutos. Em 1988, a empresa Serimax lançou no mercado americano um sistema semiautomatizado para a soldagem de dutos, intitulado Saturnax, este sistema se deslocava ao redor do tubo por meio de um trilho fixado nas proximidades da junta, este possuía duas tochas de soldagem MIG/MAG [21].

A empresa conta com diversos modelos destacando-se o Saturnax 01 para soldagem com arames tubulares auto protegidos FCAW (*Fluxed core arc welding*) (Figura 11a) e o Saturnax 09 (Figura 11b) para soldagem MIG/MAG. Ambos os modelos contam com 3 eixos, sendo estes responsáveis pelo controle manual da altura (Z), oscilação (Y) e deslocamento em torno do duto (X), porém no modelo Saturnax 09 se tem duas tochas, com eixos independentes, possibilitando realizar dois passes de solda simultâneos [22] [23].

Um diferencial do Saturnax 01 é a proximidade entre o rolo de arame e a tocha de soldagem, o que evita problemas como: a parada do

arame, o efeito mola e os desvios do arame sobre a poça gerados em geral pelo atrito do arame com uma longa superfície do condute.

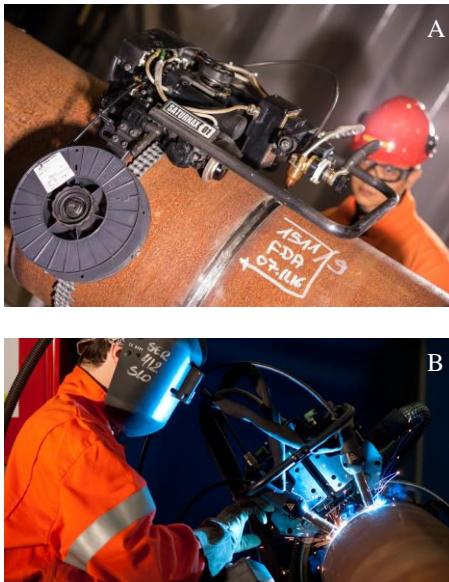


Figura 11 – Modelos comerciais da empresa Serimax, onde A é o Saturnax 01 e B o Saturnax 09.

A empresa americana CRC-Evans, em 1999, incorporou ao mercado um manipulador semiautomático para soldagem orbital de dutos em campo pelo processo MIG/MAG, intitulado P-260. A empresa lançou o sistema em parceria com a fabricante de fontes Miller Electric [19] [24].

O sistema da CRC-Evans, assim como, os modelos da Serimax, possui 3 eixos independentes, para o controle manual da altura, oscilação e deslocamento da tocha em torno do tubo e, deslocando-se sobre trilho flexível acoplado no tubo.

A CRC-Evans possui diversos equipamentos para soldagem de tubulações *onshore* e *offshore*, destacando-se na soldagem orbital com MIG/MAG o modelo P-260 que desde 1999 vem sendo melhorado e o modelo P-625, este com duas tochas de soldagem independentes, similar ao Saturnax 09 da empresa Serimax,, porém igualmente ao Saturnax 01 da serimax o P-260 também utiliza a estratégia de manter um rolo, neste caso menor de 5 kg, próxima a tocha de soldagem, conforme mostra a Figura 12 [24] [25].

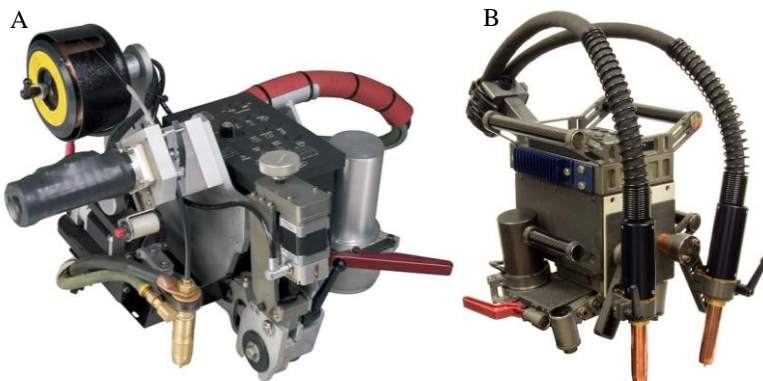


Figura 12 – Modelos comerciais da empresa CRC-Evens, onde A é o P-260 e B o P-625.

A CRC-Evens desenvolveu um sistema incorporando um sensor de triangulação Laser para automatização do processo de soldagem orbital, ou seja, controle da trajetória, parâmetros de soldagem e inspeção de superfície, logo, um sistema teoricamente adaptativo [26]. O sistema integra um sensor Laser da marca Metavision, junto ao manipulador modelo P-625 para a soldagem MIG/MAG, como mostra a Figura 13. Entretanto Rajagopalan [26] não apresenta nenhum resultado sobre o desempenho do equipamento utilizando este sensor na prática.



Figura 13 – Sistema P-625 da CRC-Evens utilizando o sensor de triangulação Laser, Rajagopalan [26].

O sistema Pipeliner II da empresa Magnatech, fabricado sob a mesma ótica dos demais manipuladores, diminuir tempo de produção e, aumentar a repetibilidade, difundiu-se no mercado americano para soldagem orbital em 1999 [27]. O manipulador desloca-se sobre um trilho flexível, possui 3 eixos independentes para controle de altura, oscilação e deslocamento da tocha em torno do duto, possui uma faixa compatibilidade com dutos de 6 até 60 polegadas de diâmetros, onde no conjunto são disponibilizados trilhos com diferentes diâmetros. Junto disto possui uma tocha refrigerada a água o que possibilita operar com correntes de até 300 A e capaz de realizar a soldagem MIG/MAG e FCAW, tanto do passe de raiz como dos passes de enchimento [27] [28].

Este manipulador é comercializado na versão Pipeliner II 609 em conjunto com uma fonte da própria magnatech, diferente do modelo inicial que era compatível com fontes da Lincoln Electric, Miller, Panasonic, OTC e Fronius [27]. O manipulador modelo 609, utiliza um sistema de alimentação de arame do tipo Push-pull com dois conjuntos de tracionadores, onde se tem além do tracionador do cabeçote de alimentação, um conjunto auxiliar de roletes ativos próximo a tocha, o que minimiza significativamente o efeito mola no arame além de sua parada e desvios provenientes do conduíte. A Figura 14 ilustra a aparência do manipulador [28].

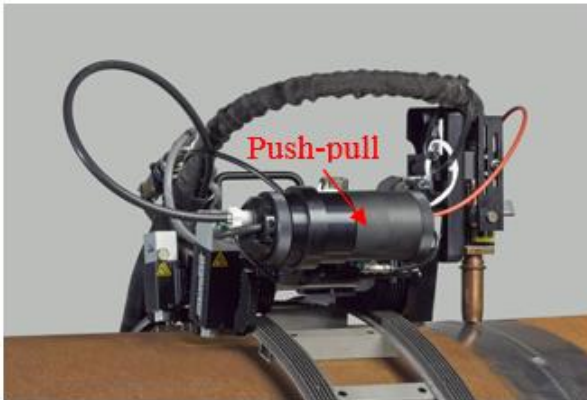


Figura 14 – Manipulador Pipeliner II 609 da empresa Magnatech, com detalhe ao tracionador auxiliar, Maganatec [28].

No Brasil, tem-se a empresa SPS (Sistemas e processos de soldagem) que foi concebida inicialmente no LABSOLDA/UFSC como



empresa incubada e parceira. A SPS surgiu dentro de um contexto amplo, o qual tem como meta global possibilitar a identificação de problemas de soldagem de empresas brasileiras e provê-las com as respectivas soluções, com tecnologia nacional [29].

Os primeiros produtos comerciais foram o Tartílope V2F, que foram desenvolvidos para deslocar-se em trilho planos e similar aos demais manipuladores apresentados são aplicáveis a soldagem orbital, estes sistemas possuíam 2 eixos (XY), sendo um responsável pela oscilação e o outro pelo deslocamento do manipulador sobre o trilho [29].

O sistema orbital conta com um trilho flexível, que pode abranger os dutos de 10 a 20 polegadas de diâmetro. O diferencial deste sistema para os demais manipuladores apresentados, que em maioria são “engessados”, é que este equipamento é aberto, ou seja, possibilita a manipulação de todos os parâmetros e variáveis fugindo das limitações de equipamentos comerciais, além da facilidade comunicar-se e integrar-se com periféricos. Atualmente a SPS além dos modelos Tartílope V2 e V2F, destaca-se para soldagem orbital com o Tartílope V3, descrito na Figura 15 [29].



Figura 15 – Manipulador Tartílope V3 Orbital da empresa SPS.

Estes sistemas segundo os fabricantes prometem auxiliar o processo produtivo para a soldagem orbital de dutos por meio do processo MIG/MAG, aumentando a produtividade e a qualidade das juntas soldadas. Porém, estes sistemas podem apresentar restrições construtivas intrínsecas ao seu projeto. No capítulo 4.2 estão descritos alguns destes problemas que ocorrem e que afetam tanto a premissa levantada pelos fabricantes, a respeito do aumento da qualidade, quanto o controle, uma vez que alguns destes sistemas podem ser integrados a sistemas de sensoriamento para aplicação em tarefas automatizadas.

## 2.4 Soldagem orbital adaptativa

Atualmente, a utilização de sistemas de visão e sensores integrados a manipuladores robóticos com a finalidade de aumentar a robustez dos processos de fabricação é uma tendência, tornando-os adaptáveis a condições de contorno previamente definidas.

Na soldagem orbital adaptativa tem-se a integração entre manipulador, fonte de soldagem e sistema de monitoramento da junta por meio de unidade uma de controle e tratamento dos sinais. Este sistema busca substituir não só a mão do soldador guiando a tocha, como também sua percepção do ambiente de soldagem e capacidade de reação, emulando seus sentidos e expertises, com a finalidade de aumentar a produtividade e a repetibilidade das juntas soldadas. A Figura 16 ilustra um digrama que representa um sistema de soldagem adaptativa.

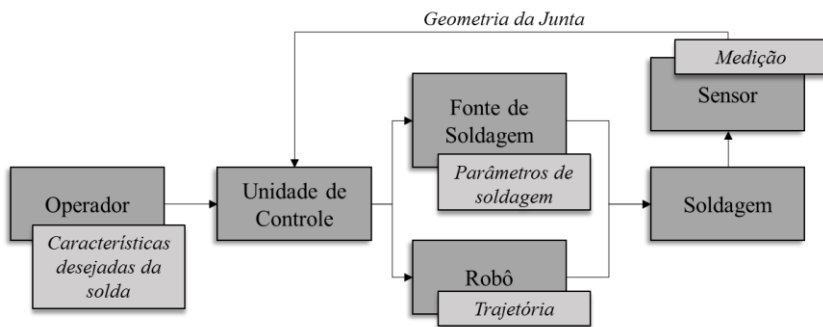


Figura 16 – Representação esquemática do controle adaptativo, adaptado de Bidese [30].

Neste tipo de sistema espera-se o máximo de autonomia, sem influência direta do operador sobre o processo. Assume-se que todas as variáveis de soldagem e posição são controladas por *software* a partir da informação vinda de um sensor. Para a soldagem, os sensores podem ser de dois gêneros: baseados no processo de soldagem e na geometria da peça [31]. A seguir uma breve revisão sobre os principais sensores aplicáveis a soldagem orbital.

#### 2.4.1 Sensoriamento baseado no processo de soldagem

Os sensores baseados no processo de soldagem têm a vantagem que a informação é extraída diretamente do processo, ou seja, o sinal é adquirido por meio das variáveis elétricas (tensão e/ou corrente). Um exemplo disto, é o sistema genericamente chamado de “sensor a arco”.

Esta tecnologia se baseia na leitura da variação da corrente durante a oscilação da tocha de soldagem sobre uma junta, que varia em função da variação da DBCP (Distância bico de contato peça), como mostra a Figura 17.

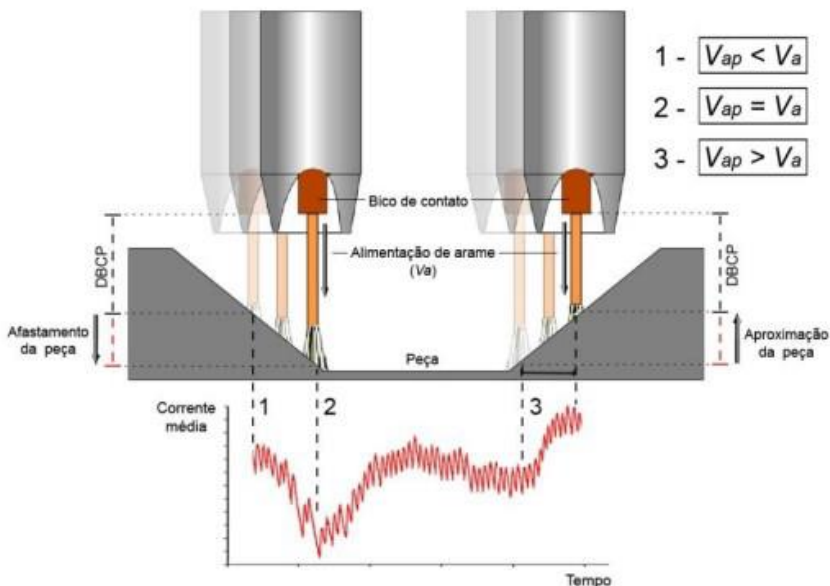


Figura 17 – Esquema da variação da corrente em função da variação de DBCP devido ao movimento oscilatório dentro do chanfro, onde  $V_{ap}$ : velocidade de aproximação da peça e  $v_a$ : velocidade de alimentação [32].

Um exemplo de aplicação deste tipo de monitoramento, foi o estudo de Mendonça [32] feito no LABSOLDA, onde concentrou-se em aumentar o nível de automação de um manipulador Tartflope V2F incrementando o sensoriamento a arco para seguimento de juntas.

O desenvolvimento do algoritmo para o seguimento de junta contemplou técnicas para calibração, gravação e reprodução de trajetórias e, nota-se que as principais desvantagens deste sistema são: o funcionamento exclusivamente para o seguimento de juntas com perfil adequado de chanfro, necessidade de oscilação constante da tocha para funcionamento do seguimento a arco e diminuição da sensibilidade quando a fonte de soldagem atua com comando de corrente e a tensão é a variável de referência [32].

### 2.4.2 Sensores baseados na geometria da peça

Os sensores baseados na geometria da peça podem dividir-se em diversas subáreas, neste trabalho serão apresentados os principais utilizados na soldagem, sendo estes os sensores ópticos, passivo e ativo.

Um sensor é dito ativo quando este possui um emissor e um receptor que detecta esta onda. Já os sensores são ditos passivos quando estes possuem apenas receptores, ou seja, eles não emitem luz, apenas detectam a movimentação desta nas suas áreas de atuação.

Os sistemas de sensoriamento passivo operam por meio de uma câmera (CMOS ou CCD) que monitora diretamente a região de interesse da junta, podendo ser ela, o arco elétrico e/ou a poça de fusão [7] [33]. Tanto o CMOS (*Complementary Metal-oxide-semiconductor*) quanto o CCD (*Charge Coupled Device*) atuam com a finalidade de converter a luz em sinais elétricos, para que por meio de um algoritmo realizarem a medição e localização de pontos de interesse na junta [33], como mostra a Figura 18.

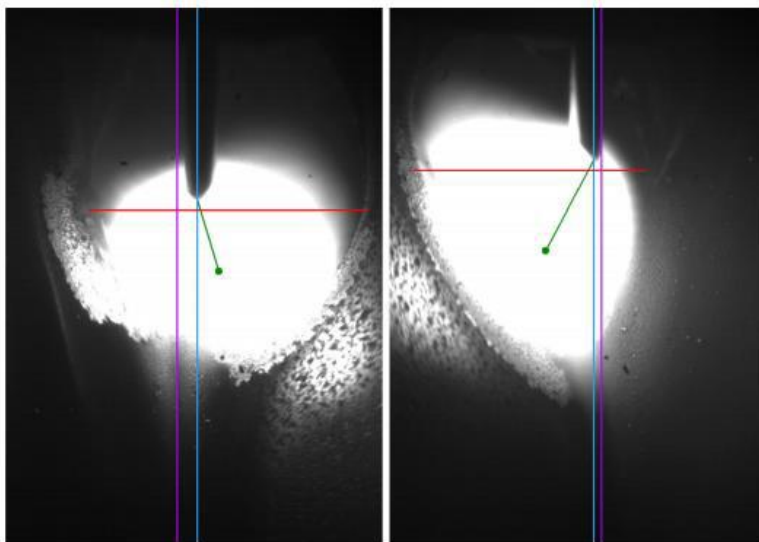


Figura 18 – Características da aquisição de imagens com um sensor óptico passivo: posição do arame (linha azul vertical), posição da junta (linha rosa vertical), largura da poça de fusão (linha vermelha horizontal) e centro do arco calculado (ponto verde) com relação à ponta do arame (linha verde), Reisinger [33].

As desvantagens dos sistemas passivos, para esta aplicação, estão relacionadas com as instabilidades do próprio arco e respingos, tornando difícil o tratamento das imagens, onde há também a necessidade de haver arco para seu funcionamento.

Para tornar os sensores ópticos menos sensíveis à luz do arco, utiliza-se um método de medição indireta da região de interesse, por meio de um feixe Laser em um comprimento de onda diferente do emitido pelo arco elétrico, ou seja, se tem um emissor e um receptor do mesmo comprimento de onda, sendo assim, um sensor ativo.

O método de medição é baseado na triangulação Laser. Este método não se limita apenas a soldagem, podendo ser utilizado em uma vasta gama de aplicações. Na soldagem utiliza-se os sensores ativos integrados a manipuladores robóticos para predeterminação de trajetórias, medições e inspeção de superfícies, fundamentais para controle adaptativo [30].

O princípio da triangulação óptica, dos sensores Laser, se inicia com a projeção da folha de luz por meio de um diodo Laser de baixa potência, geralmente com potências menores que 100 mW, sobre a superfície a ser medida, como mostra a Figura 19. Para obtenção das geometrias é necessário que haja a inclinação ( $\alpha$ ) entre a folha de luz e a câmera, esta defasagem é calculada a partir da trigonometria. A forma obtida na superfície do mensurando é capturada pela câmera e a imagem obtida é então processada [34] [35].

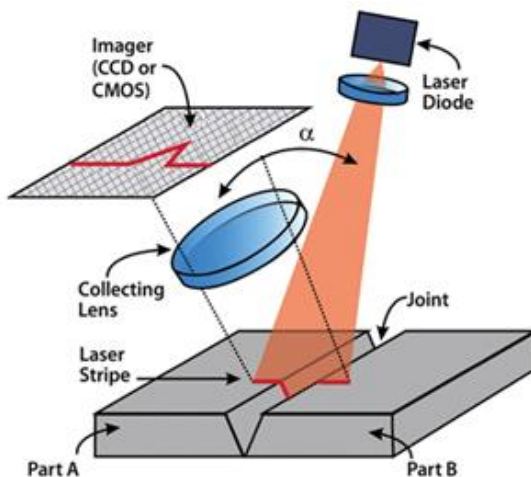


Figura 19 – Representação esquemática do funcionamento de um sensor de triangulação Laser (STL), adaptado de Juneghan [35].

Para correto funcionamento do sensor, o diodo Laser presente no STL precisa operar com emissão luminosa na região de menor intensidade do que é emitido pelo arco elétrico [36]. Na Figura 20 é possível verificar que o espectro de luz emitido pelo arco cobre todo o espectro de luz visível e parte da luz invisível (Infravermelho e Ultra violeta).

A luz emitida pelo arco no espectro da cor vermelha, em transição com o infravermelho, apresenta baixa intensidade, em relação aos demais. Sendo assim, os STLs em grande parte usam essa faixa de emissão para operar junto a solda, utilizando comprimentos de onda na faixa de 625 a 740 nm, porém existem sensores que utilizam o comprimento de onda em outras faixas de emissão, dependendo exclusivamente de sua aplicação.

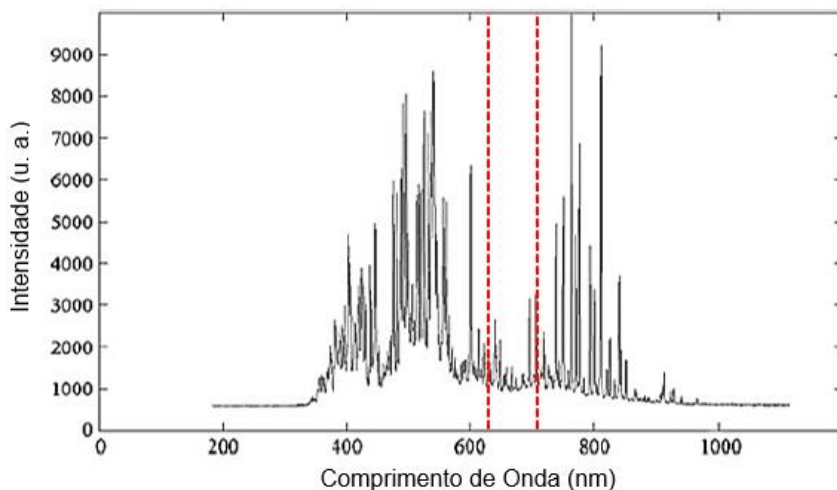


Figura 20 – Espectro de intensidade de radiação emitido por comprimento de onda durante uma soldagem por arco elétrico no processo MIG, adaptado de Ye [36].

Para que a câmera consiga captar apenas o comprimento de onda emitido pelo diodo Laser, o mesmo conta com filtro que permite apenas a passagem do comprimento de onda do emissor Laser semelhante a um filtro passa-faixa, funcionado como o nome sugere, deixando passar apenas uma faixa estreita centrada no comprimento de onda do emissor

Laser, a Figura 21 mostra uma imagem obtida pela câmera do STL Metavision SLS – 050 V1.

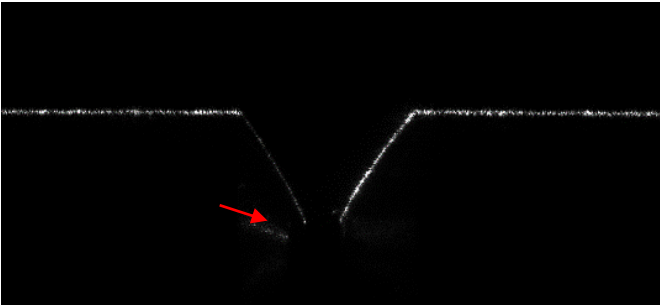


Figura 21 – Aquisição da seção transversal de uma junta tipo V a partir da visão com o filtro passa-faixa do CMOS do STL Metavision SLS – 050 V1, com detalhe em reflexo.

A imagem obtida pela câmera passa por um tratamento, por meio de um algoritmo específico, que a partir da seleção do feita pelo usuário tem função de medir a junta e localizar o TP (*Tracking point*). A Figura 22 ilustra exemplos de perfis pré-programados que estão disponíveis para o STL da Metavision, que auxiliam no pré-processamento da imagem.



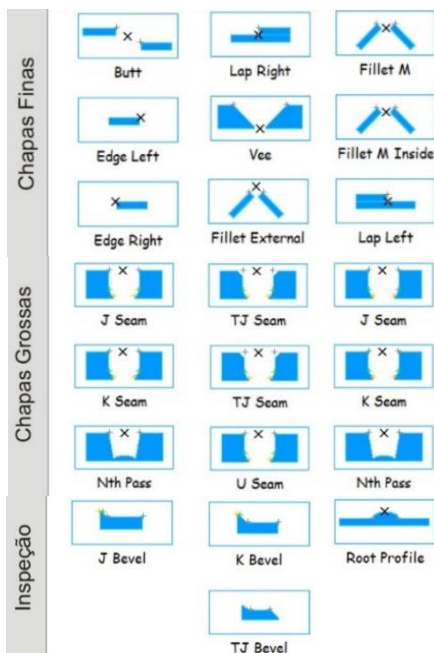


Figura 22 – Exemplos de perfis de junta programados em um STL comercial, Metavision [37].

Após a seleção correta do tipo de junta e definição do local do TCP o algoritmo gera a virtualização do chanfro, conforme mostra a Figura 23.

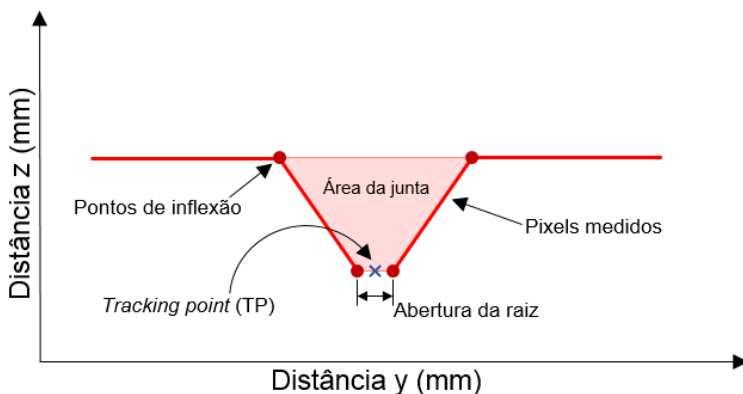


Figura 23 – Exemplo dos principais pontos virtualizados de uma junta tipo V.

A partir da localização dos pontos de inflexão, o *software* calcula a posição ponto central da junta (TP), juntamente com as informações das dimensões da mesma. Com essas informações é possível realizar a predeterminação de uma trajetória de soldagem além da correção online de desvios de posição concernentes ao processo [5] [9] [38]. Além disso abre-se margem para o controle em malha fechada dos parâmetros de soldagem em função das dimensões do chanfro e da posição angular informada pelo manipulador, no caso da soldagem orbital [6].

Nestes tipos de sensores é recomendado pelo fabricante o posicionamento do feixe Laser perpendicular à peça, para que se possa obter corretamente as dimensões da peça. Junto disto necessita-se de uma defasagem entre o sensor e a tocha de soldagem, este nomeado *offset*. Esta defasagem é utilizada para que a luz emitida pelo arco elétrico não afete demasiadamente a leitura da linha Laser pela câmera do STL, pois como visto, a faixa disponível para estes sensores é curta (ver Figura 20) e, mesmo sendo de baixa intensidade ainda sim a luz do arco pode afetar a leitura da linha Laser. O *offset* é representado na Figura 24, onde se tem uma ilustração da disposição da tocha e do sensor acoplados no manipulador.

Quando utilizado o *offset*, realiza-se uma leitura prévia da distância entre a tocha e o laser para que o mesmo compense o atraso gerado pela defasagem. Essa é uma calibração fundamental para o sistema.

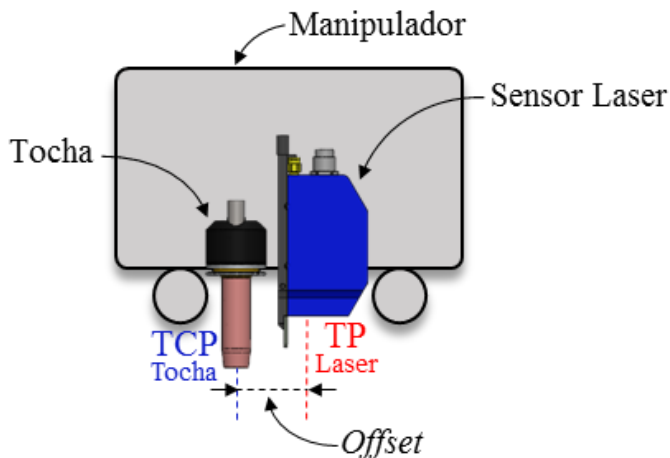




Figura 24 – Esquema de posicionamento do sensor em relação a tocha de soldagem.

No mercado é possível encontrar diversos modelos de sensores de triangulação. Neste capítulo são apresentados dois modelos com aplicação direcionada à soldagem com seguimento de juntas.

Estes sensores foram projetados para suportar o ambiente agressivo da soldagem e possuem mecanismos de dissipação de calor e refrigeração via ar. A Tabela 1 apresenta as especificações metrológicas e dimensionais dos STL.

Tabela 1 – Especificações de dois modelos comerciais de sensores de triangulação Laser [30] [37].

	<b>Sensor Meta Vision</b> Modelo: SLS – 050 V1	<b>Sensor Servo-Robot</b> Modelo: AUTO- TRAC/PWP
		
Campo de visão (mm)	50	76
Profundidade de visão (mm)	70	140
<i>Standoff</i> (mm)	65	70
Resolução Horizontal (mm/pixel)	0,05	0,09
Resolução Vertical (mm/pixel)	0,08	0,05
Taxa de Aquisição (Hz)	30	30
Potência do Laser (mW)	30	~100
Comprimento de onda (nm)	650-699	650-720

Para o melhor entendimento das especificações apresentadas na Tabela 1, tem-se a Figura 25, que apresenta a localização da área “A” de medição do sensor, campo de medição, profundidade de medição e resolução.

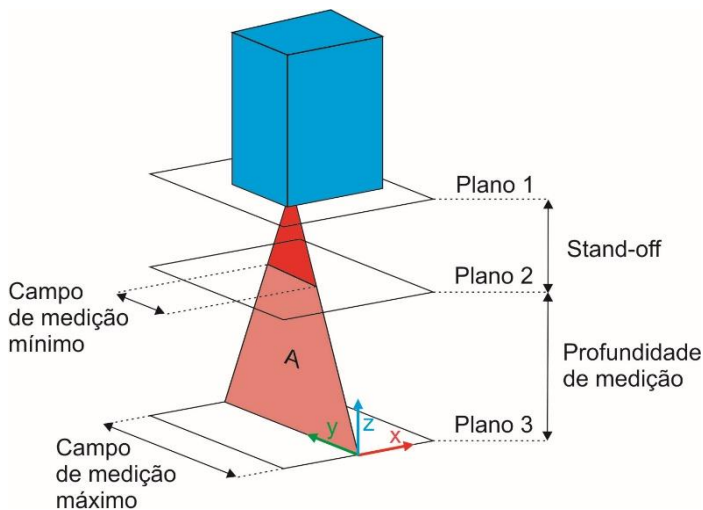


Figura 25 – Representação das regiões de medição de um sensor de triangulação Laser, Bidese [30].

Nota-se que neste mercado há pouca concorrência e, ainda não existe um modelo nacional de STL sendo comercializado, para concorrer com o mercado internacional, isto em tese limita a automação e avanço tecnológico industrial de algumas empresas brasileiras que acabam não investindo em um produto importado, devido ao custo elevado reflexo da tecnologia embarcada ao equipamento e da falta de concorrência.

## 2.5 Antecedentes

O LABSOLDA teve Viviani [9] como precursor no desenvolvimento de um protocolo de comunicação entre um STL da Metavision a um robô para correção de trajetória de soldagem a partir de um TP predeterminado. Em seu estudo foi utilizado um Tartilope V3 na posição plana, como mostra a bancada de ensaios na Figura 26.

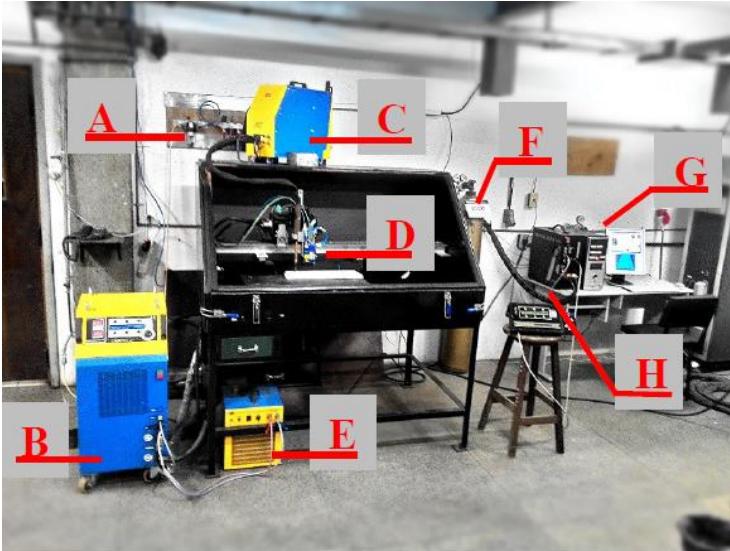


Figura 26 – Bancada de ensaios: (A) Filtros, (B) Fonte de soldagem, (C) Cabeçote alimentador, (D) Robô, tocha, sensor óptico e peça, (E) Trocador de calor, (F) Cilindro de gás, (G) Computador e (H) Controlador do robô e IHM, Viviani [9].

Esta pesquisa concentrou-se em dois modos de controle, sendo eles, com oscilação e sem oscilação da tocha de soldagem, além de testes em vazio e com solda, visando a calibração e a validação do sistema de controle de trajetória [9].

O controle de trajetória utiliza um modelo de junta e TP pré-programado pelo usuário utilizando o software do sensor. A partir da aquisição da localização deste TP o algoritmo criado realiza uma filtragem, que é necessária devido ao nível de ruídos de alta frequência, gerados por interferências adjacentes ao sistema de visão. O método utilizado para a filtragem foi o de Robert Goodell Brown, que se baseia em amortecimento exponencial conhecido como, *exponential*

*smoothing*. Este método é bastante utilizado no processamento de sinais para atenuação de ruídos de alta frequência, atuando como um filtro do tipo RC discretizado, ou seja, um passa-baixa, que adota um fator de amortecimento  $\alpha$  referente à frequência de corte do filtro, como é mostrado pela Equação (1).

$$Leitura_{Filtrada} = \alpha \cdot Leitura_{Atual} + (1 - \alpha) \cdot Leitura_{Filtrada_{anterior}} \quad (1)$$

Este filtro gera um atraso, portanto, deve-se atentar ao valor de  $\alpha$  para que o atraso gerado não comprometa o sinal filtrado.

Para o melhor entendimento tem-se a Figura 27 que ilustra um exemplo prático da utilização do filtro, para atenuação da leitura de um TP pelo sensor laser, onde se tem a leitura recebida do sensor e a leitura filtrada, neste caso foi utilizado um  $\alpha$  de 0,4.

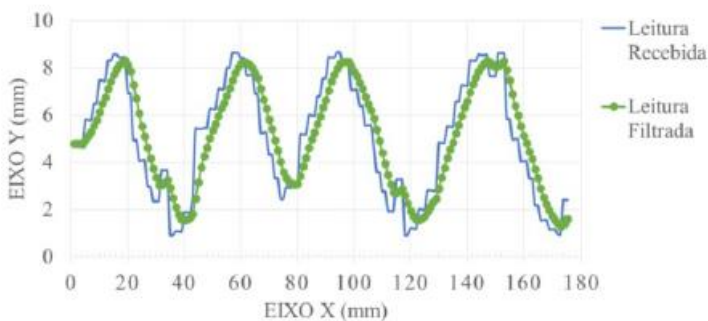


Figura 27 – Gráfico da leitura e filtragem ao longo de um comprimento de junta, Viviani [9].

Para a correção de trajetória com oscilação da tocha utilizou a média dos pontos mais afastados do centro da junta (TP), ou seja, o máximo e o mínimo da amplitude de oscilação [9]. Dessa forma, a trajetória de soldagem é construída dos pontos médios da oscilação da leitura filtrada. A Figura 28 exemplifica a construção da linha central, que contém os pontos de referência utilizados para correção do movimento. Porém este método fica refém da oscilação da tocha e sua frequência, o que limita em alguns casos a eficiência do controle e geração de trajetória.

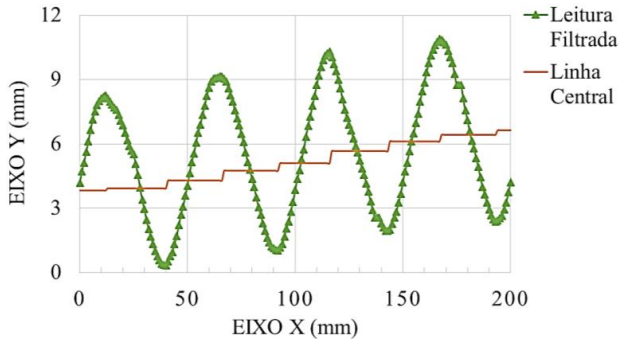


Figura 28 – Gráfico da leitura filtrada e linha central obtida a partir da média, Viviani [9].

Como visto, devido a existência de uma defasagem física entre o centro da linha laser e o centro da ferramenta (*offset*), tem-se a necessidade de realizar um retorno da tocha para leitura desta defasagem, evitando pontos cegos dentro da malha de medição da junta. Para o melhor entendimento desta rotina tem-se a Figura 29, que apresenta passo a passo o retorno, avanço e aquisição da região do *offset*.



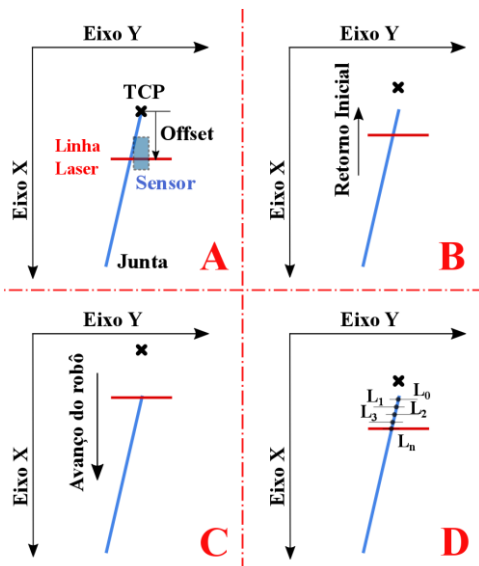


Figura 29 – Esquema de captura do perfil da junta, onde: (A) Posição de início da soldagem; (B) Retorno inicial; (C) Início da medição e localização do TP; (D) Leitura do perfil da junta, Viviani [9].

Para que as rotinas de comunicação dos componentes do sistema de seguimento de junta, associadas aos algoritmos de correção, pudessem ser acompanhadas pelo operador, foi criada uma interface para *software*, este programado em C#, possibilitando de forma intuitiva o controle e monitoramento do sistema. A interface desenvolvida está descrita em detalhes na Figura 30 [9].

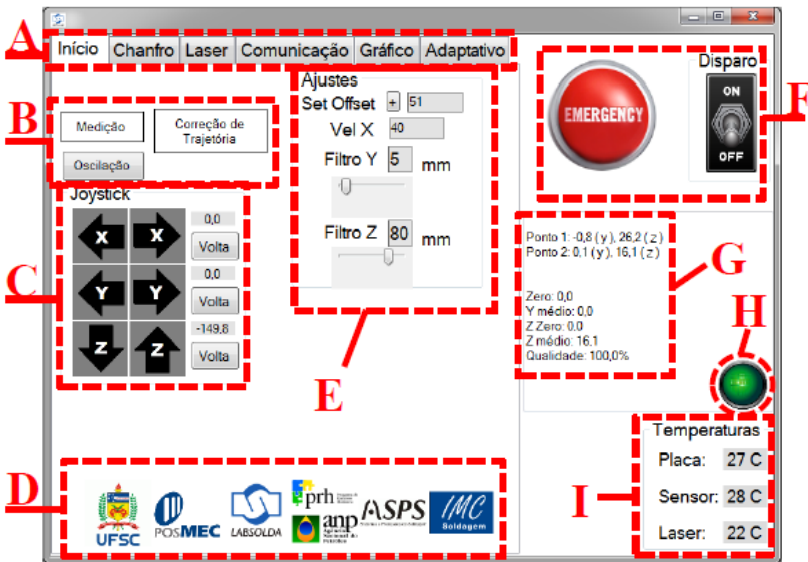


Figura 30 – Interface do software de seguimento de junta, onde: (A) Abas, (B) Comandos de algoritmos, (C) Joystick, (D) Apoio, (E) Ajustes, (F) Botões, (G) Informações, (H) Indicador de qualidade e (I) Temperaturas, adaptado de Viviani [9].

Em sequência ao trabalho de Viviani [9] se tem o trabalho de Kindermann [6], sendo esta a primeira experiência do LABSOLDA com soldagem de tubulações de maneira adaptativa com sensoriamento Laser.

Neste trabalho, foram incorporados e melhorados os estudos de Viviani [9] no que tange o segmento de juntas utilizando um STL, aplicando-o para a soldagem adaptativa de dutos utilizando um robô antropomórfico, a fim de atender o projeto “Desenvolvimento de Sistema Automatizado de Soldagem através de Robô Antropomorfo” que concentrou-se em desenvolver um robô dedicado de 7 graus de liberdade, Modelo RES 7 4 780 T (Figura 31), este desenvolvido pela empresa ENGEMOVI, apoiado pela PETROBRAS e com a intervenção do SENAI-RJ, do LABSOLDA/UFSC, e das empresas IMC e SPS-Soldagem.



Figura 31 – Robô RES 7 4 780 T, desenvolvido pela ENGEMOVI.

O desenvolvimento da pesquisa de Kindermann [6] ocorreu em paralelo com o projeto e fabricação do robô RES 7 4 780 T da ENGEMOVI, como forma de antecipar o desenvolvimento dos procedimentos de soldagem adaptativa, ou seja, para o desenvolvimento do algoritmo de soldagem orbital adaptativa, comunicação e melhorias no sistema existente utilizando um robô antropomórfico. Neste caso foi utilizado o MOTOMAN HP20D e a fonte de soldagem Digiplus A7 estes descritos na Figura 32.



Figura 32 – Configuração utilizada por Kindermann [6] para os ensaios de soldagem adaptativa.

As soldas realizadas foram executadas utilizando corpos de provas curtos (anéis de tubos), para que fosse possível o alcance do robô aos trechos propostos da junta, sendo estes de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ . A integração e comunicação do sistema para soldagem adaptativa consistiam na aquisição do perfil da junta e TP pelo sensor Laser e envio dessas informações à unidade de controle via comunicação *Ethernet* [6].

As correções dos parâmetros de soldagem eram enviadas à fonte de soldagem via comunicação serial. As correções consistiam em alterar as variáveis de soldagem da fonte em função das informações da junta fornecidas pelo STL mais especificamente o *gap* e, de posição angular fornecida pelo robô, que por sua vez emulava os movimentos de um soldador. Nesse sentido, também em função do *gap* e do TP informado pelo sensor, realizava correções na trajetória e em seus parâmetros por meio de uma porta *digital I/O*. Os parâmetros corrigidos eram, velocidade de soldagem ( $V_s$ ), amplitude de tecimento (Amp), tempo de parada (tp), frequência de tecimento (Freq), altura e alinhamento central.

Para a construção do algoritmo de soldagem adaptativa, foi necessário a utilização de dois conjuntos de parâmetros de soldagem, um de maior energia para *gaps* fechados inferiores ou iguais a 1 mm e um de menor energia para *gaps* com aberturas superiores ou iguais a 2,5 mm e inferiores a 4,5 mm [6].

A correção das variáveis elétricas era feita por meio de interpolação linear em função do *gap*. Já as variáveis de movimentação passavam por um sistema de regressão que gerava 'n' curvas de tendência, levando em conta o *gap* e posição angular para cada variável de movimento, a curva mais próxima ( $R^2$  maior) retornava então a

variável ao robô. Esta geração de curva era baseada em banco de dados criado através de experimentos em corpos de prova planos.

Para compilação, tratamentos dos sinais e envio das informações aos periféricos utiliza-se uma unidade de controle, ou seja, um computador. Para o melhor entendimento do método descrito acima tem-se o diagrama da Figura 33. Onde, inicialmente se tem a entrada de algumas variáveis, como diâmetro e espessura do tubo, além da posição inicial.

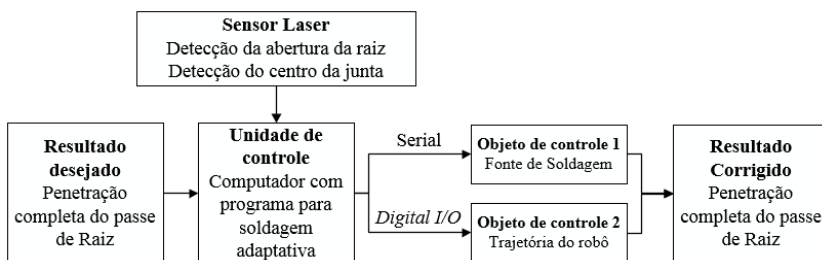


Figura 33 – Diagrama de blocos referente a integração e comunicação do sistema adaptativo, adaptado de Kindermann [6].

O método descrito por Kindermann [6] inicialmente utilizava um algoritmo para gerar uma trajetória orbital de forma automatizada a partir de um ponto P e o raio interno do tubo a ser soldado, por meio de funções aritméticas do próprio robô. A trajetória criada é dividida em trechos defasados  $15^\circ$  entre si, de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , como mostra a Figura 34.

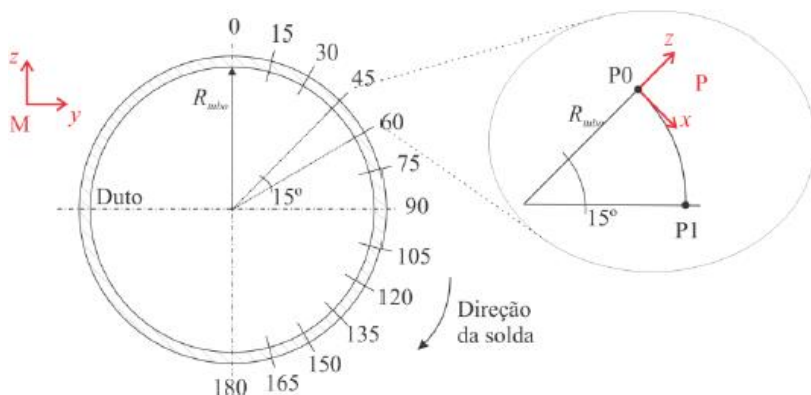


Figura 34 – Esquema da divisão da trajetória orbital em trechos Kindermann [6].

Para movimentar a tocha, em cada um dos trechos um sistema de coordenadas P era atualizado por meio de uma interpolação linear entre P0 e P1. Para manter a orientação da tocha, ou seja, manter o ângulo de ataque constante, utilizava-se uma variável contadora que incrementava o mesmo.

Adjacente a criação da trajetória orbital pelo robô tem-se um algoritmo de tratamento e controle das variáveis de soldagem tanto elétricas quanto de movimentação. O algoritmo possui uma interface gráfica que facilita a localização, controle e interpretação dos dados, como mostra a tela inicial do programa na Figura 35.

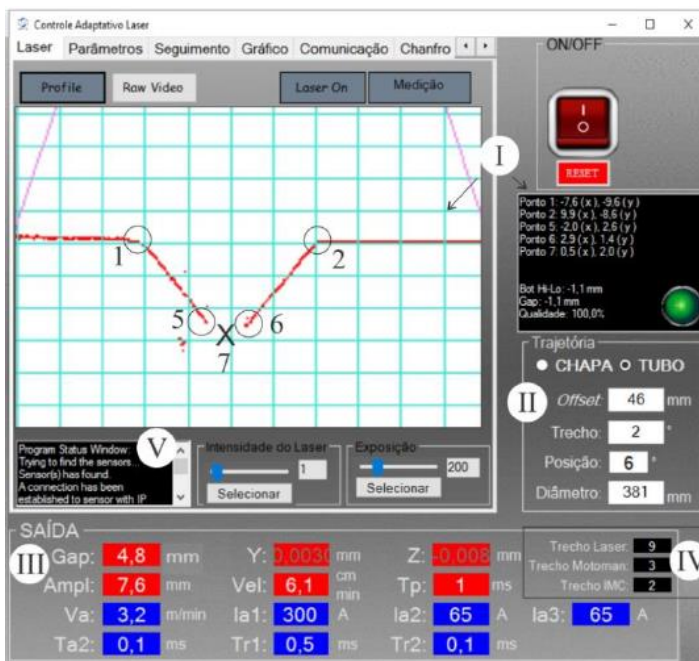


Figura 35 – Tela inicial da interface desenvolvida, onde: (I) Informações do perfil da junta lido pelo sensor Laser; (II) Campo destinado à definição das variáveis relativas à trajetória do robô; (III) Informações referentes às variáveis instantâneas lidas pelo sensor (exceto o *gap*); (IV) O trecho atual em que cada um dos componentes do sistema se encontra; (V) Informação de status e configuração do cabeçote de medição, Kindermann [6].

Como visto, devido a defasagem existente entre o sensor laser e a tocha de soldagem também é necessário realizar um etapa de leitura do *offset*, semelhante ao descrito por Viviani [9]. Para isto, recuava-se o

conjunto tocha laser, em função do *offset*, retornando sua respectiva distância. A Figura 36 exprime a relação (*offset*) de posição dentre o TCP e a linha Laser, sobre um trecho de uma junta genérica.

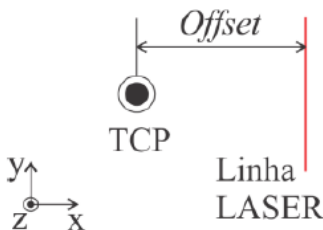


Figura 36 – Relção de posição entre TCP e sensor Laser (*Offset*), Kidermann [6].

Inicialmente é realizada a localização do centro da junta com o sensor Laser por meio de uma programa independente da IHM, programado diretamente do robô, chamado “procura junta” [6]. O ponto inicial da junta é determinado pelo “trecho 0”, este definido pelo usuário. A posição programada define o início da junta na coordenada X, já nas coordenadas Y e Z, a posição é determinada pelo sensor laser.

A procura da junta é feita a partir do ponto definido como “trecho 0”, em seguida executa-se o recuo do *offset*, partindo da posição inicial. No passo seguinte, o robô realiza um deslocamento lateral no conjunto sensor/tocha até realizar a localização de uma leitura válida da junta, ou seja, um TP válido. A posição encontrada é salva e o robô executa o movimento de alinhamento lateral e vertical em função deste ponto. Em seguida se tem o avanço do conjunto sobre a junta. Neste momento o sensor realiza a aquisição e, o algoritmo processa e salva as variáveis de posição e geometria da junta na forma de tabela. Estas são então enviadas ao robô e à fonte de soldagem para a realização da soldagem. A Figura 37 descreve esquematicamente o processo de localização da junta.

Após o início da soldagem o sensor e o robô realimentam o sistema (algoritmo) com a posição angular e as dimensões da junta para que o algoritmo trate e corrija tanto a posição, quanto as variáveis de soldagem.

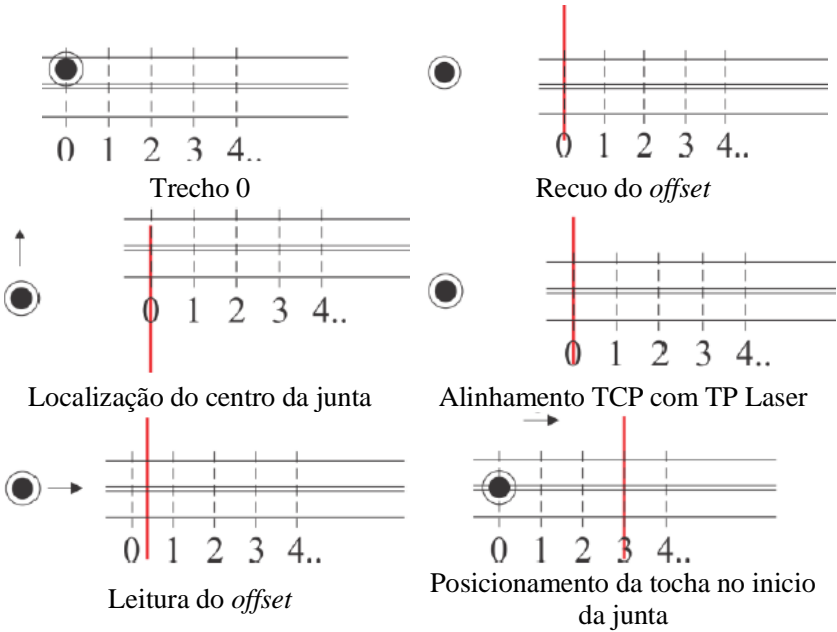


Figura 37 – Esquema de localização e aquisição inicial da junta por meio do algoritmo descrito por Kindermann [6].



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, descreve-se de forma detalhada os métodos e os materiais utilizados para consecução dos experimentos realizados nesta pesquisa.

A metodologia experimental foi dividida em 3 etapas, sendo a primeira a etapa de identificação e criação de metodologias para melhorar e adequar o sistema PCA (Plataforma de controle adaptativo) ao Tartilope V3 para soldagem orbital adaptativa. A segunda etapa é a parte de validação das adequações feitas no sistema, a partir de testes práticos e ensaios mecânicos. A etapa 3 concentra-se em tratar, analisar e apresentar os dados. Para o melhor entendimento destas etapas tem-se um detalhamento das atividades no fluxograma da Figura 38.

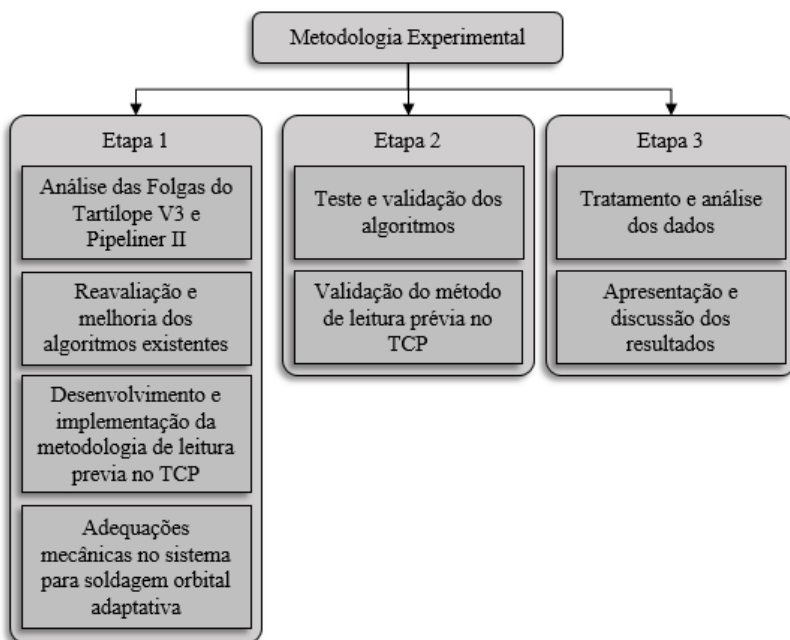


Figura 38 – Fluxograma da metodologia experimental.

### 3.1 Análise das folgas e velocidades dos manipuladores Tartilope e Pipeliner II

Para definição do erro causado sobre os eixos pelas folgas no manipulador Tartilope V3 foram feitos ensaios para verificar o nível destas em seus eixos e, como contraponto seus resultados foram comparados com os do manipulador Pipeliner II da empresa Magnatec. Foram executados ensaios de medição nos eixos Y e Z responsáveis pela oscilação e controle de altura da tocha e, no eixo X responsável pelo deslocamento do manipulador sobre o trilho, foi analisada as possíveis folgas por meio da velocidade.

Na medição foi utilizado um transdutor linear com resolução de 50 mm com incerteza de 0,05% e para aquisição do sinal o SAP (Sistema de aquisição portátil) descritos na Figura 39.



Figura 39 – SAP de 5 kHz (Esquerda) e transdutor linear Burster de  $50 \pm 0,05\%$  mm (Direita) [39] [40].

A bancada foi montada para simular a instalação dos manipuladores em campo. Sendo assim, sobre a extremidade de um segmento de tubo de 16” como mostra a Figura 40.

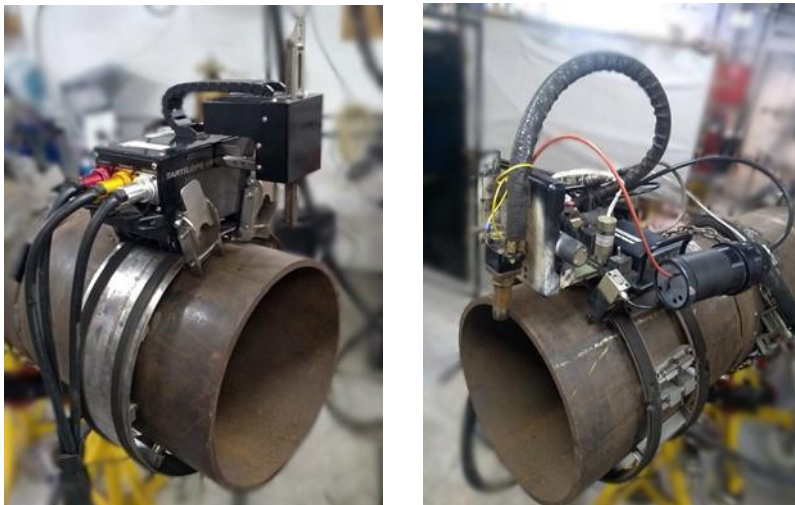
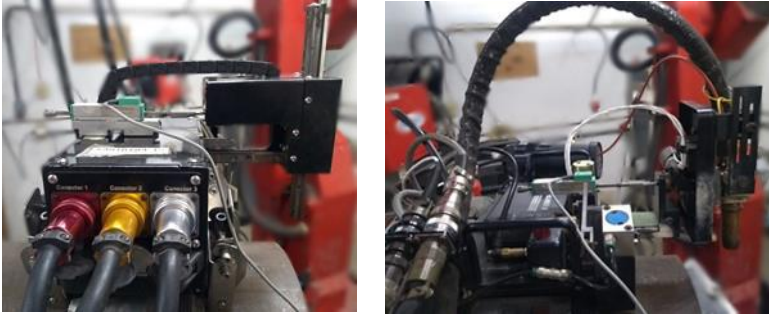


Figura 40 – Bancada experimental para medição das folgas dos manipuladores Tartilope V3 (Esquerda) e Pipeliner II (Direita).

As medições consistiram em posicionar o transdutor no eixo de interesse, fixando-o de forma a mantê-lo rígido e travado na posição, como mostra a Figura 41.

### Medição das Folgas em Y



### Medição das Folgas em Z

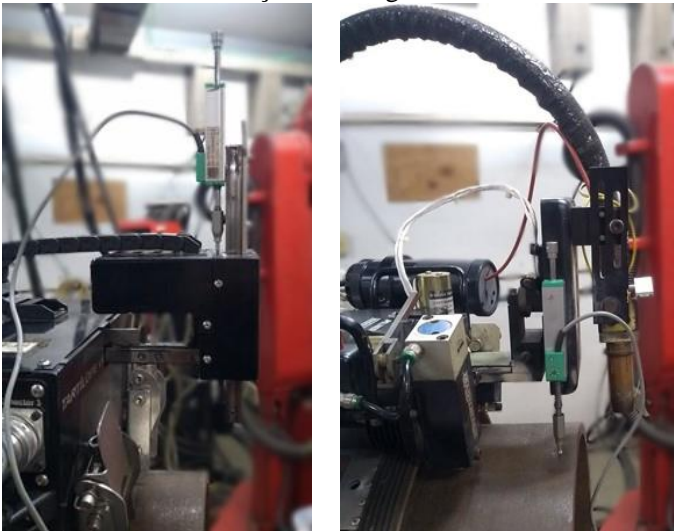


Figura 41 – Esquema de posicionamento do transdutor adotado para medição das folgas, Tartflope V3 (Esquerda) e Pipeliner II (Direita).

As avaliações das folgas dos eixos Y (Oscilação) se dividiu em 2 etapas e 3 regiões. As etapas distinguem-se em avanço e recuo, onde a folga foi medida inicialmente avançando o eixo e posteriormente recuando o eixo ao longo de 3 regiões, estas diferenciando-se em curso mínimo, médio e máximo.

Para o eixo Z (Altura) foi utilizado o mesmo método, entretanto em uma etapa, sendo esta, somente avanço, pois verificou-se que devido ao peso do conjunto acoplado ao eixo, a folga de recuo é próxima a zero para ambos os manipuladores, havendo folga somente para o recuo, ou seja, somente para o deslocamento positivo do eixo Z.

A excitação do sensor foi feita movendo o eixo manualmente na região de interesse, sendo definida como curso mínimo o eixo contraído (fim de curso inferior) e curso máximo com o eixo completamente estendido (fim de curso superior) e curso médio a região de trabalho ou central do mesmo. O fluxograma da Figura 42 ilustra o esquema de medição para os eixos Y e Z respectivamente.

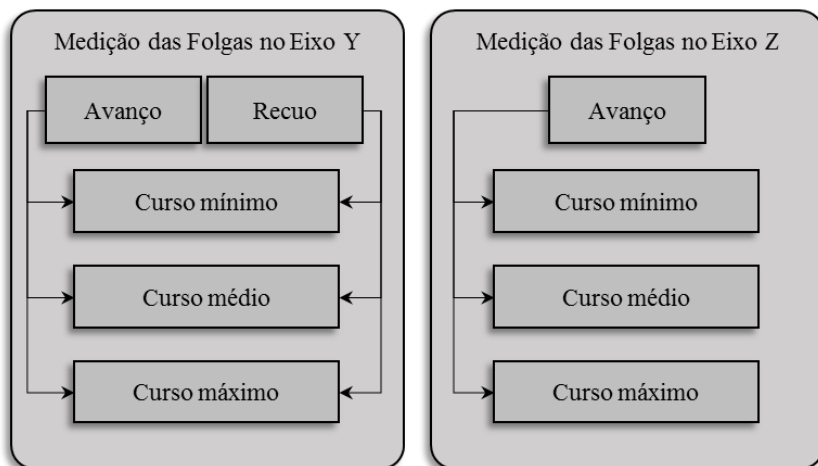


Figura 42 – Fluxograma da medição das folgas nos eixos Y e Z.

Como citado, a análise do eixo X foi feita através da velocidade, verificando oscilações e variações bruscas na mesma, as quais podem caracterizar folgas no eixo. Para o experimento, foi utilizado o SAP 0 e o MVA (Medidor de velocidade de arame), este um item que compõem o SAP. O MVA (Figura 43) é composto por um encoder utilizado para mensurar a velocidade de alimentação de arame de cabeçotes de soldagem, com uma capacidade de medição de 0 a 25 m/min e resolução de 0,1 m/min [39].



Figura 43 – Medidor de velocidade de arame.

Os experimentos consistiram em posicionar o MVA no trilho do manipulador de maneira a deixá-lo fixo como mostra a Figura 44.

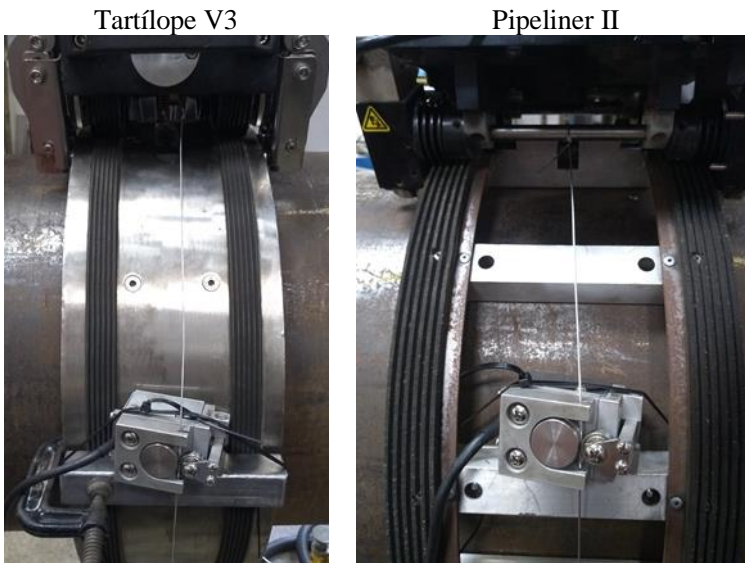
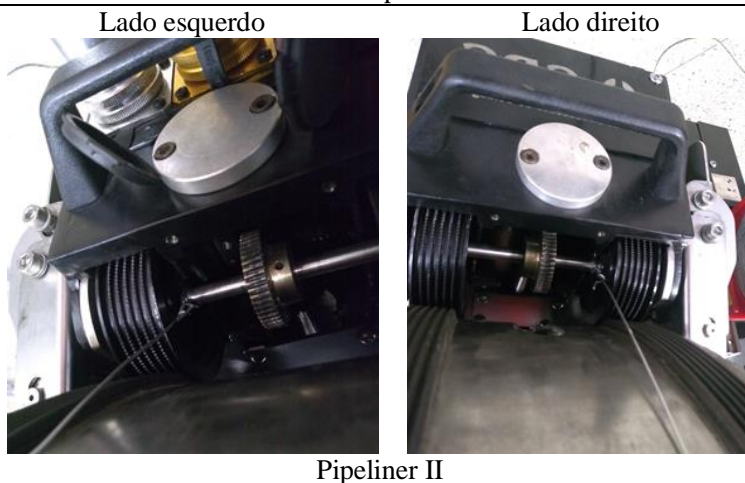


Figura 44 – Esquema de posicionamento do MVA sobre os trilhos dos manipuladores.

Em seguida foi fixado um arame de alumínio no manipulador de forma a contornar o trilho passando pelo MVA. O arame foi fixo de ambos os lados do manipulador o mais próximo possível do trilho, com uma tensão suficiente para mantê-lo esticado, como mostra a Figura 45.

## Tartilope V3



## Pipeliner II

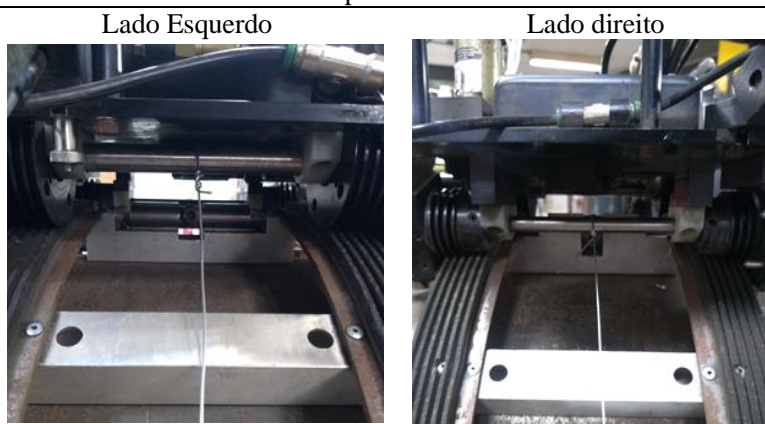


Figura 45 – Esquema de fixação do arame nos manipuladores.

Por uma questão física foi necessário dividir o experimento em 2 etapas, sendo a primeira a verificação da velocidade da posição  $0^\circ$  até  $180^\circ$  e a segunda de  $180^\circ$  até  $0^\circ$ . Para um melhor entendimento tem-se o esquema da Figura 46, que representa a vista frontal da bancada utilizada.

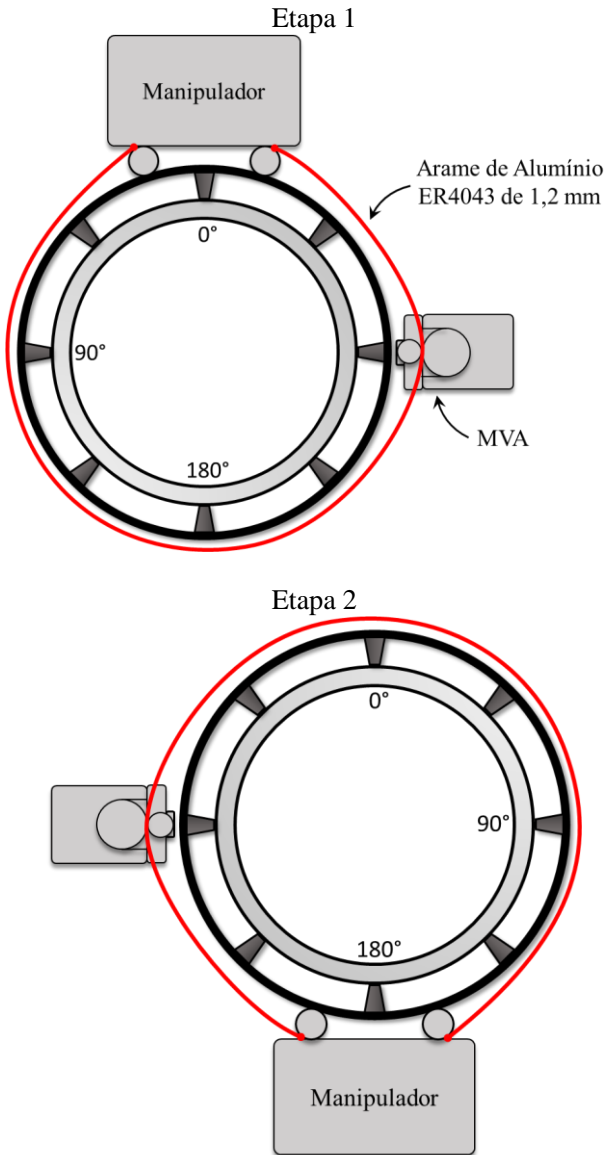


Figura 46 – Esquema do experimento para medição da velocidade dos manipuladores.



### 3.2 Adequações físicas realizadas no sistema Tartilope V3 para soldagem orbital adaptativa

Nesta subseção, se tem as metodologias utilizadas para criação e implementação de ações corretivas e adequações, as quais corroboraram para a utilização do Tartilope V3 na soldagem orbital adaptativa.

#### 3.2.1 Seleção da tocha de soldagem e criação mecanismos para acoplamento dos periféricos destinados à soldagem adaptativa

A seleção da tocha, baseou-se na análise de alguns critérios, sendo eles, principalmente o tamanho e compatibilidade com o processo de soldagem utilizado (CCC) e, também a partir da corrente de operação suportada (*duty cycle rate*) pela mesma. Além disto, levou-se em conta a acessibilidade de consumíveis que a compõem, sendo estes, porta bico, bico de contato (1,2 mm), difusor de gás, bocal e conduíte.

A partir da seleção da tocha, levando em conta os critérios supracitados, foi realizada a modelagem e fabricação de um suporte de tocha compatível com a metodologia e com o processo inicialmente proposto. Para isto foi utilizado o *software* SolidWorks 2016.

Além da seleção da tocha, levando em conta o estado da arte dos manipuladores comerciais disponíveis para soldagem MIG orbital, foi feito um *Benchmarking* dos mesmos, onde pode-se verificar que em suma o mangote encontra-se preso na parte traseira do manipulador formando um arco sobre o mesmo, com base nisto, também utilizando o *software* SolidWorks 2016, foi feita a modelagem e fabricação de um suporte de mangote compatível com este método.

#### 3.2.2 Ação corretiva para limitação da folga

Com base nos resultados obtidos mediante a análise das folgas dos manipuladores, em específico o Manipulador Tartilope V3, verificou-se a possibilidade de duas ações corretivas para limitar as folgas em seus respectivos eixos.

A primeira é a inserção de um sistema de *feedback* na saída dos eixos, conforme mostra o diagrama de blocos na Figura 47, este com a finalidade de retroalimentar um controlador com sensor de posição (Encoder) conectado na saída do eixo, tornando-o assim um sistema em malha fechada, o que teoricamente compensariam as folgas, propiciando maior precisão ao mesmo.

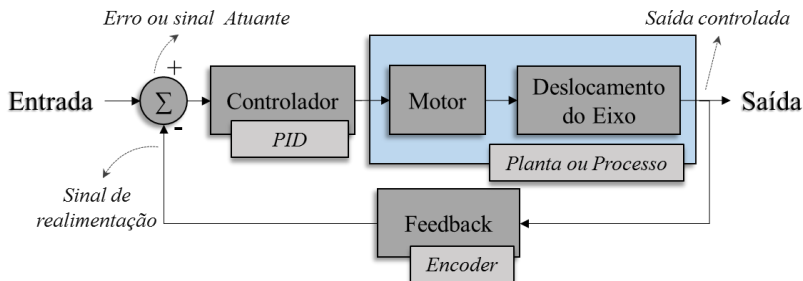


Figura 47 – Diagrama de blocos para controle dos eixos em malha fechada.

Entretanto, esta opção requer modificações significativas tanto na estrutura quanto recalibração e ganho de controle dos eixos e seus *drivers* (controladores) do manipulador, sendo assim, esta opção se adequa a uma sugestão de retrofit e ou reprojeito, se encaixando como uma opção de trabalho futuro.

Em contrapartida se tem a segunda opção que é mais simples, e aplicável na concepção atual sem necessidade de modificações no sistema em si.

A segunda opção trata-se de ação corretiva, reduzindo a folga por meio da aplicação de uma força mecânica sobre a saída do eixo Y, gerando uma tensão sobre todo o trem de engrenagem presentes na redução do motor DC (Pinhão e cremalheira), de forma a pressionar seu deslocamento em Y+, esta força pode ser gerada por meio de uma mola, por exemplo. Esta alternativa em relação à anterior pode ser facilmente implementada. A Figura 48 ilustra esquematicamente o modo de compensação da folga em Y aplicando este método.

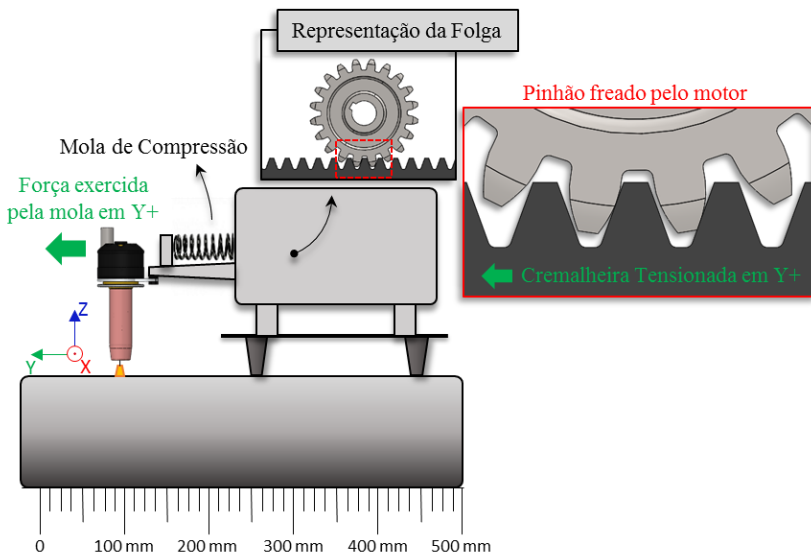


Figura 48 – Representação esquemática do efeito da força de uma mola, sobre a folga no conjunto pinhão e cremalheira.

Para validar esta ação corretiva, da mesma forma que nos ensaios de medição de folgas, foi utilizado o SAP junto do sensor linear, este conectado ao eixo Y como mostra a Figura 49. Os ensaios foram feitos sem e com mola e, estes comparados com o que o controlador (*driver*) do eixo enviou ao motor DC.

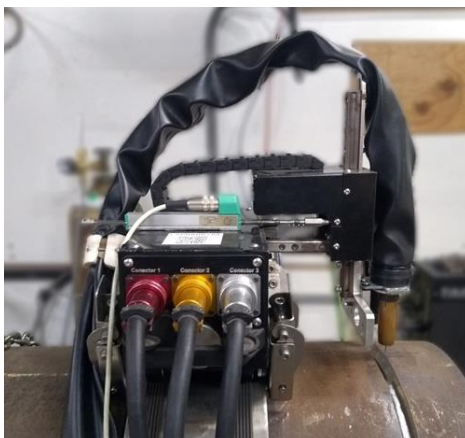


Figura 49 – Esquema de posicionamento do sensor linear para teste no eixo Y.

### 3.2.3 Critérios para quantificação e qualificação dos parâmetros de soldagem quanto à estabilidade e qualidade

Os parâmetros de soldagem aqui descritos para o CCC são variações dos parâmetros descritos por Kindermann [6], uma vez que o mesmo utilizou uma versão anterior do algoritmo responsável pelo controle do CCC da fonte Digiplus A7 da IMC, o gerou alterações quanto à estabilidade e qualidade final das soldas, necessitando assim de análise e ajustes para maior confiabilidade quanto à estabilidade e robustez do processo.

Para verificação e identificação das melhorias necessárias, os parâmetros, tanto elétricos quanto de movimentação da tocha. As variáveis elétricas foram avaliadas segundo alguns critérios, sendo o principal a estabilidade do processo, quanto à incidência de respingos, regularidade e coincidência entre os ciclos. Para aquisição dos sinais elétricos foi utilizado o SAP 0 (Figura 39), junto do SAP foi utilizada a câmera de alta velocidade IDT Motion Pro, junto de seus periféricos, sendo estes, a lente Canon Macro EF 180 mm L USM, o filtro ótico Edmund Optics, sistema de iluminação laser Cavitar, CAVILUX HF e o sistema de aquisição de dados IDT, DAS MotionPro, todos estes listados na Tabela 2 [41].

Tabela 2 – Lista de equipamento que compõem o sistema de aquisição de imagens em alta velocidade IDT [41], adaptado de Marques [42].

Equipamento	Descrição
	<p><b>Câmera IDT, Y4-S2</b>            Taxa de aquisição: máx. 4500 quadros por segundo para a máx. Resolução de 1016 x 1016 px            Tempo de gravação na maior resolução: 1.37 s equivalente a 6201 Frames            Memória: 8Gb de memória interna</p>
	<p><b>Lente Canon, Macro EF 180 mm L USM</b>            - Diâmetro: 72 mm            - Abertura: f/3.5            - Ampliação máxima de 1x</p>
	<p><b>Filtro Edmund Optics, 810 ± 10 nm</b>            Passa banda 810 nm (half width 10 nm)            Diâmetro 50 mm</p>
	<p><b>Sistema de iluminação Laser Cavitar, CAVILUX HF:</b>            LASER classe 4            Potência de pulso 500 W ± 10%            Tempo do pulso &lt; 50 ns            Comprimento de onda 810 ± 10 nm</p>
	<p><b>Sistema de aquisição de dados IDT, DAS MotionPro</b>  <b>Entradas analógicas</b>            Número de canais: 16            Resolução dos conversores: 16 bits            Taxa de aquisição máxima: 500 kHz            Tensão de entrada máxima: ±10 V  <b>Saídas analógicas</b>            Número de canais: 4            Resolução dos conversores: 16 bits            Taxa de aquisição máxima: 500 kHz            Tensão de saída máxima: ±10 V</p>

Para a movimentação da tocha de soldagem, foi utilizado o robô antropomórfico de 6 eixos MOTOMAN HP20D, em função de sua flexibilidade para montagem de infraestrutura de avaliação dos procedimentos em diferentes posições de soldagem. A Figura 50 ilustra bancada de ensaios utilizada nos experimentos.



Figura 50 – Bancada experimental adotada para os ensaios de soldagem preliminares, onde: 1 – Fonte de soldagem IMC Digiplus A7; 2 – Robô antropomórfico de 6 eixos MOTOMAN HP20D; 3 – Mesa Rotativa MOTOPOS com 2 eixos; 4 – Unidade de controle do manipulado Modelo DX100; 5 – Pendant NX 100; 6 – Tocha MIG Semiautomática TBI; 7 – Cilindro de gás de proteção com mistura de 75% Argônio e 25% de dióxido de carbono (C25).

Como citado na seção 2.1, há um fomento à pesquisa de novas técnicas de controle dos parâmetros elétricos do processo MIG/MAG com a finalidade de obter-se a maior eficiência e estabilidade, visando com isso aumentar a qualidade global do processo, tanto para produzir peças boas quanto evitar o gasto desnecessário de energia e material.

A avaliação da estabilidade do processo de soldagem pode ser feita de diversas formas, verificando a repetibilidade do processo, aparência final do cordão, por meio de inspeção visual e sonora do processo, observando o volume de respingos e ruídos, análise das variáveis elétricas, dentre outras, conforme cita Scotti [10] em seu livro. Porém ainda assim, se tem um problema em como quantificar a estabilidade para que se possa tomar ações corretivas. Neste trabalho

foram utilizados dois métodos para quantificar e qualificar a estabilidade do processo CCC.

O primeiro método consiste em avaliar a estabilidade do processo, analisando de forma qualitativa a regularidade e coincidência dos períodos de transferência, por meio da relação entre tensão e corrente, ciclograma [8] [11].

Para o melhor entendimento desta análise qualitativa, tem-se um exemplo na Figura 51, qual ilustra dois ciclogramas sobrepostos da corrente em função da tensão de um conjunto de parâmetros do processo CCC para uma velocidade de alimentação de 5 m/min e uma corrente média de 150 A.

No gráfico se tem um ciclograma de um processo CCC instável sobreposto por um mesmo processo nas mesmas condições operacionais, entretanto, estável. Visto isto, pode-se avaliar que quando se tem um processo instável ocorre uma irregularidade expressiva na relação entre tensão e corrente, o que é esperado, uma vez que os períodos tendem a não ser repetitivos.

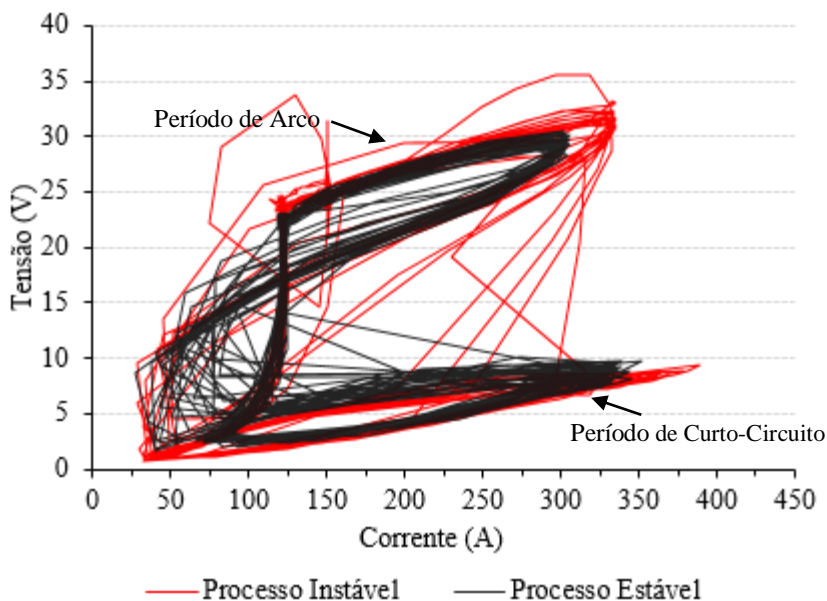


Figura 51 – Representação gráfica da relação entre corrente em função da tensão para o processo CCC.

O segundo método consiste em analisar a incidência das variáveis elétricas, ou seja, verificando a repetibilidade nos tempos de duração de curto e arco e, junto disto definir a frequência de transferência, ao longo de um período de tempo definido, cerca de 10 segundos, para isto foram gerados histogramas de frequência, além da utilização de outras ferramentas estatísticas. Através destas análises, associadas à interpretação dos oscilogramas do processo, é possível, além de compreender a estabilidade e repetibilidade da transferência metálica, avaliar possíveis fenômenos físicos, que são consoantes a dinâmica da poça de fusão e ao destacamento [8] [10] [11].

Em sequência a análise e ajustes dos parâmetros de soldagem, foram feitos ensaios de soldagem em corpos de prova que simularam o formato da junta utilizado no tubo, sendo estes com chanfro do tipo “V” sem nariz com ângulo de  $60^\circ$  e com meia polegada de espessura, conforme ilustra o detalhamento da Figura 52. Estas juntas foram avaliadas e qualificadas por inspeção visual, macrografias e raio-x por meio do equipamento modelo GE Eresco 65MF4.

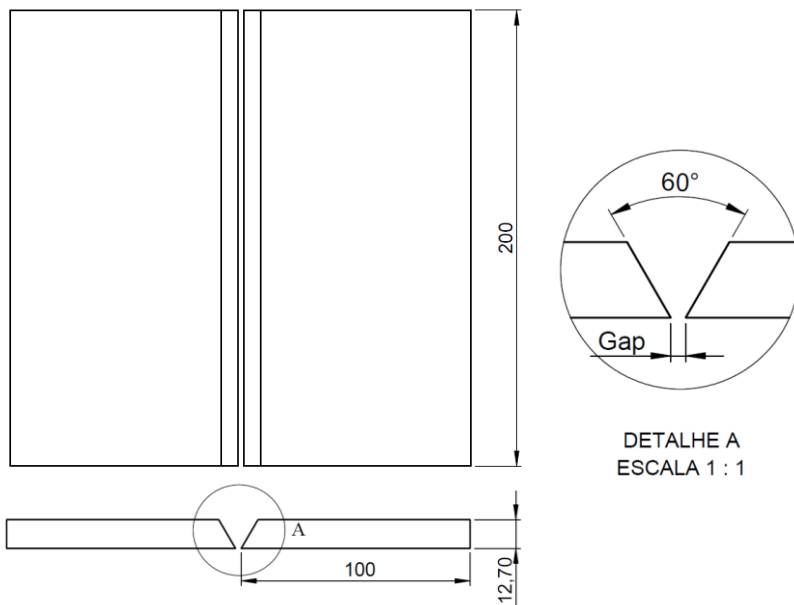


Figura 52 – Detalhe das principais dimensões do modelo de junta utilizado nos experimentos



Os testes iniciais consistiram em replicar os parâmetros de movimentação gerados por Kindermann [6], sendo estes:

1. Amplitude (Amp) = mm
2. Frequência de Oscilação (Freq) = Hz
3. Tempo de Parada (tp) = ms
4. Velocidade de Soldagem ( $V_s$ ) = cm/min

Nestes experimentos, foram verificados a incidência de defeitos e descontinuidades, provendo ajustes quando necessário, até se atingir nível de qualidade desejado nas mesmas. Para isto, os ensaios foram divididos em 3 grupos e 3 classes. Os grupos se referem as posições de soldagem, estas sendo, posição plana, vertical descendente e sobre-cabeça e, as classes determinadas pelo *gap*, sendo estes, 1 mm, 2,5 mm e 4,5 mm, para cada *gap* foram feitos ensaios até atingir o nível de qualidade estipulado.

Para cada amostra qualificada foram feitas 3 repetições para validação. A Tabela 3 ilustra de forma simplificada a quantidade de ensaios em função dos grupos e classes.

Tabela 3 – Conjunto de ensaios realizados para qualificação dos parâmetros de soldagem quanto a defeitos.

	Posição Plana	Posição Vertical Descendente	Posição Sobre-Cabeça
	1 mm	3	3
<i>GAP</i>	2,5 mm	3	3
	4,5 mm	3	3

Total de 27 experimentos

Os critérios de avaliação da qualidade da solda foram os mesmos que Kindermann [6] adotou em seu trabalho, onde se tem na Figura 53 um esquema para o entendimento da nomenclatura referente a cada geometria e ou descontinuidade que eventualmente pode ser obtida.

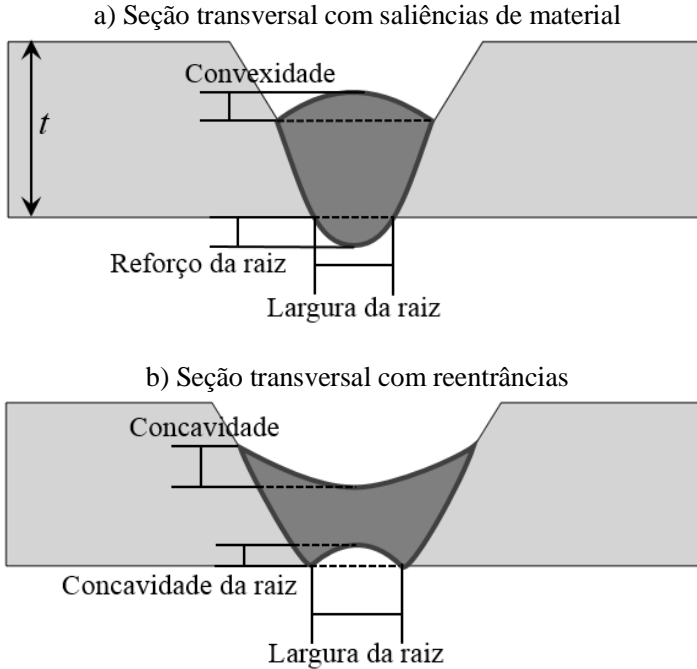


Figura 53 – Representação da seção transversal de uma passe de raiz e definições das principais geometrias.

Os critérios de aceitação para a qualificação do passe de raiz, são:

- Concavidade da raiz:  $\leq 0,05 t$  e, máximo de 0,5 mm, onde  $t$  é a espessura da parede. Segundo a norma ISO 5817 [43] (nível de qualidade B);
- Reforço da raiz:  $\leq 1 \text{ mm} + 0,2 b$  e, máximo de 3,0 mm, onde  $b$  é a largura da raiz. Segundo a norma ISO 5817 [43] (nível de qualidade B);
- Convexidade ou concavidade na face: Embora não haja especificidade deste item para o passe de raiz, foi utilizado um valor máximo de 1,5 mm de altura. Este valor seria referente ao passe de acabamento, segundo a norma ASME IX [44];
- Defeitos na superfície, como trincas, mordeduras e falta de fusão. Segundo a norma API 1104 [14].

### **3.3 Adequação dos algoritmos existentes para soldagem adaptativa com o Tartílope V3**

Neste capítulo estão descritos de forma detalhada, os materiais e métodos utilizados na revalidação e adequação dos algoritmos existentes para a soldagem orbital adaptativa, tanto no que tange ao algoritmo da soldagem adaptativa, que envolve os parâmetros de soldagem, quanto às técnicas empregadas para o seguimento de junta por meio da comunicação entre o sensor laser e o manipulador Tartílope V3.

#### **3.3.1 Algoritmo de seguimento de junta**

Como visto no item 2.5, sobre os antecedentes, os sistemas de soldagem adaptativa estudados não levavam em consideração o meio como uma variável influenciadora da geração de trajetória, ou seja, a influência da posição absoluta do manipulador sobre a posição da tocha e do sensor. O que até então é compreendido uma vez que o manipulador não estava acoplado à peça ou à região de interesse.

No capítulo 4.2 serão apresentados os principais problemas que existem nos manipuladores, sendo eles, a folga e os desvios gerados pelo trilho, que por serem invisíveis ao sistema de visão (STL) atingem significativamente a criação e correção da trajetória do manipulador em torno do duto.

Como forma de atenuar esse efeito do trilho sobre a leitura do STL, criou-se a metodologia descrita nesta seção, em resumo, esta consiste em realizar uma leitura em vazio da junta com a tocha no TCP e outra com o STL no TCP. Criando assim mapas da trajetória de Y e Z para cada caso supracitado e, com isto realizar a diferença ponto a ponto, entre as curvas, criando assim uma curva do erro gerado pelo trilho. Esta curva, quando associada a leitura online da posição do manipulador, tende a atenuar o efeito do trilho sobre a trajetória.

##### **3.3.1.1 Mapa da junta**

A criação do mapa da junta é dividido em duas partes, o mapa do eixo Y (Oscilação) e o mapa do eixo Z (Altura). O passo inicial é a localização do centro da junta por meio do algoritmo de reconhecimento do chanfro. Entretanto, quando executada a oscilação do eixo Y (tecimento), gera-se e uma componente divergente, pois na perspectiva do sensor é a junta que está se movendo. Sendo assim, é realizada a composição da posição Y lida pelo TP do sensor em relação à posição Y

relativa ao TCP do manipulador. A Figura 54, ilustra a aquisição da posição Y na perspectiva do manipulador e na perspectiva do sensor e sua respectiva composição, denominada mapa da junta.

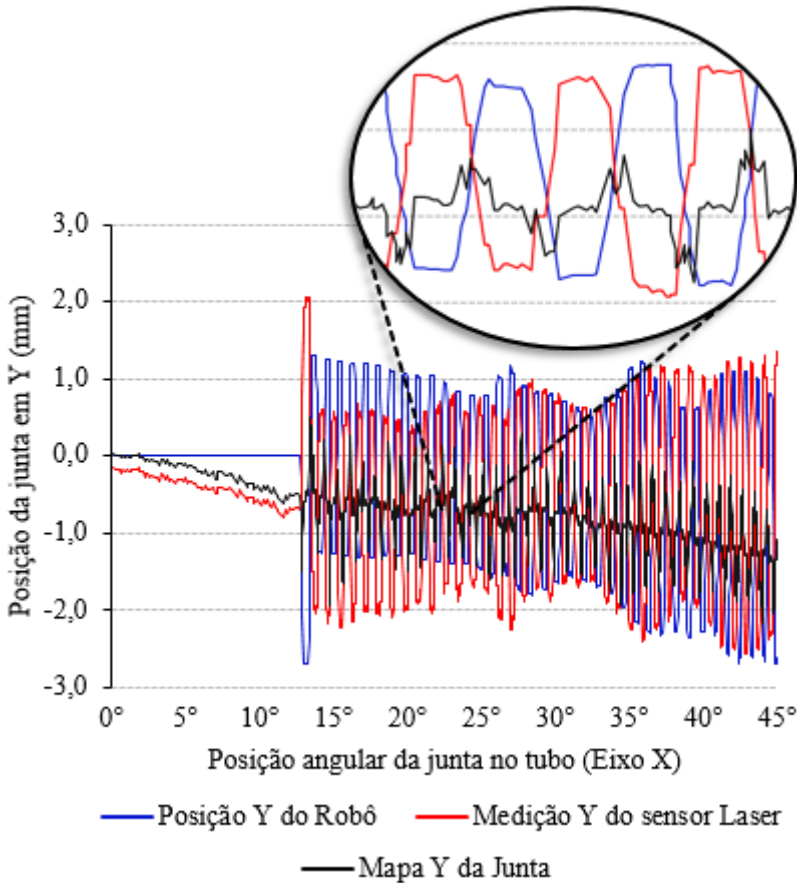


Figura 54 – Aquisição da posição Y (eixo de oscilação) pela perspectiva do robô e do STL para criação do mapa da trajetória em Y.

Em sequência à criação do mapa da junta, ainda se tem a necessidade de realizar uma filtragem da composição criada, a fim de, eliminar ruídos e interferências geradas por esta composição das posições.

O filtro utilizado foi o mesmo que Kindermann [6] e Viviani [9] utilizaram em seus respectivos trabalhos, ou seja, o *exponential*

*smoothing*, qual funciona como um filtro passa-baixa, atenuando ruídos de alta frequência. A Figura 55 ilustra graficamente o mapa Y da junta “bruto” e o mapa Y da junta filtrado.

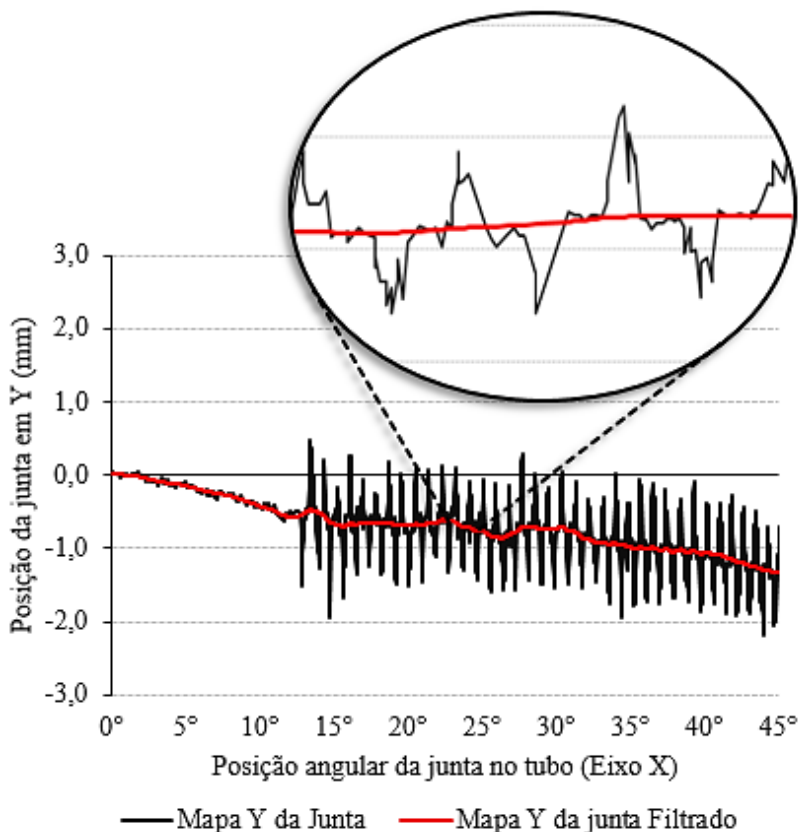


Figura 55 – Mapa Y da junta “bruto” e mapa Y da junta filtrado.

Portanto, o mapa como o nome sugere é a representação métrica da soma de uma correção sobre o erro de posição da tocha de soldagem em função da leitura de *Tracking Point* definido, que representa a deslocamento do centro da junta em relação a este TP.

### 3.3.1.2 Método de leitura prévia no TCP

O método desenvolvido para atenuar os desvios causados pelas interferências mecânicas concernentes do sistema consiste em realizar uma varredura prévia da junta com o STL no TCP e outra leitura com a tocha no TCP, com isto criar uma curva de correção para os desvios gerados pelo trilho e/ou junta. O fluxograma da Figura 56 ilustra o método em 4 passos.

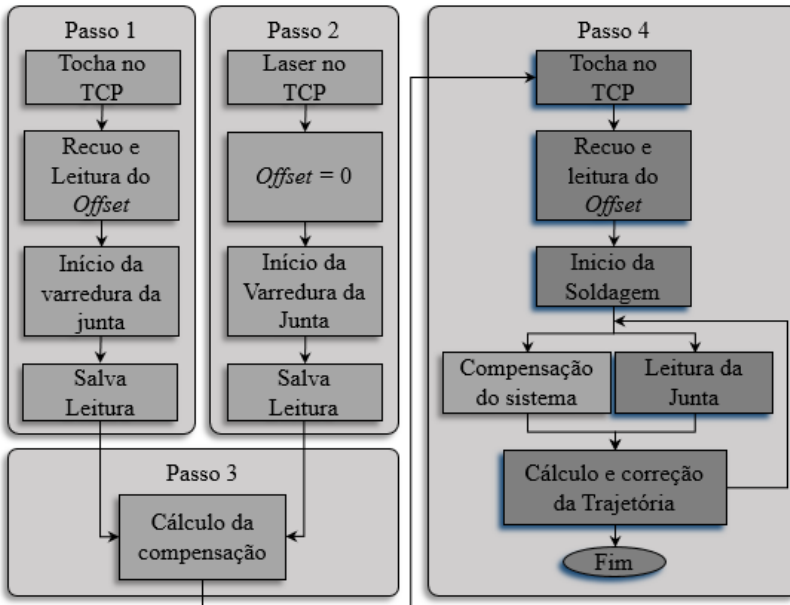


Figura 56 – Fluxograma da metodologia desenvolvida para compensação dos desvios concernentes ao sistema.

O passo 1 representa a etapa de leitura prévia da junta com a tocha no TCP. Para a melhor compreensão deste passo se tem a Figura 57 qual ilustra este processo, onde as Figuras A, B e C representam a compensação do *offset* e D é o escaneamento propriamente dito. Vale salientar que nesta etapa não se executa a oscilação do eixo Y, o que aumenta a confiabilidade da aquisição.

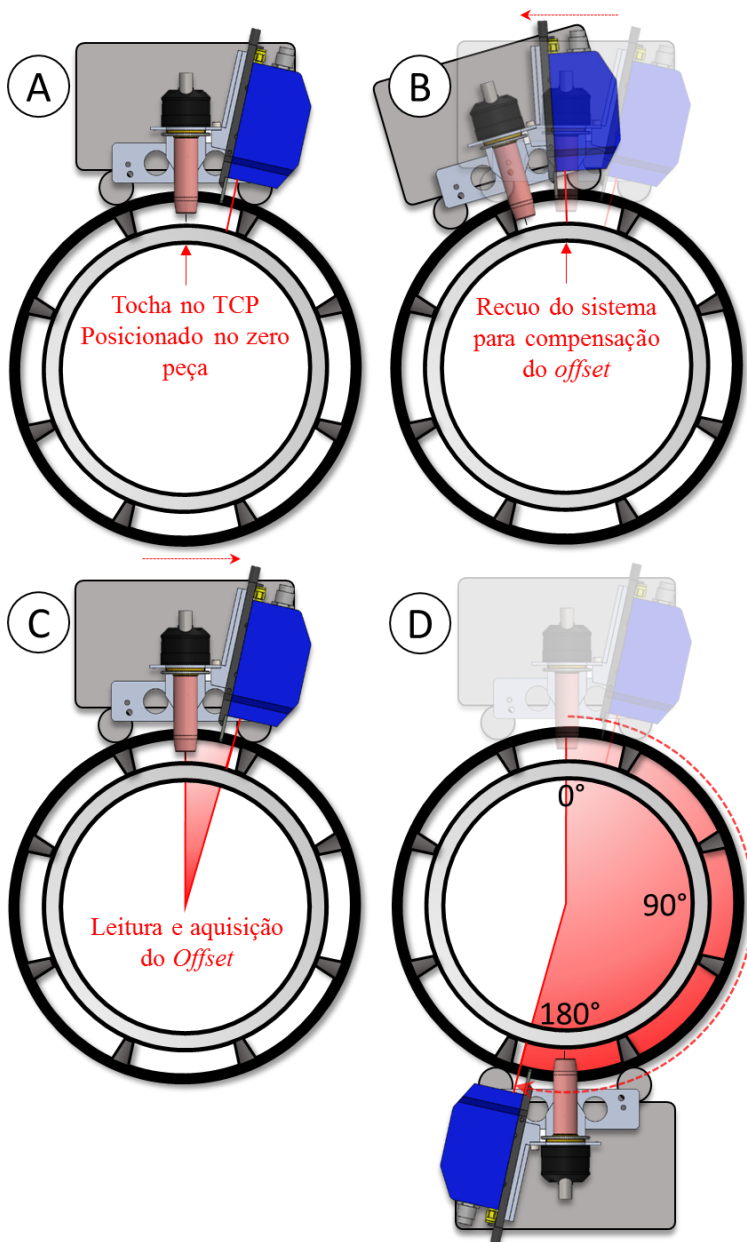


Figura 57 – Esquema da leitura prévia com a tocha no TCP (Passo 1).

No passo 2 se tem a substituição da tocha pelo STL, colocando-o assim no TCP. Neste caso, o feixe Laser se encontra sobre o zero virtual da peça e, portanto, o *offset* é igual a zero. Neste sentido o escaneamento da superfície procede como ilustra a esquema da Figura 58, onde a Figura A representa a substituição da tocha pelo STL no TCP e seu respectivo posicionamento sobre o zero peça ( $0^\circ$ ) e, a Figura B representa o escaneamento da junta com o Laser observando a junta pela perspectivada tocha e, igualmente ao passo 1 esse varredura é feita sem a oscilação do eixo Y.

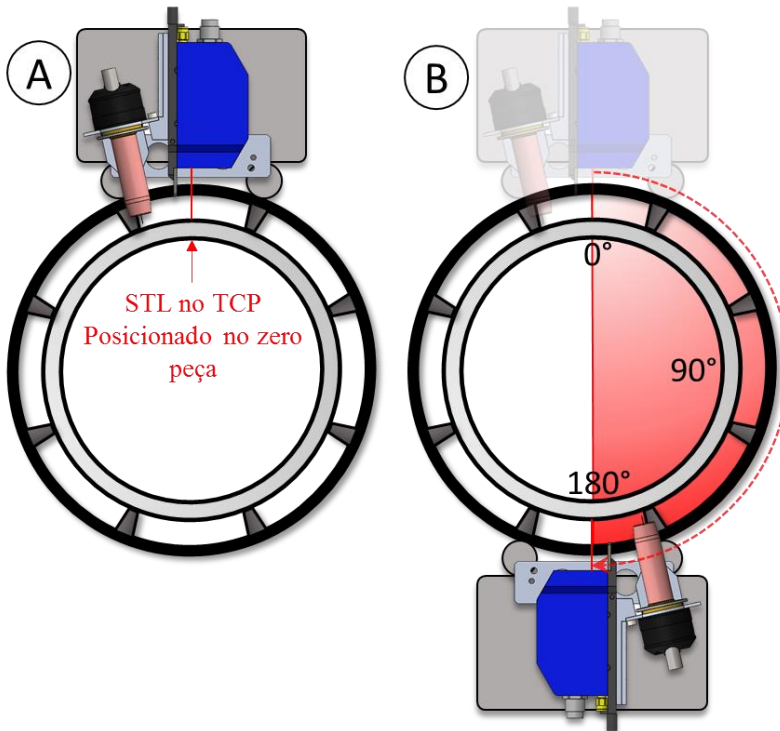


Figura 58 – Esquema da leitura prévia com a STL no TCP (Passo 2).

O passo 3 consiste em criar uma curva de correção a partir das aquisições feitas tanto com a tocha quanto com o STL no TCP. O algoritmo que realiza essa função subtrai a leitura realizada com a tocha no TCP da leitura realizada com o Laser no TCP, criando assim, uma curva de erro, que é utilizada como compensação no passo 4.



De maneira a tornar visual a criação da curva de erro, foi criado o gráfico presente na Figura 59, que ilustra um exemplo genérico da criação da mesma. Nesta figura é possível observar o mapa de Y pela perspectiva da tocha no TCP e do Laser no TCP, além de sua respectiva curva de erro sistemático.

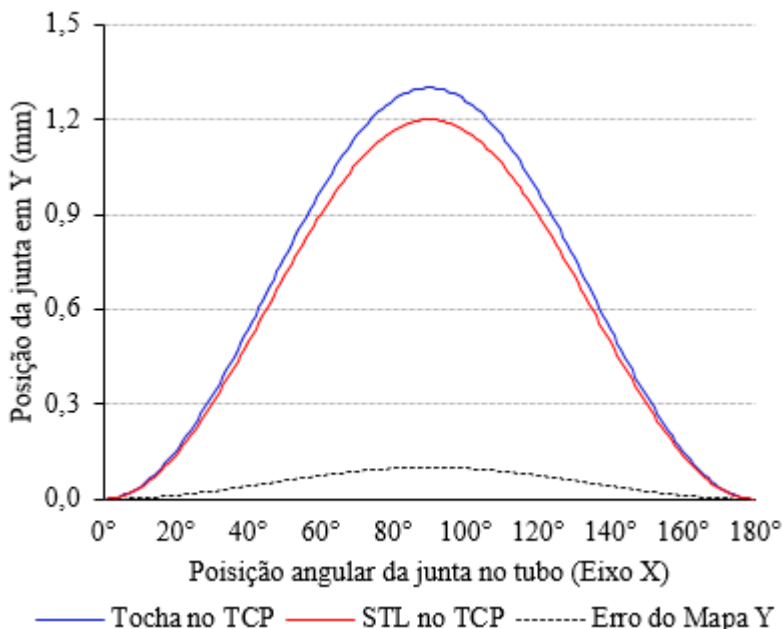


Figura 59 – Exemplo genérico da geração da curva de erro para do mapa Y da trajetória do manipulador (Passo 3).

No passo 4, se tem a realização do processo de soldagem em si, onde a tocha encontra-se no TCP e o sensor Laser defasado em sua respectiva posição, atuando em segundo. O passo 4, semelhante ao passo 1, também realizada a etapa de recuo e varredura do *offset*. Entretanto na sequência ocorre o disparo da fonte e a soldagem propriamente dita. Neste caso o sistema associa a curva de erro gerada no passo 3 com a curva instantânea criada pelo sensor em tempo real, realimentando o algoritmo de correção continuamente até o fim. Desta forma anomalias na execução da trajetória tendem a ser corrigidas, conforme foi apresentado na etapa 4 do fluxograma da Figura 56. A Figura 60 ilustra esquematicamente o processo de soldagem da junta.

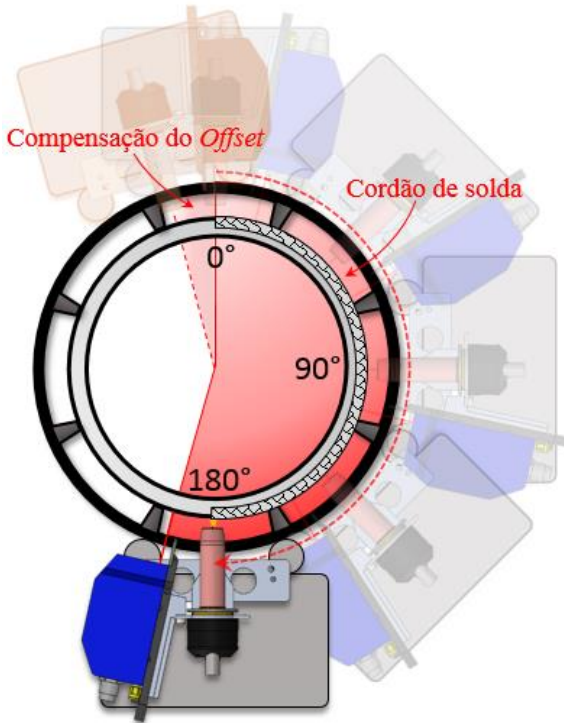


Figura 60 – Etapa final do método de soldagem adaptativa com leitura prévia para compensação dos desvios concernentes ao sistema.

Para testar o método supracitado o mesmo foi implementado ao algoritmo de controle da PCA, onde utilizou-se o manipulador Tartflope V3, fonte de soldagem Digiplus A7, junto da tocha TMC 2 e o Sensor Laser Metavision SLS – 050 V1, como corpo de prova foi utilizado um segmento de tubo de 404,6 mm (16 in) de diâmetro externo com chanfro em V de 60° em aço API 5L Grau B equivalente ASTM A53 grau B de 15,8 mm (5/8 in) de espessura respectivamente. Foram ensaiadas 2 juntas tanto no sentido horário como anti-horário, estas com um gap variável, entre 2 e 4 mm, resultando em 4 soldas, todas na descendente. A Figura 61 ilustra bancada de experimentos.



Figura 61 – Representação da bancada de experimentos utilizada para validação do método desenvolvido.

Os ensaios consistiram em realizar aquisições com a tocha no TCP e em sequência repetir a mesma trajetória, entretanto com o STL no TCP. Assim, é possível compor as duas curvas ilustrando a influência do trilho sobre a leitura e criação da trajetória em função da defasagem existente entre o sensor e a tocha.

Por fim, foi realizada a soldagem completa do passe de raiz ao longo dos 360°, estes divididos em dois passes de 0 a 180°, utilizando o processo CCC e o método de leitura prévia da junta.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Referente à análise das folgas e velocidades dos manipuladores Tartílope e Pipeliner II

Nesta seção estão descritos os resultados obtidos por meio da análise das aquisições referentes às folgas medidas nos eixos Y e Z dos manipuladores Tartílope V3 e Pipeliner II, junto da análise da variação da velocidade dos mesmos ao longo de uma trajetória orbital.

#### 4.1.1 Resultados quanto à análise das Folgas dos manipuladores

Como visto no capítulo 3.1, para o eixo Y as medições foram divididas em avanço e recuo do mesmo e, em 3 regiões deste, sendo estas, o curso mínimo, médio e máximo.

Para o curso mínimo, se obteve um valor de folga a partir da média de 5 aquisições tanto para o avanço quanto para o recuo. Para o tartílope obteve-se um valor de folga de  $0,92 \pm 0,06$  mm, em contrapartida para o Pipeliner obteve-se um valor de  $0,40 \pm 0,09$  mm. Os Gráficos da Figura 62 ilustram as curvas médias das folgas obtidas para o curso mínimo do eixo Y.

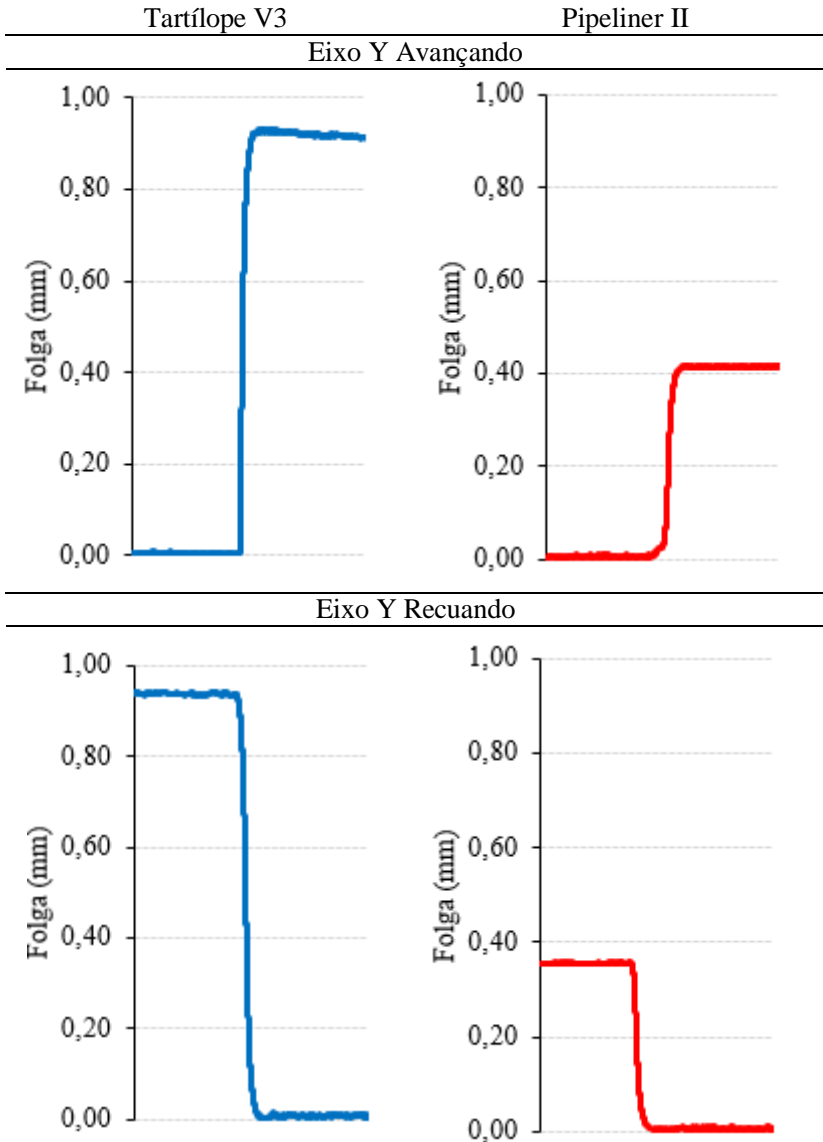


Figura 62 – Gráficos das folgas no eixo Y para o curso mínimo.

Para o curso médio, obteve-se uma folga de  $0,91 \pm 0,06$  mm para o Tartlope V3 e, para o Pipeliner II o valor de  $0,39 \pm 0,05$  mm, conforme mostram as curvas médias da Figura 63.

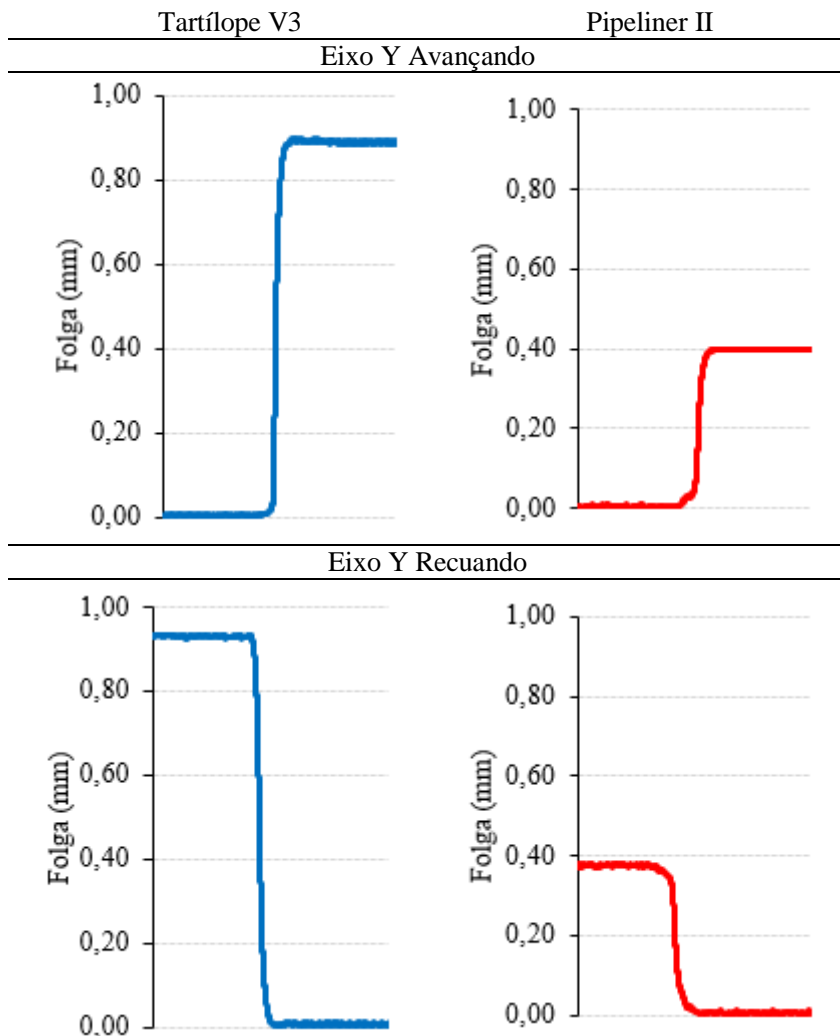


Figura 63 – Gráficos das folgas no eixo Y para o curso médio (região de operação).

Nas medições do curso máximo, obteve-se para o Tartílope V3 uma folga de  $0,90 \pm 0,06$  e para o Pipeliner II o valor de  $0,40 \pm 0,02$  mm, como está representado nos gráficos da Figura 64.

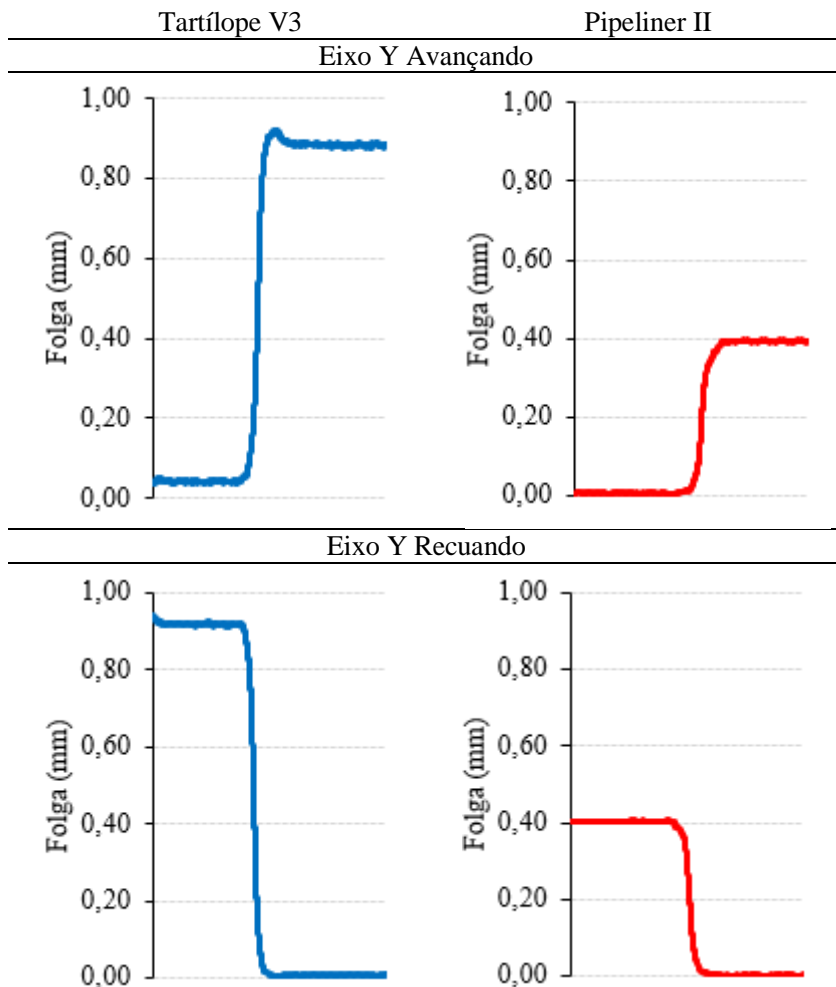


Figura 64 – Gráficos das folgas no eixo Y para o curso máximo.

Contudo, para o eixo Y pode-se observar uma estabilidade no valor da folga para as 3 regiões selecionadas e, para ambos os manipuladores. Entretanto o manipulador Pipeliner II apresentou uma

folga média para o eixo Y de  $0,40 \pm 0,1$  mm, cerca de 44% menor que a folga medida para o Tartílope V3 que foi de  $0,91 \pm 0,1$  mm.

A folga medida no manipulador Pipeliner II é influenciada em suma pelo conjunto pinhão (saída do motor elétrico) e cremalheira, em contrapartida o Tartílope V3 apresenta folga no conjunto de engrenagem que compõem a redução do motor DC utilizado, sendo este um motor PITTMAN GM8224S029 com redução de 187:1, algumas destas engrenagens são feitas com material polimérico que devido a carga sustentada na extremidade do eixo, são expostas a um torque excessivo, o que acaba deteriorando os dentes destas rapidamente e das demais que são feitas de aço. Conforme mostra Figura 65 a qual apresenta a redução do motor citado com algumas de suas engrenagens com seus respectivos dentes danificados.

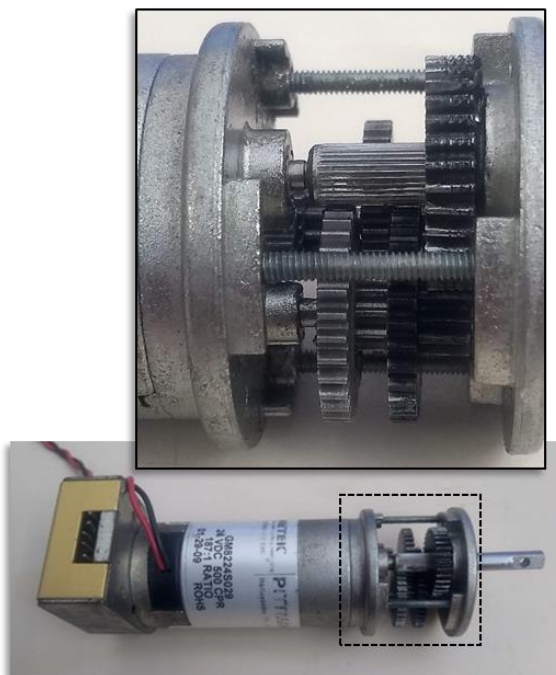


Figura 65 – Motor DC PITTMAN GM8224S029 utilizado no eixo Y do Tartílope.

Para o eixo Z, como visto no capítulo 3.1, as medições foram divididas em 3 regiões deste, sendo estas, o curso mínimo, médio e máximo, sendo executadas analisando somente recuo o do eixo, pois



verificou-se que devido à carga do próprio eixo, sobre saída do motor, tende a zerar a folga de avanço, entretanto, para o recuo, ou seja, deslocamento positivo do eixo Z, pode-se observar o efeito das folgas.

Para o curso mínimo do eixo Z, se obteve para o manipulador Tartilope V3, uma folga de  $0,36 \pm 0,02$  mm e, para o Pipeliner II o valor de  $0,53 \pm 0,04$  mm, conforme mostra a curva média na Figura 66.

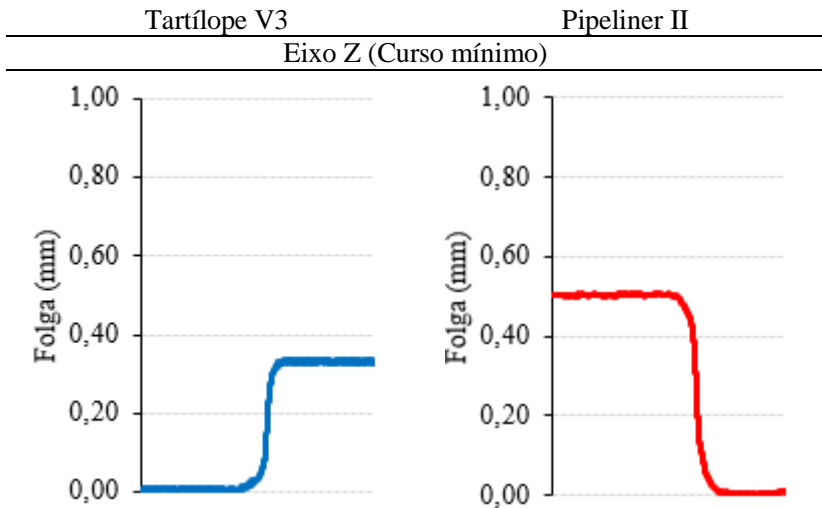


Figura 66 – Gráficos das folgas no eixo Z para o curso mínimo.

No curso médio ou região de operação, obteve-se para o Tartilope V3 um valor de  $0,35 \pm 0,02$  mm e para o Pipeliner II uma folga de  $0,54 \pm 0,04$  mm, conforme mostram os gráficos da Figura 67.

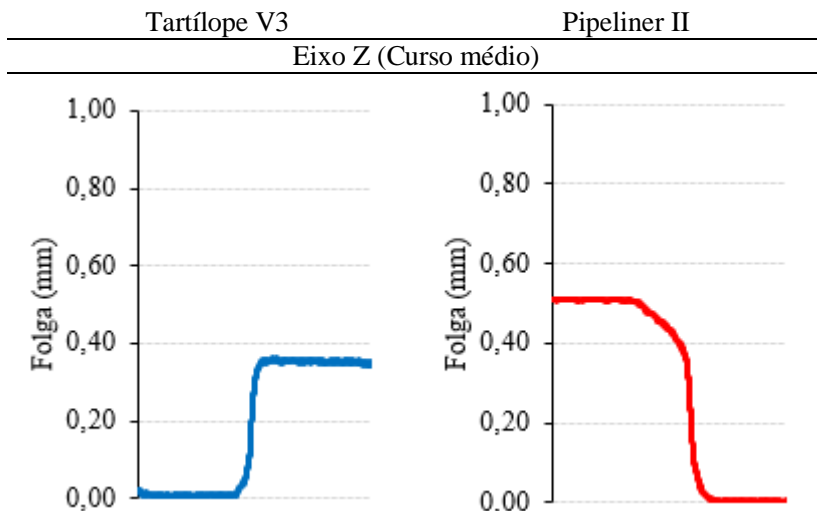


Figura 67 – Gráficos das folgas no eixo Z para o curso médio (Região de operação).

Para o eixo totalmente estendido em Z, ou seja, totalmente afastado da peça, obteve-se o valor médio de  $0,33 \pm 0,02$  mm para o Tartilope V3 e  $0,53 \pm 0,03$  mm para o Pipeliner II, estes representados pelas curvas na Figura 68.

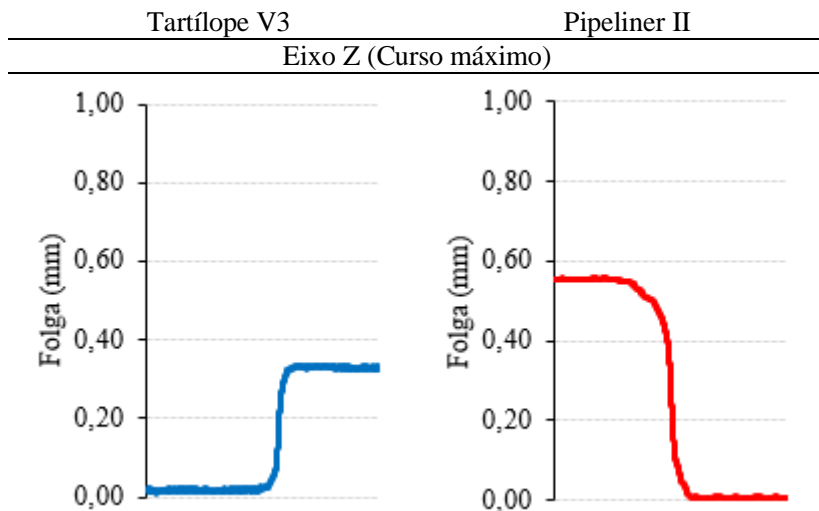


Figura 68 – Gráficos das folgas no eixo Z para o curso máximo.

Portanto, pode-se observar que para o eixo Z o manipulador tartilope V3 possui uma folga de recuo de  $0,35 \pm 0,04$  mm, cerca de 34% menor que a do Pipeliner II, que possui uma folga de  $0,53 \pm 0,06$  mm.

Contudo, verifica-se que a folga em Z, pelo seu valor, tende a não ser significativa sobre a estabilidade e ou, a trajetória necessária para o processo MIG quanto a folga em Y que influencia diretamente a posicionamento do TCP sobre o centro da junta a ser soldada, como por exemplo, para *gaps* de 1 mm a folga gerada pelo eixo Y do Tartilope V3 é cerca de 91% do valor do *gap*, o que gera uma elevada probabilidade de erro e em consequência discontinuidades no processo, mesmo este sendo assistido por um sistema de visão, como proposto no escopo desta pesquisa. Neste sentido necessita-se de uma ação corretiva para limitar a folga deste eixo.

#### 4.1.2 Resultados quanto a análise das velocidades dos manipuladores disponíveis para soldagem orbital

Como visto no item 3.1, por convenção definiu-se o eixo X como o eixo que representa o deslocamento em torno do tubo. A análise realizada neste eixo, consistiu em verificar a regularidade da sua velocidade ao longo do trecho de 0 a 180° (descendente) e de 180 a 0° (ascendente).

Inicialmente estabeleceu uma velocidade mediana para ambos os manipuladores, levando em conta a velocidade máxima do manipulador Pipeliner II que é cerca de 0,8 m/min, portanto a velocidade intermediária adotada foi de 0,4 m/min.

Nos testes verificou-se oscilações em torno desta velocidade para ambos os manipulares, entretanto para o Tartilope V3 a variação foi menor em relação ao Pipeliner II, porém os manipuladores apresentaram um valor inferior ao definido, conforme ilustra a Figura 69.

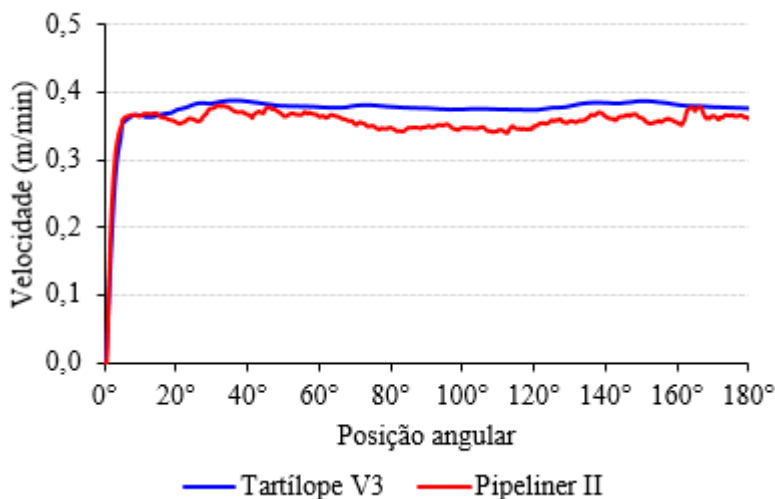


Figura 69 – Aquisição da velocidade intermediária ao longo do trecho de 0 a 180°.

O mesmo efeito foi observado para o trecho de 180 a 0°, onde o manipulador V3 em relação ao Pipeliner II apresentou maior estabilidade e regularidade na velocidade, entretanto ambos não atingiram novamente o valor estabelecido de 0,4 m/min, conforme ilustra a Figura 70.

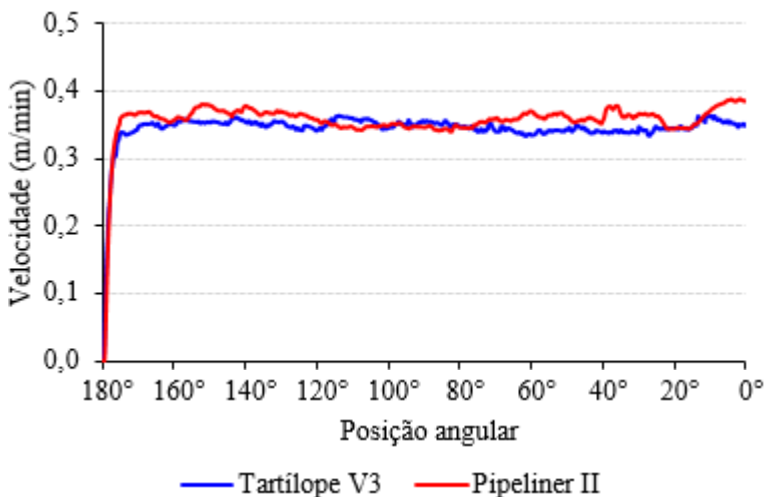


Figura 70 – Aquisição da velocidade intermediária ao longo do trecho de 180 a 0°.

Essa variação de pode estar associada ao encoder que realimenta o driver que controla o motor DC que por sua vez desloca o eixo. Como o eixo opera em malha relativamente aberta (sem *feedback*), o encoder não identifica deslizamentos, entre a roda de tração e o trilho e, muito menos folgas existentes no conjunto de engrenagens e redução presentes à frente do motor DC. Portanto estas variações tendem a ser consequências em suma destas divergências.

Entretanto a variação do V3 para o Pipeliner II no trecho de 0 a 180° foi de 5% igualmente para o trecho de 180 a 0°, traduzindo assim uma certa superioridade no controle do eixo do Tartilope V3 uma vez que, mesmo não atingindo a velocidade programada manteve uma cadência da mesma.

Além do que está discutido acima, realizaram-se testes utilizando a máxima velocidade dos manipuladores, entretanto a velocidade máxima do V3 é superior a velocidade do Pipeliner II, sendo assim, foi utilizada a velocidade máxima programável no Pipeliner II, de 0,8 m/min.

No trecho de 0 a 180° para ambos os manipuladores obtiveram o valor médio de 0,8 m/min. Porém houveram da mesma forma que no

ensaio anterior oscilação na velocidade, neste caso, mais expressivas que no caso anterior, como mostra o gráfico da Figura 71.

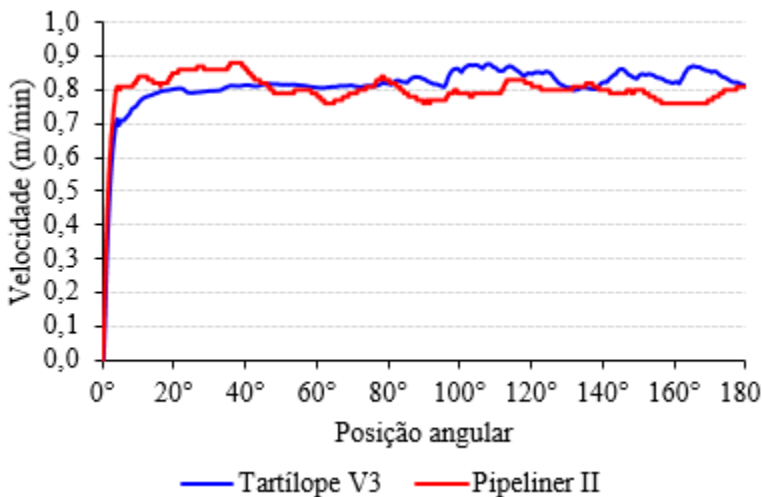


Figura 71 – Aquisição da velocidade máxima ao longo do trecho de 0 a 180°.

Entretanto para o trecho de 180 a 0° (ascendente), obteve maior estabilidade para o V3, onde o mesmo apresentou uma velocidade média oscilou em com menores variações entorno de 0,8 m/min, em contrapartida o Pipeliner II apresentou uma velocidade média 0,8 m/min, porém uma variação maior em relação ao V3, como pode ser observado na Figura 72.

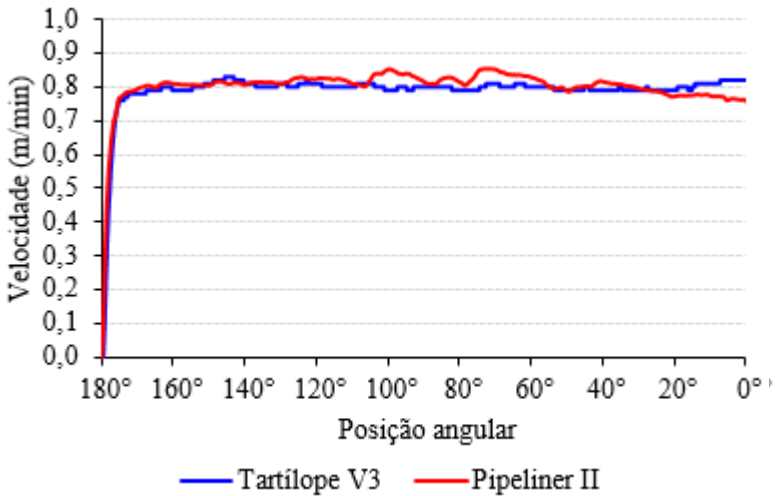


Figura 72 – Aquisição da velocidade máxima ao longo do trecho de 180 a 0°.

Com a finalidade de observar o efeito da variação da velocidade para o Tartilope, realizou-se testes utilizando sua máxima velocidade, sendo esta 1 m/min, onde obteve-se para o trecho de 0 a 180° na média esta velocidade, entretanto, com trechos de grande perturbação, como no trecho de 90° a 120° (região vertical do tubo). Para o trecho de 180 a 0° observou-se uma elevação na velocidade no trecho de 180 a 160°, onde atingiu-se o valor de 1,1 m/min, em seguida obteve estabilidade, havendo pouca variação do valor programado de 1 m/min. Conforme pode ser observado nas Figura 73 e Figura 74.

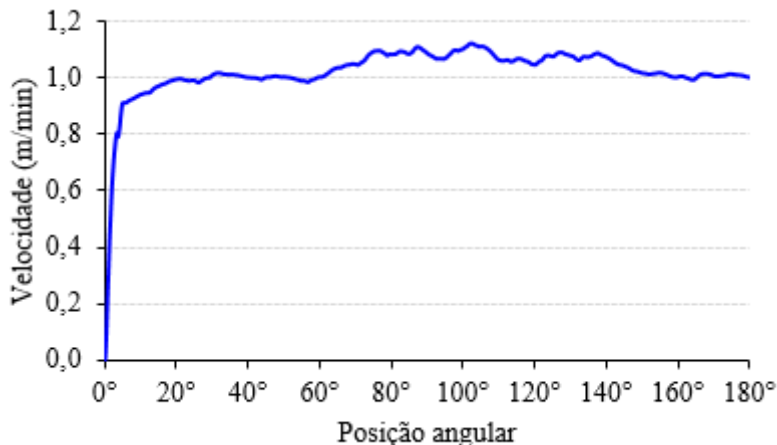


Figura 73 – Aquisição da velocidade máxima do eixo X ao longo do trecho de 0 a 180° para o Tartilope V3.

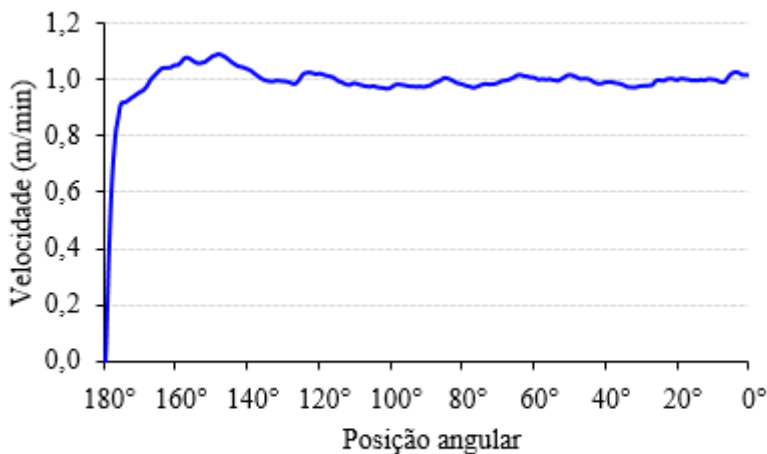


Figura 74 – Aquisição da velocidade máxima do eixo X ao longo do trecho de 180 a 0° para o Tartilope V3.

Em síntese, pode-se dizer que o manipulador Tartilope em relação ao Pipeliner II mostrou-se eficaz quanto a manutenção da velocidade de deslocamento em torno do duto, em suma pelas características construtivas tanto do trem de engrenagens como do trilho e de suas respectivas rodas.



Portanto, o Tartílope em termos de desempenho dinâmico não apresenta desconformidade em relação ao Pipeliner II para a aplicação na soldagem de dutos. Na verdade, apresenta superioridades em diversos quesitos, sendo estes, plataforma de comunicação aberta, o que é uma benesse para utilização de sensores entre outros dispositivos de monitoramento e controle de variáveis, além do dispositivo não ter uma dependência a uma marca específica de fonte de soldagem, o que possibilita a utilização de diversos processos e variantes destes, dependendo apenas de um suporte específico para a tocha de soldagem. Questões de aplicabilidade em ambientes hostis e desempenho a longa duração devem ser adicionalmente analisadas. Além do exposto, o Tartílope se trata de produto nacional, o que facilita a comunicação com fornecedor, transporte e manutenção do mesmo dentro do território nacional.

Entretanto, o manipulador Tartílope necessita de aprimoramentos no quesito “controle dos eixos”, onde há a necessidade de um sistema de realimentação, para que se minimize a influência de folgas e desgastes sobre o deslocamento dos eixos. Neste quesito mesmo apresentando essas necessidades o Tartílope se sobressai em relação ao Pipeliner, pois este se trata de um produto “engessado” onde há uma relação de dependência da fonte de soldagem e do manipulador, o que restringe a gama de alternativas que o produto pode atender no mercado consumidor.

Levando em conta o quesito supracitado, em relação a sua interdependência a fonte de soldagem, a mesma apresenta pouca acessibilidade para com o operador. Onde os ajustes disponíveis são medidas adimensionais, os quais não operam sequer em porcentagem de um valor máximo por exemplo, diferente do tartílope que apresenta um controle (*Joystick*) com menus intuitivos.

Este aspecto do Pipeliner é um limitante que dificulta o controle prévio por parte do operador, necessitando de passes em vazio, dentre outras operações de ajuste. A Figura 75 ilustra o painel de controle do Pipeliner e o controle remoto do mesmo, qual apresenta os botões disponíveis para a ajuste e suas respectivas funções, onde:

1. Ajuste da Corrente média do processo;
2. Regulagem da velocidade de deslocamento do manipulador, em uma unidade adimensional (Velocidade de soldagem);
3. Amplitude de tecimento;
4. Velocidade de oscilação da tocha (Tecimento);
5. Botão de ligar e desligar a oscilação da tocha (Eixo Y);
6. Botão de Ligar e desligar o tempo de parada da oscilação;

7. Regulagem do tempo de parada interior em ms;
8. Regulagem do tempo de parada exterior em ms;
9. Botões para o ajuste do centro da tocha (Ajuste do TCP) e ajuste fino do arco (Trim);
10. Botão de início do processo (Disparo);
11. Botão para parar o processo;
12. Regulagem da altura da tocha em relação a peça;
13. Botão de simulação da oscilação da tocha de soldagem;
14. Botão para avanço de arame eletrodo;
15. Botão para o deslocamento do manipulador em torno do duto, tanto para o sentido horário como anti-horário;
16. Ajuste fino da amplitude de oscilação;
17. Seleção do programa de soldagem previamente regulado no painel de controle, este representado pela seleção “A” qual ilustra os LEDs referentes a cada programa disponível, podendo ser utilizado um total de 4 programas de soldagem distintos;
18. Ajuste fino da velocidade de soldagem.

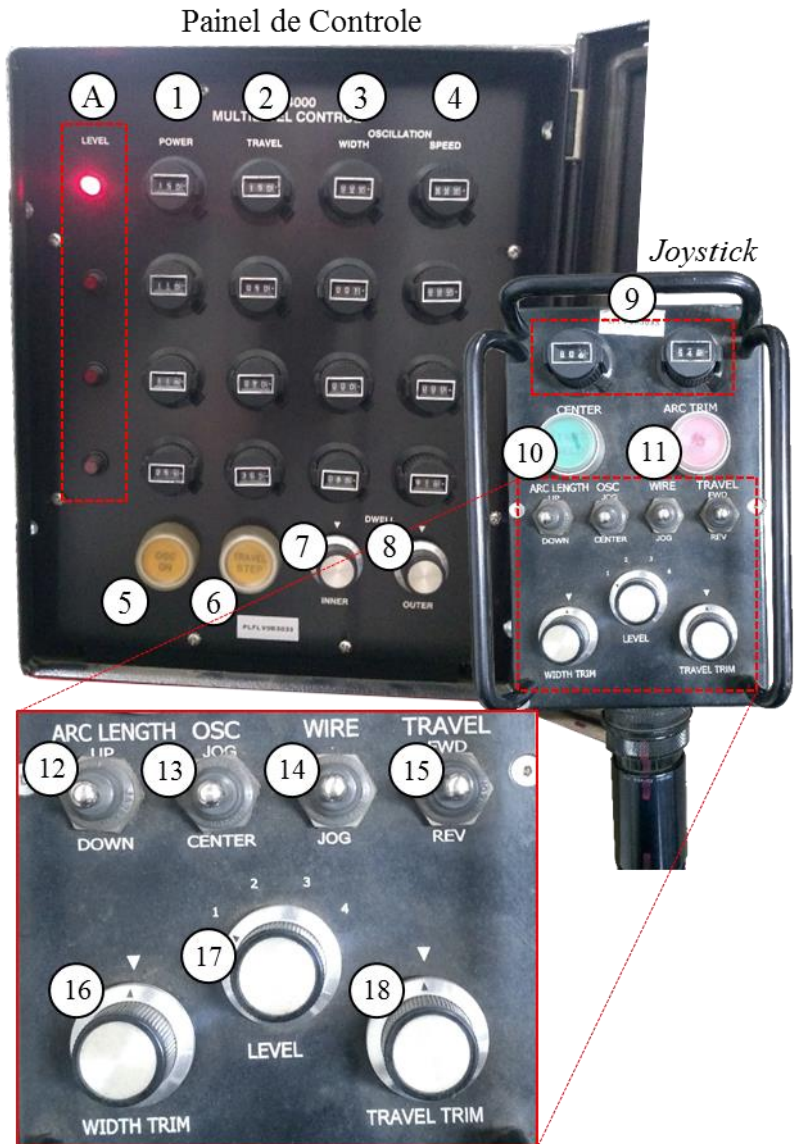


Figura 75 – Painel de Controle e Joystick do sistema Pipeliner II da Magnatec.

## **4.2 Sobre os problemas mecânicos concernentes aos manipuladores de soldagem orbital**

Nesta subseção estão descritos os principais problemas concernentes aos manipuladores destinados à soldagem orbital. Estas constatações tem embasamento levando em consideração a concepção dos projetos encontrados comercialmente, estes já citados e contextualizados na seção 2.3.

### **4.2.1 A respeito da Folga**

Como visto na seção 2.3 anterior, existem empresas que oferecem como solução para o aumento da produtividade na soldagem orbital manipuladores robóticos que orbitam o duto por meio de motores que acionam rodas, polias ou engrenagens, em contato com um trilho que é acoplado concentricamente ao tubo na região de interesse, próximo a junta.

Em geral, estes sistemas citados apresentam como maior problema folgas, que tendem a aumentar com o uso devido ao desgaste das partes móveis que ficam em constante contato.

A folga é uma não linearidade, causada por espaços entre as partes de um sistema mecânico. Pode-se defini-la como a distância máxima ou o ângulo através do qual qualquer parte de um sistema mecânico pode ser movido em uma direção sem aplicar força considerável ou movimento na próxima parte deste mesmo sistema. Como é mostrado no conjunto de engrenagens na Figura 76, que em alguns casos onde se necessita de precisão e repetibilidade, pode limitar significativamente o desempenho e o controle destes sistemas mecânicos [45].

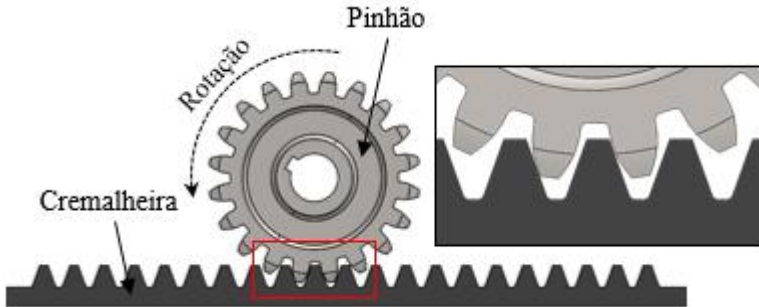


Figura 76 – Representação de uma folga em um conjunto de engrenagens de dentes retos.

A folga causa atrasos, oscilações e imprecisões, sendo comum em componentes como atuadores e conexões mecânicas. Esta não linearidade acontece ainda de forma indireta, em sistemas mecânicos em que o motor não está diretamente ligado ao movimentado [46].

Como visto, a folga é um problema presente na maioria dos equipamentos que possuem partes móveis, em alguns casos pequenas folgas são permissíveis para diminuir o atrito e o esforço sobre essas partes, ou o erro associado à folga está dentro do permissível para aplicação.

O erro aleatório causado pela folga em relação a atividade desejada pode ser extremamente prejudicial para a soldagem automatizada, principalmente quando o controle do conjunto motor e engrenagens dos eixos é feito por sistemas *off-board* ao manipulador, como sensores por exemplo, pois em alguns casos a região a ser soldada (*gap*) pode ser tão pequena quanto o valor da folga, o que ocasiona em um erro considerável ao processo.

A folga é um problema progressivo ao longo de tempo, uma vez que o desgaste das partes móveis é contínuo e, um sistema com *feedback* a frente das reduções do motor, tenderia a auxiliar na correção desta divergência, pois em tese o controlador sempre saberia a posição exata do eixo, independente da folga [47].

Nos manipuladores de soldagem orbital, a folga tende a influenciar diretamente sobre as variáveis de movimentação, onde devido aos pontos mortos entre os contatos mecânicos dos componentes de transmissão, são gerados atrasos e por sua vez, erros.

No caso do eixo Y (oscilação/tecimento) é perceptível o efeito sobre a amplitude oscilação, conforme mostra a Figura 77. Esta ilustra a diferença entre a amplitude programa e lida pelo drive de controle do

motor e a amplitude resultante no eixo, lida externamente com auxílio de um transdutor linear. Pode-se notar que há uma diferença significativa entre as curvas, onde o erro aproxima-se de 50% e tende a aumentar em função da frequência utilizada, devido a inércia e efeito retroativo sobre a inversão de movimento sobre o conjunto de redução do motor elétrico do eixo.

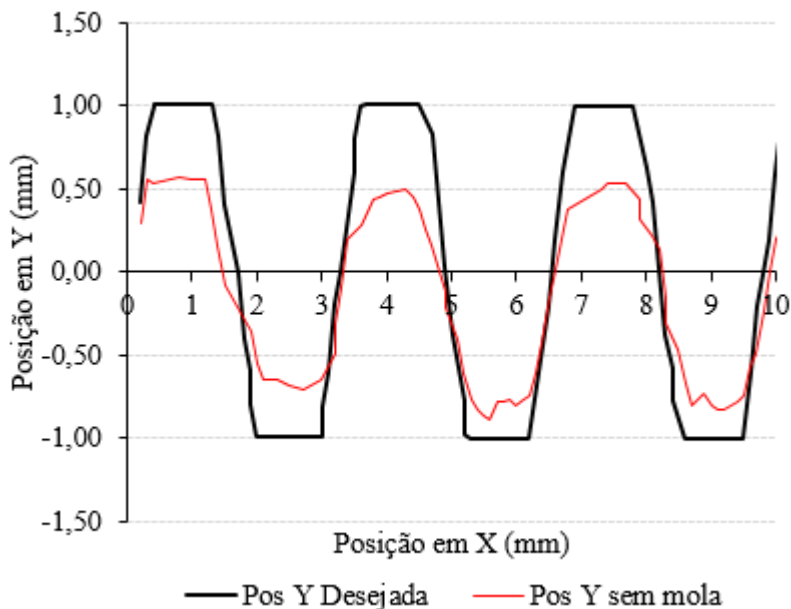


Figura 77 – Gráfico de amplitude programa e amplitude executada pelo eixo Y, para uma frequência de 1 Hz, amplitude de 2 mm e tempo de parada de 0,3 ms.

Para o eixo X o efeito da folga tende a não ser expressivo, pois no instante em que se inicia o movimento o próprio peso do manipulador tensiona o trem de engrenagens da redução do motor do mesmo e a minimiza, tanto para deslocamento de 0 a 180°, como de 180 a 0°. O efeito de maior significância neste eixo, ocorre pelos deslizamentos das rodas sobre o trilho, causados em suma, por deformações no trilho, que ora tensiona e ora distensiona a presilha que fixa o manipulador sobre o trilho, causando pequenos solavancos e perturbações no mesmo, interferindo na velocidade de deslocamento, sendo esta uma variável importante para a soldagem orbital.

Contudo, essa associação de erros, tanto vindos das folgas quanto dos desvios associados ao trilho, interferem diretamente sobre no

controle e localização correta do TCP em torno do duto durante a operação.

#### 4.2.2 A respeito dos desvios gerados pelo trilho

Os trilhos utilizados pelos manipuladores destinados a soldagem orbital, em geral, apresentam imperfeições oriundas do próprio processo de fabricação, estas podendo ser, por exemplo: abaulamentos, empenamentos, ondulações, entre outros defeitos superficiais, que são prejudiciais ao processo. A Figura 78 ilustra dois estados de posicionamento em função a imperfeições, onde a Figura 78a apresenta um estado de desvio em Z+ devido a uma flexão no trilho e, na Figura 78b se tem a representação de um desvio em Y+ e Z+ devido a torção no trilho. Estes efeitos podem ser combinados ao longo de uma trajetória e, somados aos desvios gerados pelo tubo.

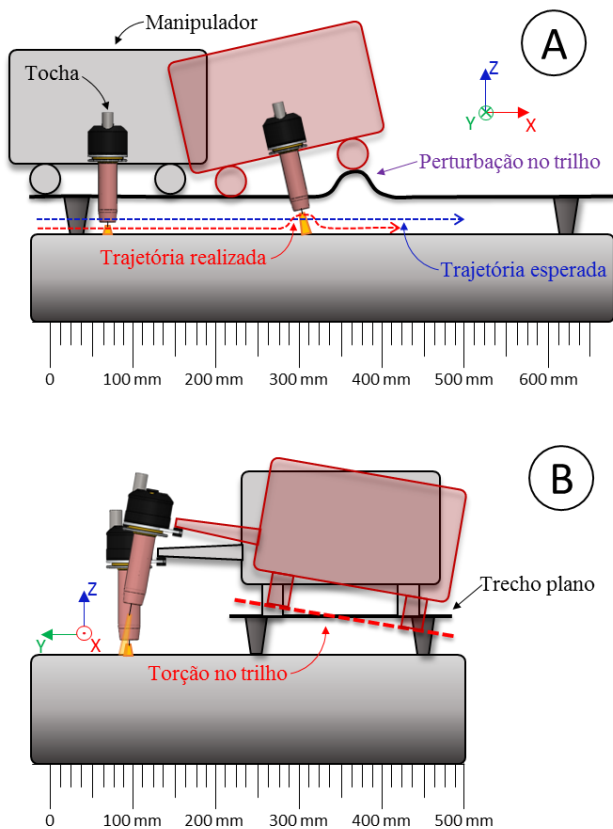


Figura 78 – Representação do efeito das imperfeições do trilho sobre a posição do TCP da tocha de soldagem.

No caso dos sistemas convencionais semiautomatizados, ou seja, sem controle de trajetória ou posição, estas imperfeições não são significativamente prejudiciais, pois o operador consegue compensar manualmente observando o processo, como mostra o esquema da Figura 79, qual ilustra correção do eixo Z devido ao efeito da flexão.



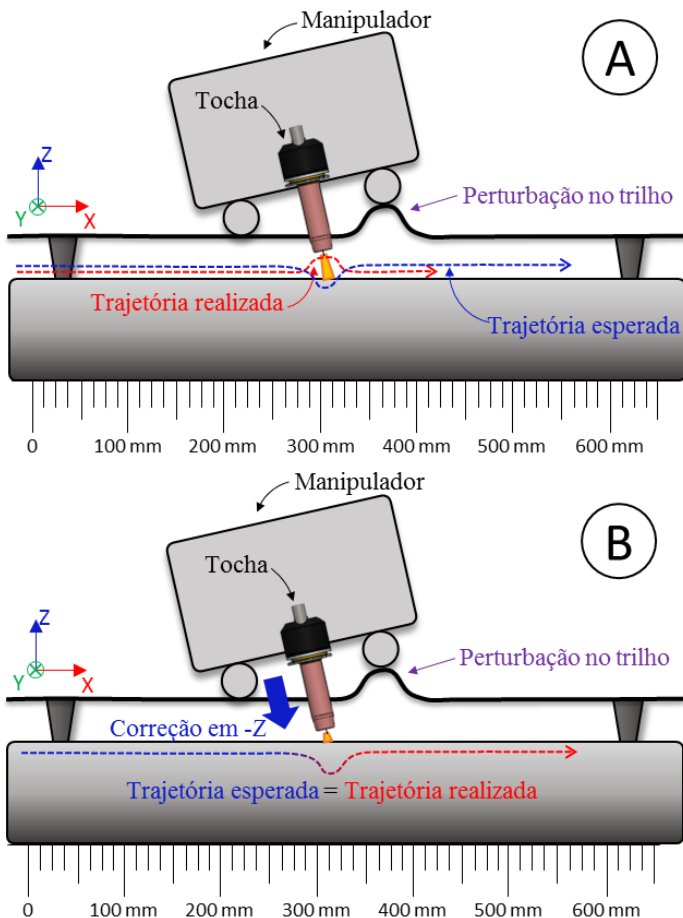


Figura 79 – Representação do efeito da flexão sobre o trilho junto a trajetória corrigida.

Entretanto a correção tende a ser mais difícil a medida que as imprecisões sobre o processo acumulam. A Figura 80, ilustra a compensação de um desvio gerado por torção, onde se tem a atuação sobre dois eixos, Y e Z.

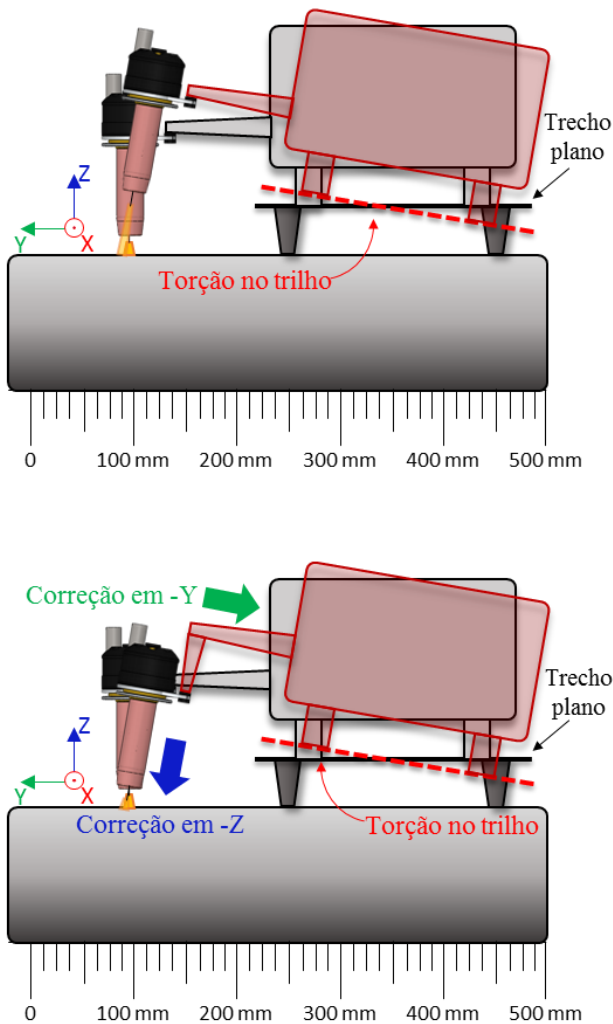


Figura 80 – Representação do efeito da torção no trilho, junto a sua correção.

Como visto, a soldagem adaptativa procura emular os movimentos precisos de um operador em um manipulador robótico, corrigindo divergências online. Para que isto seja possível, além de um sensor adequado necessita-se de um manipulador adequado, com precisão e exatidão suficientes para oferecer repetibilidade e robustez ao processo.

O sensor até então mais adequado para a soldagem adaptativa, é o sensor de triangulação Laser, conforme já discutido no item 2.4 e como mostram os trabalhos supracitados. Porém como visto, para estes sensores é inviável posicioná-lo diretamente sobre o arco elétrico, ou seja, diretamente sobre o TCP (ponta do eletrodo da tocha). Sendo assim, devido ao *offset* utilizado entre a tocha e o STL para o funcionamento adequado do mesmo, se tem a propagação dos desvios oriundos do trilho sobre a leitura do sensor, gerando assim, o somatório de mais um erro à cadeia de erros, naturalmente existentes no sistema.

A Figura 81 esboça esquematicamente o desvio gerado pela composição de irregularidades do trilho e *offset* de medição sobre a leitura do sensor, onde:

- a) Representa um estado onde não há desvios associados ao trilho e, a correção realizada pelo sensor ocorre utilizando apenas a peça como referência, ou seja, localizando e seguindo um TP definido, independentemente de sua posição sobre a peça, este caso representa, portanto, uma condição ideal.
- b) Apresenta uma condição onde se tem uma interferência gerada pelo trilho. Neste caso, pode-se observar que a posição da tocha de soldagem sofre uma alteração, alterando seu TCP em relação ao que o sensor definiu em função do TP lido. Adjacente a isto se tem uma alteração no TP do sensor, onde se tem uma variação na posição angular do mesmo, gerando assim um desvio em  $X+$  e  $Z+$ , o que proporciona uma geração de trajetória equivocada, uma vez o desvio não foi gerado pela peça, ou seja, a referência do sistema. Neste caso a trajetória desejada, seria uma atenuação no exato momento em que a tocha começa a desviar em  $Z+$ , entretanto, isto não é possível devido ao *offset*, qual torna invisível este tipo de desvio.
- c) Neste ponto, devido ao erro no cálculo da trajetória, que por parte do algoritmo responsável, identificou um afastamento da peça e, definiu uma correção em  $Z-$ , qual gerou uma colisão, uma vez que, como citado o ponto de referência para a medição foi a peça.

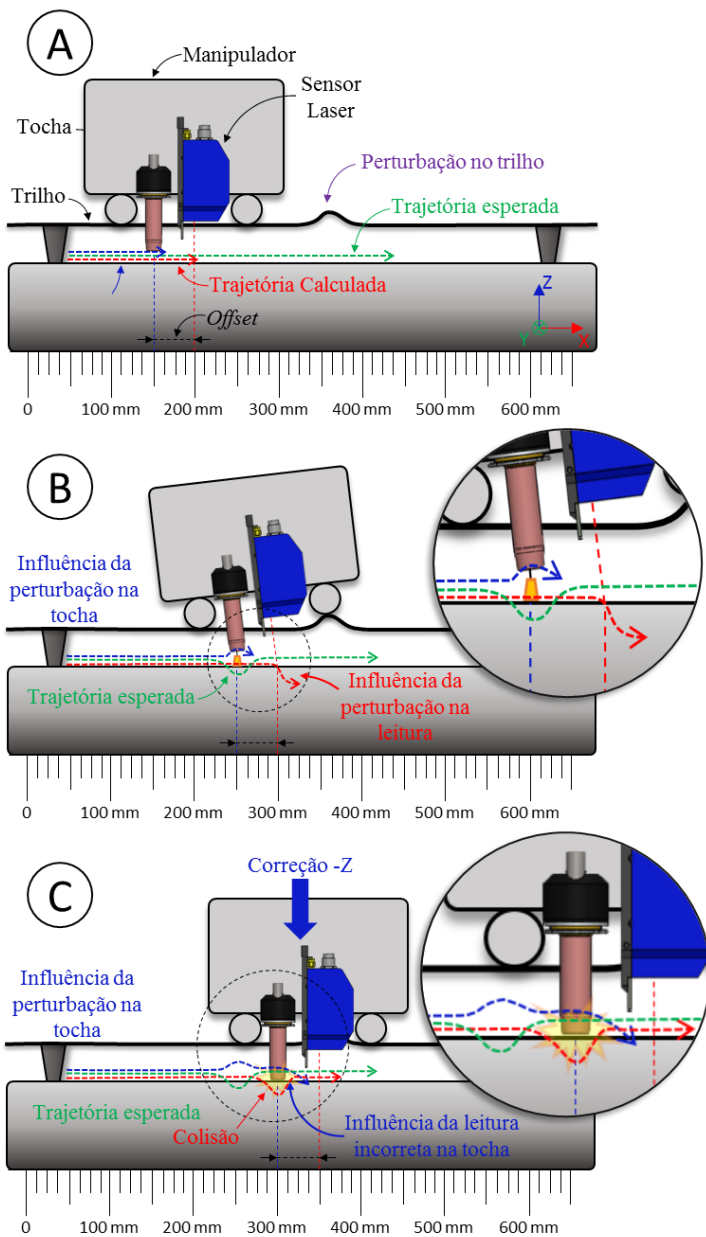


Figura 81 – Representação dos desvios gerados na leitura do sensor devido ao trilho.

Portanto, pode-se observar que um pequeno desvio no trilho, gerou dois erros críticos na execução da trajetória. Este efeito não se limita apenas a este caso, como apresentado, este problema é progressivo e acumulativo e, envolve não apenas este modelo e, sim uma infinidade de divergências físicas que possam estar presentes no sistema.

Como visto, devido ao *offset* este problema é invisível ao algoritmo, uma vez que a linha laser não possibilita sua visualização próximo ao TCP, devido ao arco elétrico [30] [36]. Entretanto, uma alternativa é compensar estes desvios observando a junta pela perspectiva da tocha (TCP), ou seja, substituindo fisicamente a tocha de soldagem pelo sensor Laser, colocando-o no TCP. Assim é possível obter o comportamento real do mesmo, levando em conta os desvios do trilho e do sistema como um todo. Com isto, gerar ações corretivas. Neste sentido, este trabalho concentrou-se em desenvolver esta técnica, a qual será descrita nos capítulos a seguir.

### **4.3 Adequações físicas realizadas no Tartilope V3**

#### **4.3.1 Resultados quanto à seleção da tocha e criação do mecanismo para acoplamento dos periféricos**

Como visto na seção 3.2.1 a seleção da tocha de soldagem concentrou-se em alguns critérios, levando em conta principalmente o seu tamanho e sua compatibilidade com a variante CCC do processo MIG/MAG.

Neste sentido, três modelos de tocha foram avaliados segundo os critérios supracitados. Dois destes modelos estão disponíveis comercialmente, sendo estes da marca TBI. O primeiro modelo é a tocha manual MIG/MAG TBI 360 Expert GL, que é largamente utilizada como um modelo *standard* em algumas marcas de fontes de soldagem comercializadas no Brasil, como por exemplo, IMC, ESAB, V8 Brasil e Balmer, dentre outras. Este modelo de tocha é um modelo semiautomático com acionamento por botão. A mesma possui um ângulo de 50° no pescoço da tocha, segundo informações do seu *datasheet* [48].




O segundo modelo avaliado é a tocha TBI 360 Aut. Este modelo é um modelo de tocha automático, comumente aplicado em processos com manipulador robótico, de acordo com seu *datasheet* [49].

O terceiro modelo de tocha, é um protótipo desenvolvido pelo LABSOLDA junto à empresa SPS, modelo demonimado TMC 2 (Tocha

MIG compacta), onde seu principal diferencial é sua compacidade em relação aos demais modelos disponíveis no mercado, além de possibilitar o uso de consumíveis como bico de contato, porta bico, difusor de gás e bocal genéricos (modelo base TBI), o que melhora sua manutenibilidade.

Demais informações de cunho técnico estão descritas na Tabela 4, onde se tem informações quanto a faixa de operação, modo de refrigeração, tipo de conexão para com a fonte de soldagem e capacidade de operação.

Tabela 4 – Modelos de tochas selecionados para o possível uso na soldagem orbital adaptativa [48] [49] [50].

Tocha	Descrição
	<p><b>TBI 360 Expert GL</b>  Corrente máxima: 330 A  Refrigeração: Ar  Conexão: Euro Connector  Suporta bicos de contato de Ø 1,0 a 1,6 mm  Duty cycle: 60% 10 mín</p>
	<p><b>TBI 360 Aut</b>  Corrente máxima: 330 A  Refrigeração: Água  Conexão: Euro Connector  Suporta bicos de contato de Ø 1,0 a 1,6 mm  Duty cycle: 60% 10 mín</p>
	<p><b>SPS TMC 2</b>  Corrente máxima: 500 A*  Refrigeração: Água  Conexão: Euro Connector  Suporta bicos de contato de Ø 1,0 a 1,6 mm  Duty cycle: 100% 10 mín**</p>

\* Corrente máxima suportada pelo cabo de corrente, este sendo do modelo TBI 511 E, conforme ilustra o *datasheet* do fabricante [50].

\*\* *Duty cycle* levando em conta o estabelecido pelo *datasheet* do cabo de corrente supracitado.

Com base nas descrições morfológicas e técnicas supracitadas e, também levando em conta a marca do manipulador Tartflope V3, optou-se pela utilização da tocha modelo SPS TMC 2, a qual por também ser um protótipo, oferece a possibilidade de alteração de algumas partes para facilitar sua aplicabilidade para com o método desenvolvido para a soldagem orbital utilizando o Tartflope V3 e o sensor Laser.

Inicialmente procurou-se criar um método de fixar o sensor Laser próximo a tocha. Neste sentido, alterou-se um dos anéis que a compõem, este responsável por auxiliar na troca térmica, exercendo o papel de aleta. Foram criados dois flanges, um em cada lado, conforme mostra a Figura 82, qual apresenta o estado inicial e o estado final da aleta após a alteração.

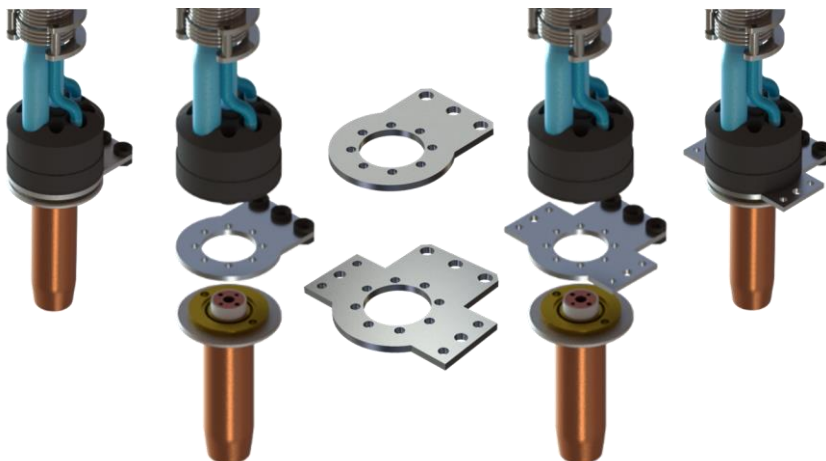


Figura 82 – Representação em CAD da alteração realizada na aleta para acoplamento do sensor Laser.

Além da alteração da aleta da tocha, foi criado um suporte em alumínio para acomodar o sensor e também acoplá-lo à tocha de soldagem, seguindo as especificações técnicas do sensor, as quais sugerem que para o melhor funcionamento das leituras geométricas exercitadas pelo mesmo, este deve estar sempre perpendicular à peça. Sendo assim, levando em consideração o diâmetro do tubo estudado, este de  $\varnothing 16$  in e, a distância entre a tocha e peça, verificou-se um ângulo de  $12,5^\circ$  entre a tocha e o sensor, para manter o sensor sempre normal a um plano tangente ao tubo.

Entretanto levando em conta que esta pesquisa se concentrou em desenvolver a metodologia e não o sistema propriamente dito, se verificou que o suporte, limitou-se a tubos de  $\varnothing 16$  in, o que sugere que para sua aplicação em outros diâmetros deve-se: recalcular o ângulo do suporte e conseqüentemente, fabricá-lo ou desenvolver um sistema com ângulo ajustável.



A Figura 83 ilustra o suporte e sua montagem junto ao STL. Esta concepção de suporte facilita a inversão de lado do sensor, facilitando a execução do processo de ambos os lados do duto, uma vez que a soldagem é feita em duas partes de 180° respectivamente, além disto possibilita a alteração da altura absoluta do sensor em relação a peça.

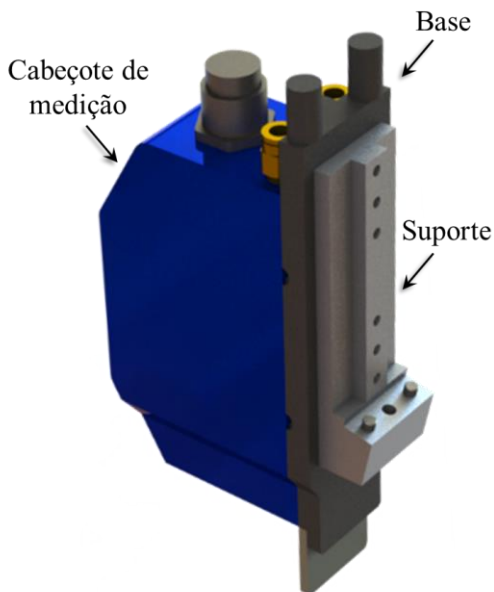


Figura 83 – Representação em CAD do suporte montado ao STL.

Partindo da premissa inicial, a qual visa estudar o método de leitura previa com a STL no TCP, criou-se um dispositivo que possibilita a substituição da tocha pelo sensor (Figura 84), esta peça possui três estágios, onde:

1. Tocha no TCP;
2. Laser no TCP (Para soldagem no sentido horário);
3. Laser no TCP (Para soldagem no sentido anti-horário).

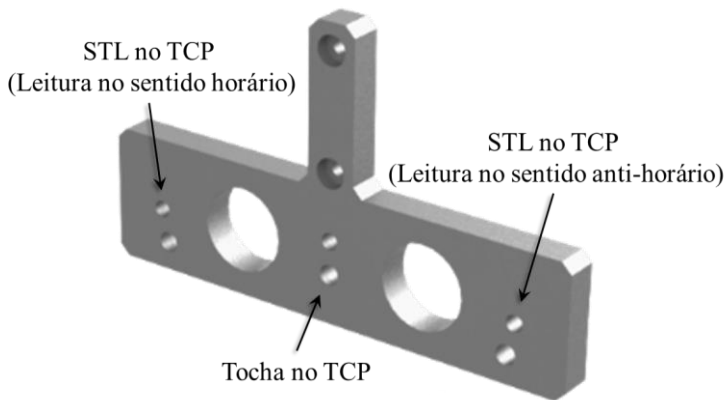


Figura 84 – Representação em CAD da peça de ajuste do TCP.

A fixação do conjunto tocha/sensor na peça de ajuste do TCP, é feita por meio de uma peça de acoplamento, que apresenta um furo para passagem de um parafuso de fixação e um eixo guia, conforme mostra a Figura 85.

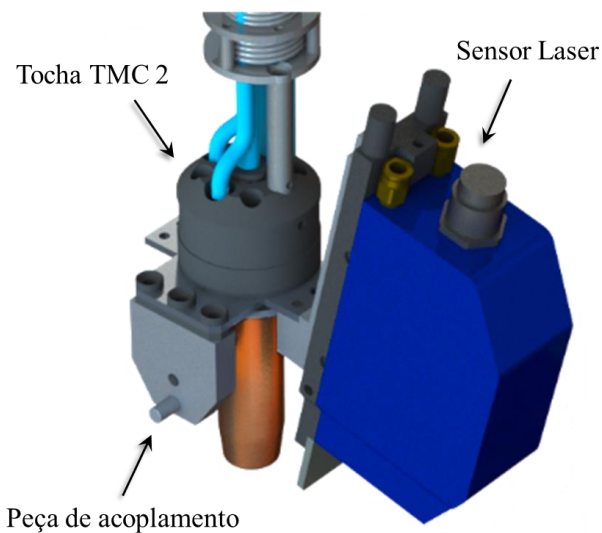


Figura 85 – Representação em CAD da peça de acoplamento montada ao conjunto Tocha/Laser.

Com isto, obteve-se um suporte de tocha/Laser bastante rígido, sem a presença de folgas. A montagem global do sistema pode ser observada na Figura 86 que ilustra uma vista isométrica do conjunto.

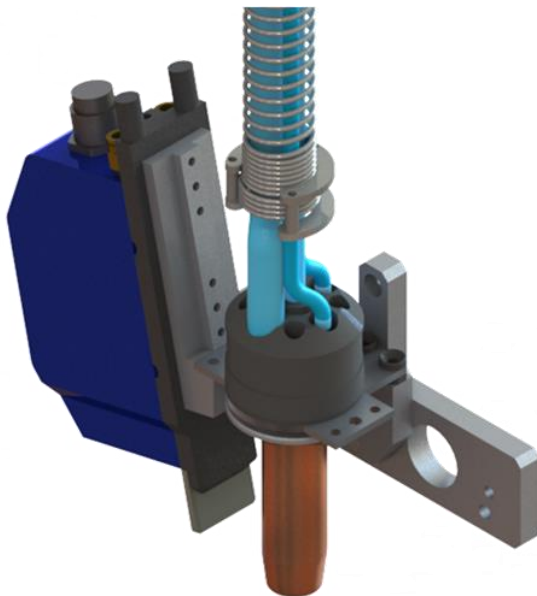


Figura 86 – Representação em CAD da montagem do conjunto Tocha/Laser.

Outra adequação física foi a criação e instalação de um dispositivo de fixação do mangote da tocha de soldagem, sendo este fixado na parte traseira do manipulador. O dispositivo que prende o mangote e os demais cabos que compõem a tocha formando um arco sobre o mesmo. Para a fabricação deste suporte foi utilizado como matéria prima Nylon.

Esta adequação auxiliou na diminuição do peso relativo do mangote sobre TCP, uma vez que se tem 2 pontos de fixação sobre o mesmo, além de limitar as curvas do mangote próximas a tocha, o que tende a diminuir os desvios causados no arame. Na Figura 87 se tem a representação em CAD do mesmo.

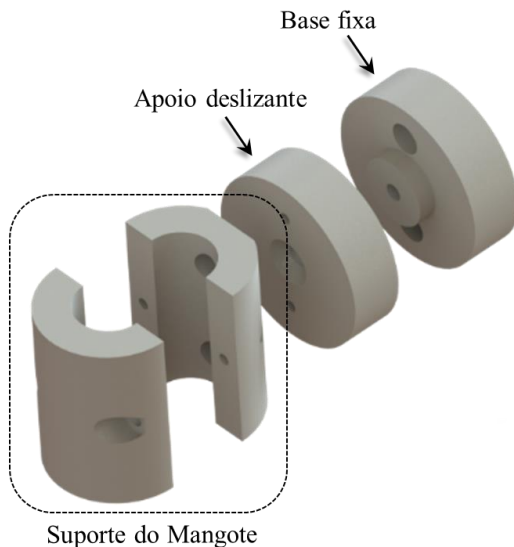


Figura 87 – Vista explodida do suporte do mangote.

Contudo, levando em conta as dimensões da tocha e a possibilidade de alteração de uma de suas partes (Aleta), atingiu-se um dos objetivos específicos inicialmente propostos, o qual concentrou-se em criar um suporte de tocha (Inclui o suporte do mangote) que beneficiou não somente a metodologia proposta, mas também ofereceu rigidez aos seus periféricos possibilitando uma maior estabilidade aos mesmos. Visto isto, se tem as Figura 88a e Figura 88b que, apresentam a aparência final do manipulador após a montagem dos acessórios.

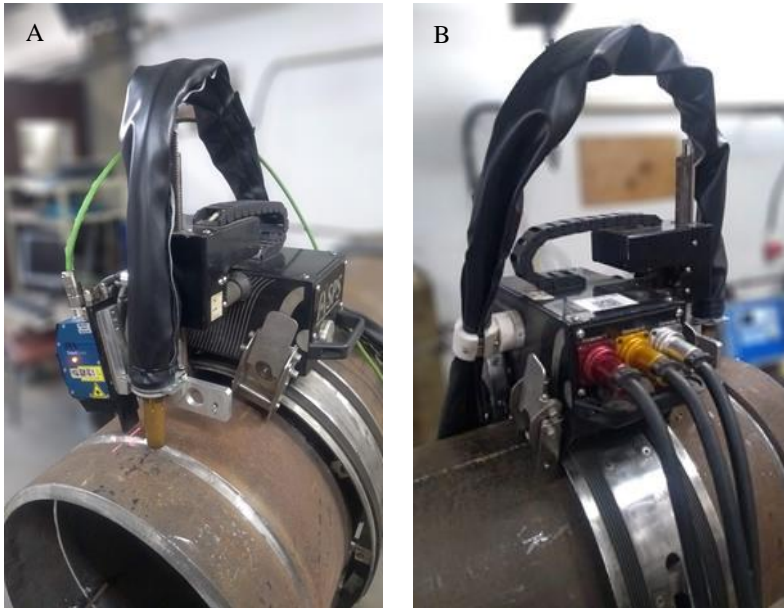


Figura 88 – Aparência final do manipulador após a montagem dos acessórios (Tocha, STL, Suporte da tocha e do mangote).

#### 4.3.2 Resultados quanto a ação corretiva para limitação da folga no eixo Y do manipulador

Para a limitação da folga no eixo Y do manipulador, foram levantadas duas possibilidades, sendo uma delas, a criação de um controle em malha fechada com um encoder utilizado como *feedback*. Entretanto esta alternativa por envolver diversas áreas de conhecimento e, demandar um estudo prolongado, como um estudo posterior, dando continuidade a esta pesquisa.

A alternativa adotada é uma atuação mecânica sobre o eixo Y, a partir da inserção de uma mola entre a carcaça do manipulador e o fim do eixo Y, como mostra a Figura 89.

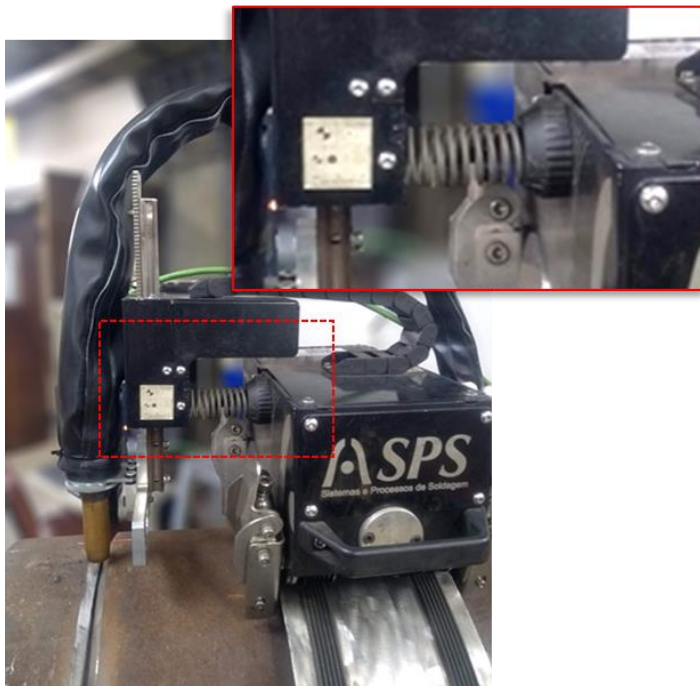


Figura 89 – Esquema de posicionamento da mola no manipulador para limitação da folga em Y.

Para validar este modo de limitação da folga foram feitos ensaios de oscilação utilizando um sensor linear, seguindo o método descrito na seção 3.2.2. Os ensaios foram divididos em duas partes, com e sem mola. Ambos os ensaios foram feitos com uma amplitude de 2 mm, frequência de oscilação de 1 Hz e tempo de parada de 0,5 ms. Procurou-se utilizar uma amplitude baixa com afim de provocar a folga, uma vez que a mesma foi mensurada com um valor médio de 0,9 mm.

O gráfico da Figura 90, ilustra a aquisição obtida com os ensaios, onde se tem a posição em Y desejada, sendo essa a posição que o controlador do motor DC (*driver*) enviou ao mesmo, onde pode-se observar um regularidade e periodicidade entre os ciclos. No gráfico que representa a aquisição da posição em Y sem a mola pode-se observar uma variação global de 0,8 mm entre o valor lido e o valor nominal (lido no *driver*), o que corrobora com os ensaios realizados analisando a folga do manipulador, apresentando uma diferença de 0,1 mm, o que pode ter

relação a histerese, uma vez que a mesma não foi considerada nos ensaios de medição das folgas.

No ensaio com a mola, pode-se observar uma maior coincidência dos períodos com o desejado, contudo, percebe-se ainda pequenas oscilações, na casa do décimo de milímetro, o que em termos globais não compromete significativamente a amostra.

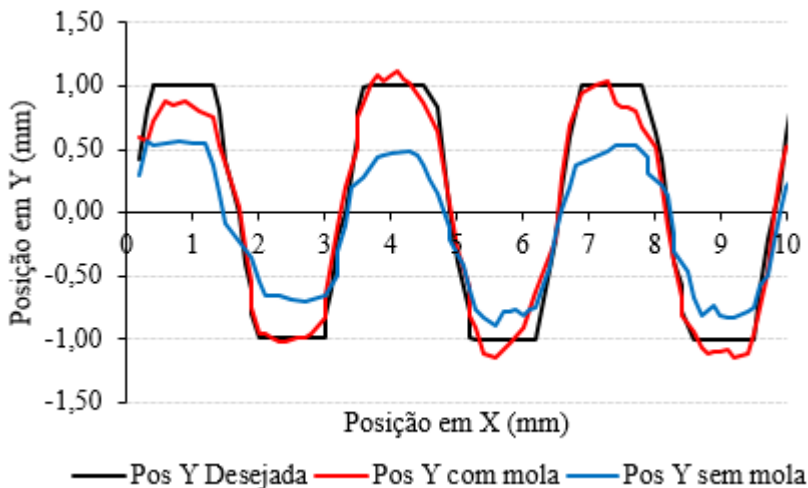


Figura 90 – Gráficos da posição em Y com e sem a mola para a limitação da folga.

#### 4.4 Critérios de avaliação e qualificação dos parâmetros de soldagem

Nesta subsecção estão descritos os resultados obtidos por meio da análise e interpretação dos dados coletados para definição da estabilidade dos processos. Os parâmetros foram baseados no que está descrito por Kindermann [6]. Estes foram divididos em dois conjuntos, um de menor energia para aberturas maiores que 2,5 mm e inferiores a 4,5 mm e, um de maior energia para aberturas da raiz inferiores ou iguais a 1 mm. A seguir estão descritas as correções e melhorias realizadas no formato de onda, a fim de melhorar a qualidade e estabilidade do processo.

Para a compreensão das regiões que compõem o formato de onda do processo CCC se tem a Figura 91, a qual exibe a nomenclatura de cada região, corroborando com a Figura 4.

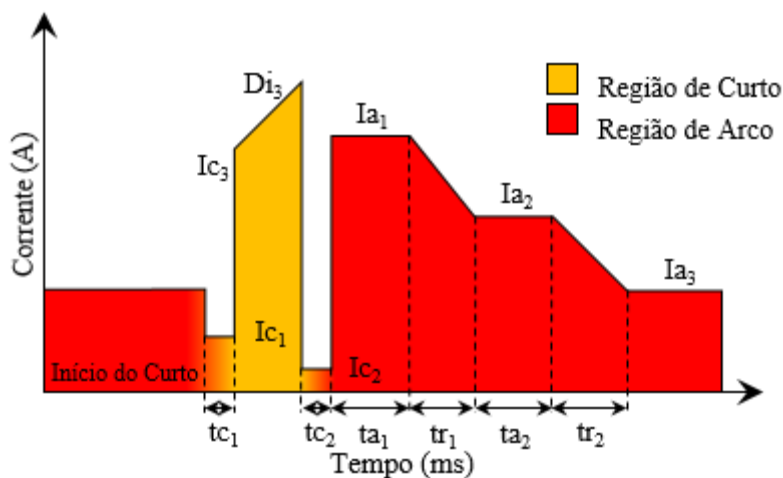


Figura 91 – Representação das regiões de corrente do formato de onda típico do processo CCC.



A seguir breve detalhamento das regiões marcadas na representação da Figura 91:

$I_{c1}$ – Corrente de Curto 1 (A);	$t_{c1}$ – Tempo de Curto 1 (ms);
$I_{c2}$ – Corrente de Curto 2 (A);	$t_{c2}$ – Tempo de Curto 2 (ms);
$I_{c3}$ – Corrente de Curto 3 (A);	$t_{a1}$ – Tempo de Arco 1 (ms);
$I_{a1}$ – Corrente de Arco 1 (A);	$t_{a2}$ – Tempo de Arco 2 (ms);
$I_{a2}$ – Corrente de Arco 2 (A);	$t_{r1}$ – Tempo de Rampa 1 (ms);
$I_{a3}$ – Corrente de Arco 3 (A);	$t_{r2}$ – Tempo de Rampa 2 (ms).
$Di_3$ – Derivada da corrente (A/ms);	

Como citado, se tem dois conjuntos de parâmetros elétricos para o CCC, que atendem os requisitos estabelecidos de soldagem fora de posição e junto disso raízes com variações em sua abertura, alterando apenas os parâmetros de movimentação, sendo estes discutidos do capítulo 4.4.3. A Tabela 5 ilustra as variáveis elétricas descritas por Kindermann [6].

Tabela 5 – Variáveis elétricas descritas por Kindermann [6] para o processo CCC.

a) Parâmetro de menor energia ( $V_a - 3,2$ m/min $I_m - 100$ A)												
Período de Curto-Circuito						Período de Arco						
$I_{c1}$	$t_{c1}$	$I_{c2}$	$t_{c2}$	$I_{c3}$	$Di_3$	$I_{a1}$	$t_{a1}$	$I_{a2}$	$t_{a2}$	$I_{a3}$	$t_{r1}$	$t_{r2}$
38	0,5	38	*	265	70	300	1,5	-	-	65	0,5	-
b) Parâmetro de maior energia ( $V_a - 5$ m/min $I_m - 150$ A)												
38	1	38	*	265	70	330	1,5	150	4,5	120	1,5	1,5

\*Calculado por meio do algoritmo da fonte que identifica o destacamento através da variação da  $U_{cc} = 10V$  (Tensão de Curto-Circuito) e do  $KR = 0,6$  (Coeficiente de Destacamento).

Nas subseções a seguir estão descritos de forma detalhada os resultados obtidos por meio da análise e modificação das variáveis elétricas e movimentadas atribuídas ao processo de soldagem adotado nesta pesquisa. Vale salientar que os parâmetros descritos por Kindermann [6] sofreram alterações quanto a estabilidade devido a atualização realizada no algoritmo de controle da fonte de soldagem Digiplus A7, que comprometeu os ajustes inicialmente realizados pelo mesmo.

O algoritmo que controla a corrente da variante CCC do processo MIG, opera a partir da constante leitura da tensão do processo. Sendo

assim, verificou-se que a região mais sensível está associada a região de curto, onde se tem um algoritmo específico para prever a reabertura do arco elétrico, que funciona a partir de uma tensão de referência ( $U_r$ ), em geral programada na fonte, cerca de 10V. Por meio da leitura desta tensão, que traduz a formação de um contato físico entre poça de fusão e arame eletrodo, o algoritmo compreende este curto e, entra neste laço de controle. O mesmo coleta leituras de tensão e os armazena em um *buffer*, formando uma amostra de 'n' valores, na sequência é calculada a média desta amostra e guardado o valor em uma variável ' $A_n$ '. Neste sentido, são feitas médias de 'n' amostras, que são comparadas aos pares, quando a diferença entre a amostra atual ( $A_n$ ) com a amostra anterior ( $A_{n-1}$ ) for maior de um coeficiente programado ( $K_r$ ) a fonte entende que a ruptura da ponte metálica é iminente, assim o algoritmo impõe a queda de corrente sobre a fonte. Identificando a subida da tensão, para um valor acima de 10 V o algoritmo assume que houve a reabertura do arco e impõem os valores programados de corrente para os patamares de arco [11] [13] [51]. A Figura 92 ilustra esquematicamente a da leitura da tensão durante a fase de curto-circuito.

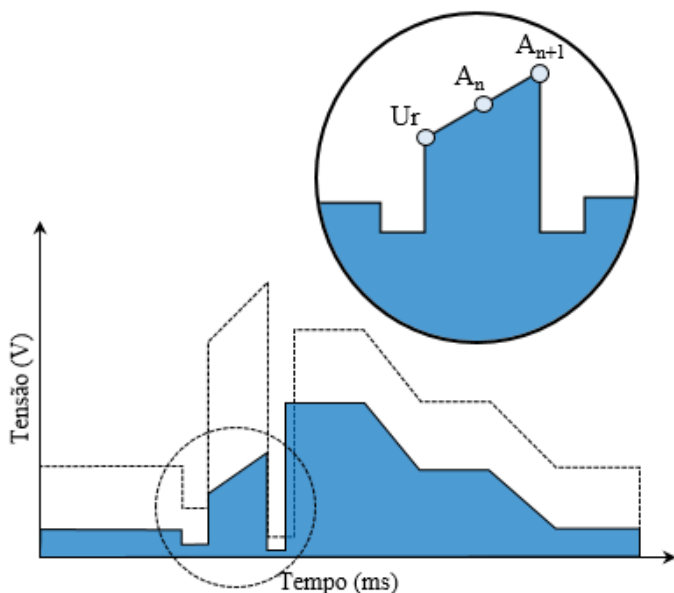


Figura 92 – Esquema de leitura de tensão pelo algoritmo de controle da versão CCC do processo MIG.

Caso contrário, e o curto dure mais que o previsto o algoritmo impõe um pulso de corrente pré-programado para ruptura da ponte metálica, entretanto está ação tende a ocasionar um colapso da ponte metálica e como consequência o efeito explosivo com emissão de respingos, indesejável no caso do CCC [51].

A questão analisada, diz respeito ao número de leituras de tensão realizadas para encher o *buffer*, que passaram de 13 para 6 leituras, onde com 13 leituras o tempo aproximado era de 150  $\mu$ s por amostra, passando para 75  $\mu$ s, ou seja, menos da metade do tempo para coletar e gerar uma amostra, com isso é possível realizar mais interações e consequente se ter um controle mais sensível. Visto isto, é possível compreender a instabilidade encontrada quando utilizado os parâmetros descritos por Kindermann [6]. Contudo, foi possível identificar a origem da instabilidade e atuar sobre a mesma, conforme será discutido a seguir.

#### 4.4.1 Parâmetro de menor energia

Para o formato de onda de menor energia, composto pelas variáveis elétricas descritas na Tabela 5a, este com uma corrente média com cerca de 100 A e uma velocidade de arame de 3,2 m/min, foram feitos ensaios em corpos de provas conforme descrito anteriormente. A partir destes ensaios puderam ser coletados os dados elétricos do formato de onda descrito por Kindermann [6], por meio do SAP e comportamento da transferência pela filmagem em alta velocidade. Neste formato de onda notou-se a geração de respingos, incomum para a variante CCC, além de oscilações na frequência de destacamento, o que tende a prejudicar a estabilidade e conseqüentemente a qualidade da solda. Este efeito advém da leitura da tensão e controle da reabertura do arco por parte do algoritmo da fonte.

O oscilograma apresentado na Figura 93 ilustra um trecho com 3 períodos onde se tem um destacamento e reabertura do arco com uma corrente elevada no tempo de 15 ms, esse fenômeno é repetitivo ao longo de todo o oscilograma.

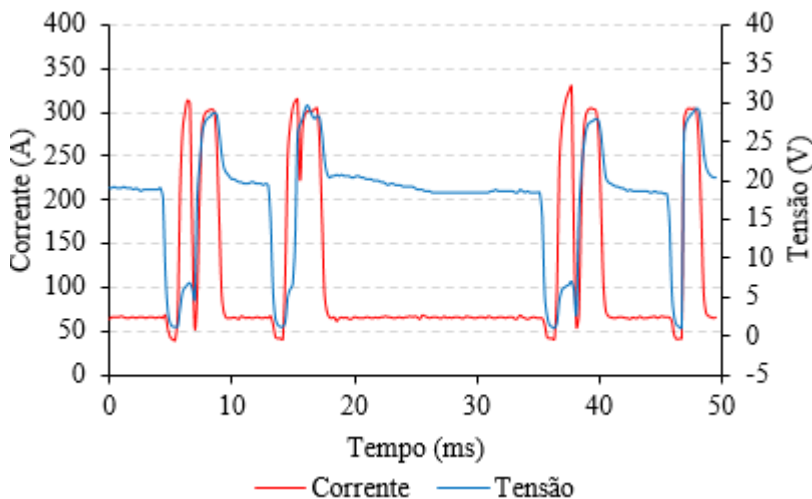


Figura 93 – Oscilograma do processo CCC descrito por Kindermann [6] (Parâmetro de menor energia).

Esse efeito pode ocorrer devido à oscilação da poça de fusão, uma vez que o formato de onda não possui a região descrita como a região de amortecimento, após o pulso de corrente em sequência ao destacamento [13] [51]. Esse fenômeno pode ser comprovado através da filmagem em alta velocidade. Os frames a seguir apresentam o efeito de oscilação seguido de um curto prematuro, onde:

- a) Aproximação da gota formada da poça fundida;
- b) Contato suave da gota com a poça de fusão;
- c) Estricção da ponte metálica (efeito pinch);
- d) Rompimento suave da ponte metálica, reabertura do arco em uma corrente elevada gerando exacerbada pressão sobre a poça de fusão;
- e) Início da propagação da oscilação na poça de fusão;
- f) Oscilação positiva da poça de fusão;
- g) Contato prematuro da gota em formação;
- h) Rompimento da ponte metálica e formação de filamento;
- i) Expulsão do filamento na forma de respingo.

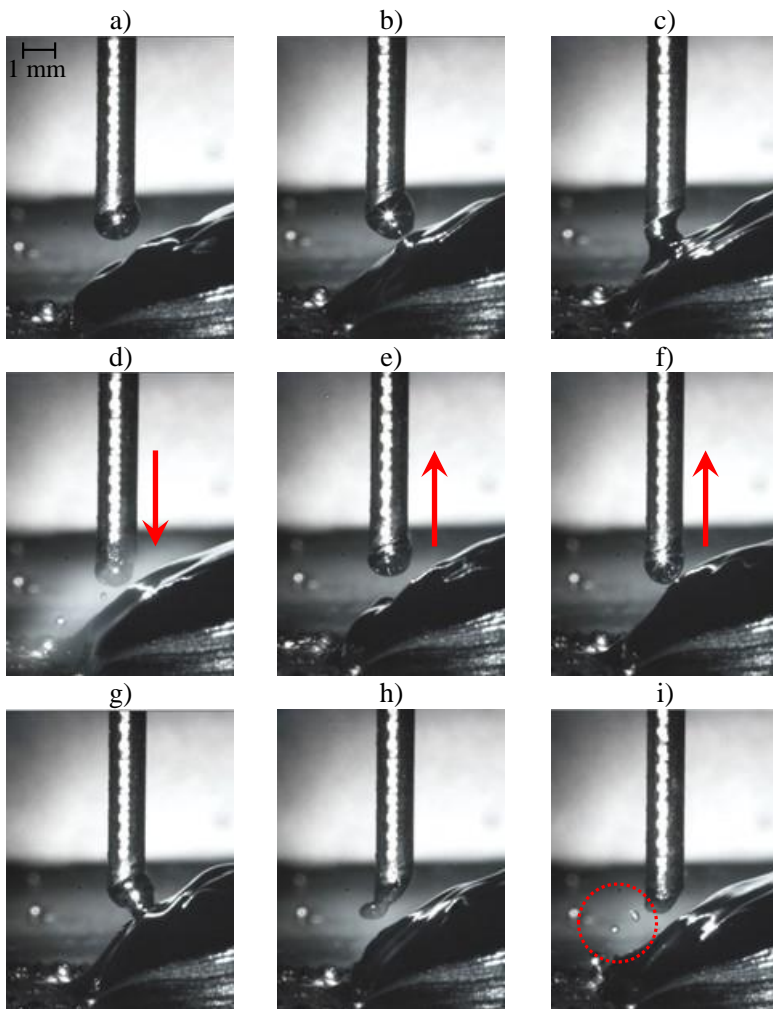


Figura 94 – Imagens referentes a aquisição via filmagem em alta velocidade do fenômeno de oscilação da poça de fusão e curto-circuito prematuro, para o parâmetro de menor energia.

Acredita-se que o efeito de oscilação da poça se dá em decorrência da pressão exercida pelo arco durante sua reabertura em uma corrente e potência elevada, oriundo da taxa estriccionamento aplicada sobre a ponte metálica. Neste sentido a poça tende a se movimentar emulando um sistema massa mola, como mostra as imagens “d”, “e” e “f” da Figura 94.

Após o destacamento e durante a formação de uma nova gota, que por não ter atingido o diâmetro de trabalho, entre 1,15 mm e 1,25 mm e devido a oscilação da poça, junto da taxa de estrição elevada, gera-se um curto prematuro o qual devido à sua duração, dificulta a atuação do algoritmo de controle, o que por sua vez gera um efeito em cadeia que tende a instabilizar toda a operação, gerando além incidência de respingos e fumos, defeitos no cordão de solda. Considerando a taxa de estrição linear, estimou-se por meio da medição frame a frame da filmagem em alta velocidade que para esta taxa de corrente de 70 A/ms, a taxa de estrição foi de 2,5 mm/ms.

Por meio destas constatações, verificou-se a potência de reabertura e comparando-a com a potência de contato (Início de curto), se observou uma diferença grande, onde devido aos curtos prematuros, se tem uma reabertura do arco com uma potência de cerca de 8000 W, sendo 800 vezes maior que potência de contato, com cerca de 100 W, conforme mostra a Figura 95.

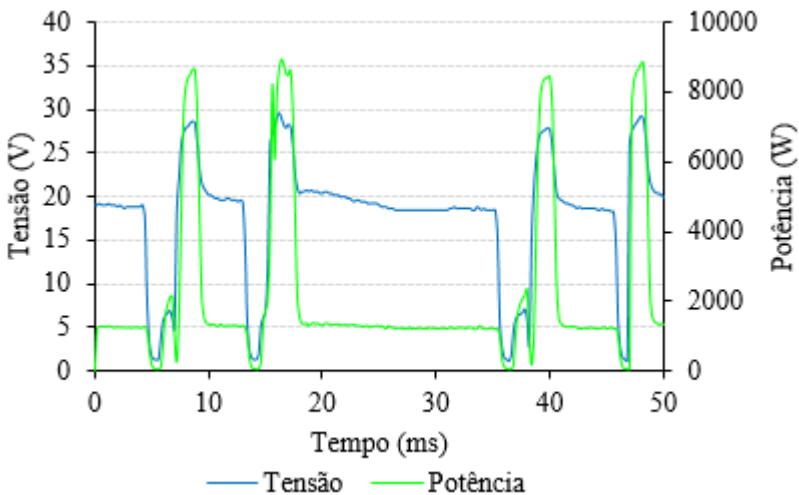


Figura 95 – Potência instantânea do parâmetro de menor energia.

A medida corretiva adotada foi atuar principalmente na derivada da corrente, diminuindo-a para melhorar a atuação do algoritmo de controle e, conseqüentemente realizar a reabertura com uma potência baixa, próxima a potência de início do curto, com isto, se tem a expectativa de diminuir a oscilação da poça e a taxa de estrição da ponte metálica.

Em consequência destas divergências constatadas neste formato de onda, tem-se a instabilidade do processo como um todo, qual pode ser avaliada de forma qualitativa por meio do ciclograma, sendo este representado pela Figura 96. No ciclograma é possível verificar as irregularidades típicas de um processo em maioria estável, entretanto com períodos de instabilidade.

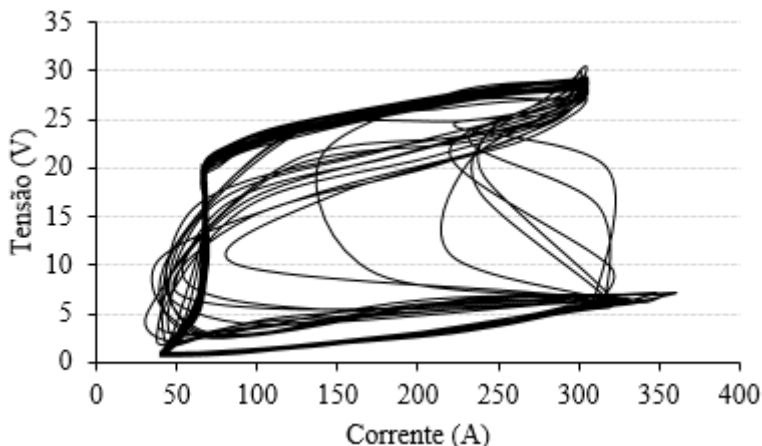


Figura 96 – Ciclograma do conjunto de parâmetros do formato de onda de menor energia descrito por Kindermann [6].

A análise do histograma de curto, mostra uma descontinuidade quanto ao seu valor de permanência em curto-circuito, variando entre 2,4 e 3,0 ms, como mostra o gráfico da Figura 97, o que colabora com a hipótese inicialmente proposta, qual se tem curtos prematuros que consequentemente provocam a instabilidade encontrada no processo. Em média os curtos têm duração de 2,86 ms, desvio padrão de 1,46 ms e desvio padrão relativo de 23%.



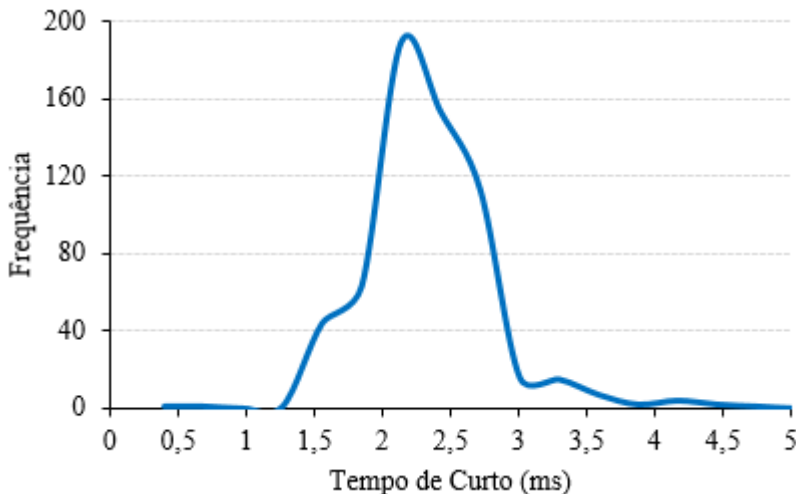


Figura 97 – Histograma de tempo de permanência em curto para o parâmetro de menor energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos.

Em relação ao tempo de permanência com o arco aceso, pode-se observar da mesma forma que no tempo de permanência em curto, variações, como é apresentado no histograma da Figura 98, qual exibe uma formato bimodal. Da mesma forma que comprovado por Kindermann [6], esta distribuição representa em parte a oscilação da poça de fusão, corroborando com os dados iniciais quais estão descritos pelas filmagens em alta velocidade.

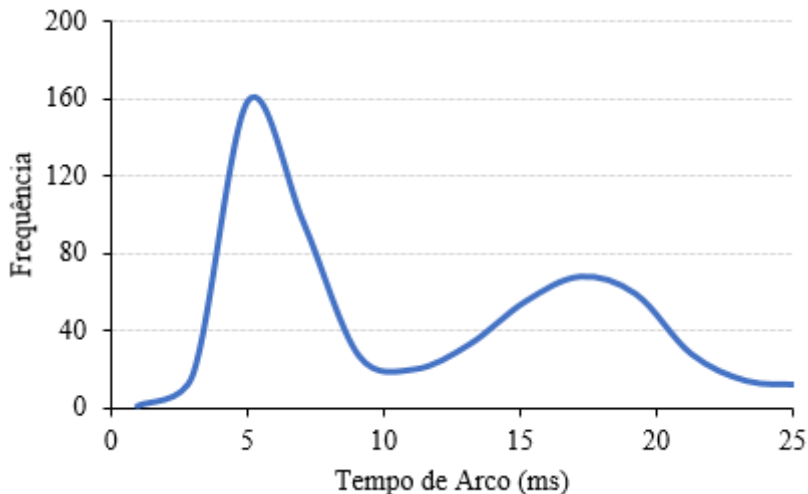


Figura 98 – Histograma de tempo de permanência com arco aceso para o parâmetro de menor energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos.

Com base nos dados coletados referente ao comportamento físico do processo, foi possível prover medidas corretivas a fim de atenuar e melhorar a estabilidade do processo. A Tabela 6 expõem as variáveis elétricas com destaque para as variáveis alteradas.

Tabela 6 – Variáveis elétricas para o parâmetro de menor energia com destaque aos parâmetros alterados

Período de Curto-Circuito						Período de Arco						
Ic <sub>1</sub>	tc <sub>1</sub>	Ic <sub>2</sub>	tc <sub>2</sub>	Ic <sub>3</sub>	Di <sub>3</sub>	Ia <sub>1</sub>	ta <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	ta <sub>2</sub>	Ia <sub>3</sub>	tr <sub>1</sub>	tr <sub>2</sub>
38	0,5	38	*	265	50	300	1,5	-	-	65	0,5	-

\*Correção do KR para valor de 1,25.

Para os parâmetros de menor energia a medida corretiva adotada foi diminuir a Di<sub>3</sub> de 70 para 50 A/ms o que resultou em uma taxa de estrição de 2,1 mm/ms, diminuindo 15% da taxa de estrição, com isto foi possível adquirir um nível de estabilidade maior, uma vez que se tem um período maior de estabilização e estrição da ponte metálica, o oscilograma obtido com isso é ilustrado pela Figura 99. Não buscou-se alterar o diâmetro da gota, uma vez que este valor de 1,2 mm comportou-se bem fora posição, como será visto a posteriori e, corrobora com Scotti [10] que estabelece que um bom limite de

operação é utilizar diâmetros de gota com valores menores ou iguais ao diâmetro do eletrodo.

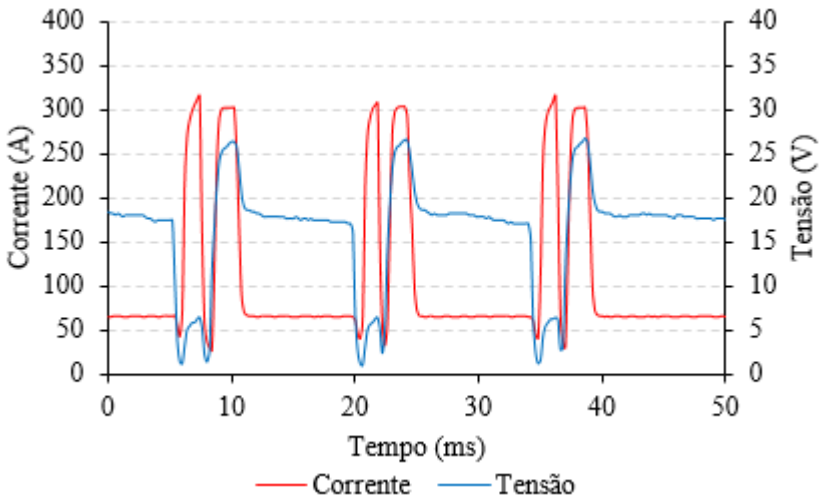


Figura 99 – Oscilograma do formato de onda de menor energia após as melhorias.

Com diminuição da derivada de corrente, obteve-se o esperado, onde se tem uma diminuição significativa da potência na reabertura, corroborando com o que Silva [11] e Gohr [51] discutem em suas pesquisas. A Figura 100 ilustra o gráfico da potência em relação a tensão, mostra a reabertura com um potência baixa.

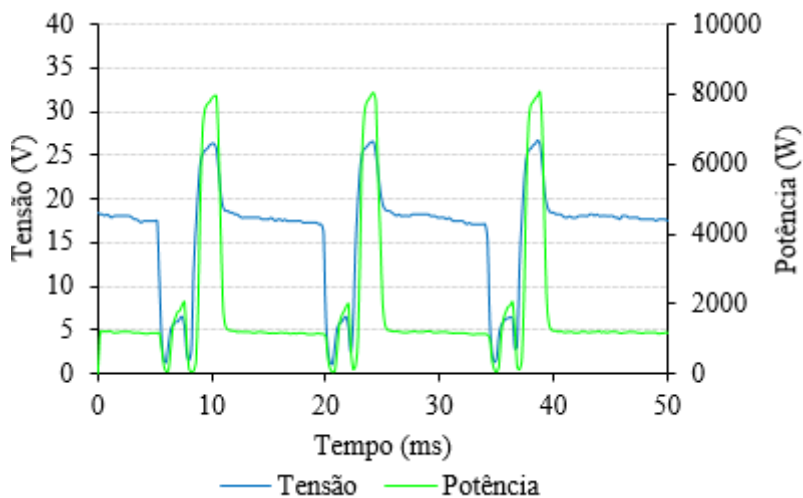


Figura 100 – Potência instantânea do parâmetro de menor energia após as modificações.

O ciclograma descrito na Figura 101, ilustra a coincidência e regularidade obtida com a melhoria do formato de onda de menor energia.

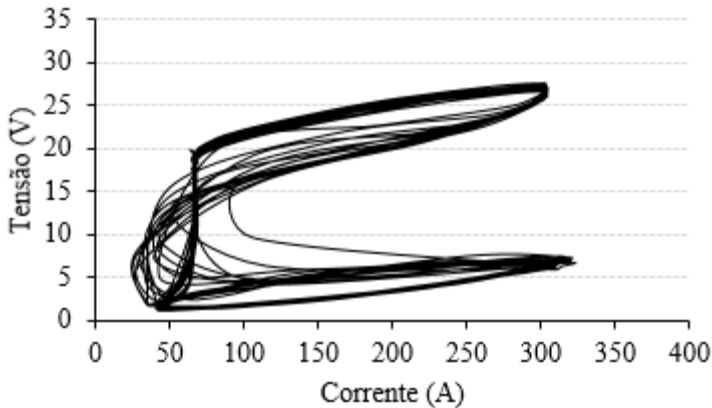


Figura 101 – Ciclograma referente ao conjunto de parâmetros de menor energia após a melhoria.

Além do ciclograma se tem o histograma de tempo de permanência em curto-circuito, o qual apresenta uma distribuição normal (Gaussiana) com uma média de 2,5 ms, desvio padrão de 0,87 ms e um desvio padrão relativo de 34,8%, conforme mostra a Figura 102.

Neste se tem o tempo de 2,5 ms como o de maior incidência, o que expressa um grau de repetibilidade entre os tempos de curto circuito maior em relação ao mostrado na Figura 97 que apresenta um histograma com períodos de curto maiores, que oscilam de 2,4 a 3,0 ms. Corroborando com o que descreve Scotti [10] a respeito do desvio padrão relativo, onde os dados que apresentarem um percentual maior tendem a refletir um processo instável, entretanto o mesmo também apresenta uma situação que o desvio padrão relativo não reflete corretamente a estabilidade do processo, semelhantes a este caso, o mesmo salienta a importância de analisar o processo como um todo, utilizando outras ferramentas de análise, pois as vezes este método pode não ser adequado.

Esta variação no tempo de permanência em curto pode ser determinante no que diz respeito à estabilidade, sabendo que o rompimento da ponte metálica com correntes altas além de gerar respingos e fumos, geram grandes amplitudes de oscilação na poça de

fusão, fenômeno este que pode ser observado no histograma de tempo permanência em arco e na filmagem de alta velocidade [6] [10].

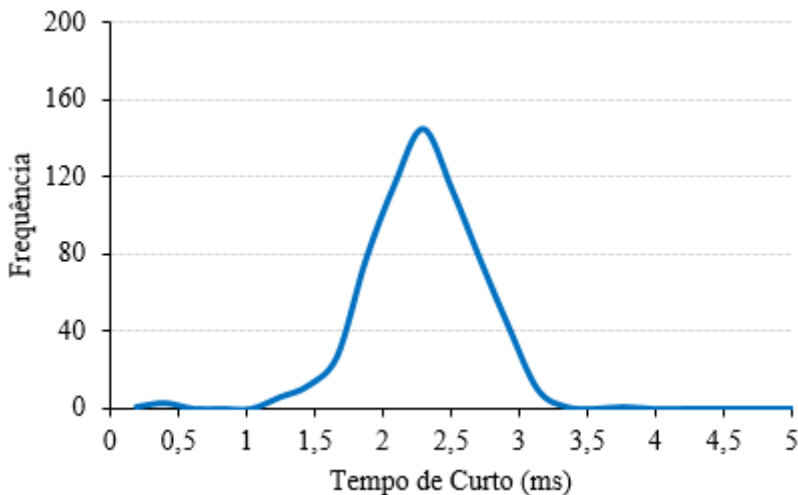


Figura 102 – Histograma de tempo de permanência em curto para o parâmetro de menor energia após as correções, para um período de 10 segundos.

Além da regularidade nos tempos de duração do curto, obteve-se uma melhora nos períodos de arco aceso, conforme mostra a Figura 103, onde se tem um histograma com uma distribuição normal, com uma período de maior incidência de 12,3 ms, o que representa também a diminuição de curtos prematuros e em consequência a diminuição da oscilação da poça de fusão.

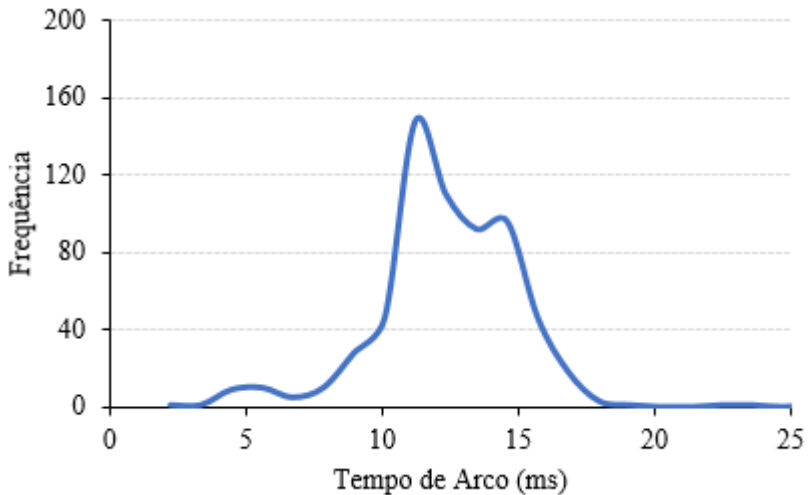


Figura 103 – Histograma de tempo de permanência com arco aceso para o parâmetro de menor energia após as correções, para um período de 10 segundos.

Em síntese, pode-se verificar um aumento na regularidade entre os períodos de transferência além de uma melhora na estabilidade conforme foi apresentada anteriormente. Contudo após o ajuste na  $Di_3$  teve uma estabilização na frequência de destacamento, onde se tem uma frequência repetitiva de 73 Hz, como mostra a Figura 104, que ilustra lado a lado o antes e o depois do parâmetro de menor energia.

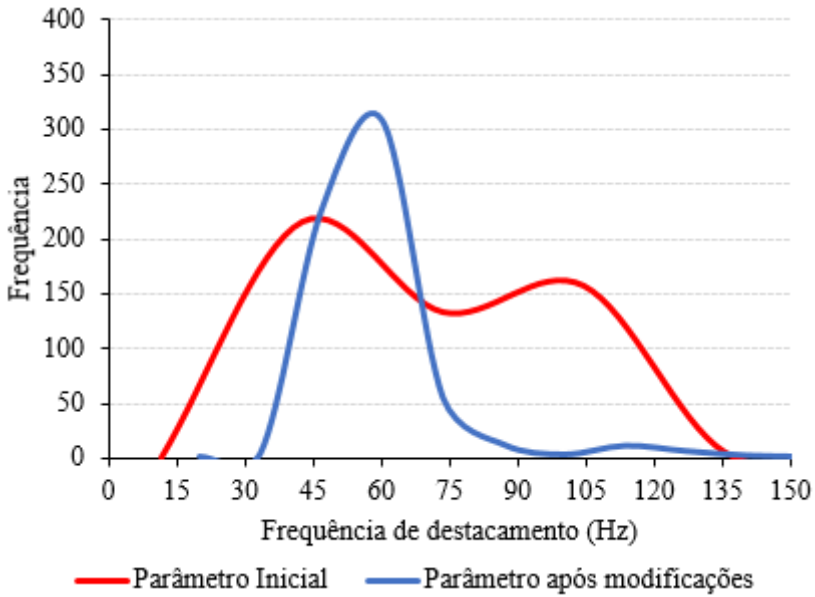


Figura 104 – Comparação entre as frequências de destacamento antes e depois das melhorias realizadas no parâmetro de menor energia.



#### 4.4.2 Parâmetro de maior energia

Para o formato de onda de maior energia, este composto pelas variáveis elétricas descritas na Tabela 5b, com uma corrente média de cerca de 150 A e uma velocidade de arame de 5 m/min, igualmente ao caso anterior foram feitos ensaios em corpos de provas conforme o descrito.

Com os ensaios foi possível coletar os dados elétricos do formato de onda descrito por Kindermann [6], por meio do SAP e comportamento da transferência pela filmagem em alta velocidade.

Neste formato de onda também se notou a geração de respingos, qual torna o processo instável, além de prejudicar a leitura e controle da reabertura do arco por parte do algoritmo da fonte, em suma, devido a estes curtos-circuitos prematuros. O oscilograma exposto na Figura 105 ilustra um trecho com 3 períodos onde se tem um destacamento e reabertura do arco com uma corrente elevada no tempo de 50 ms, esse fenômeno se repete ao longo de todo o oscilograma.

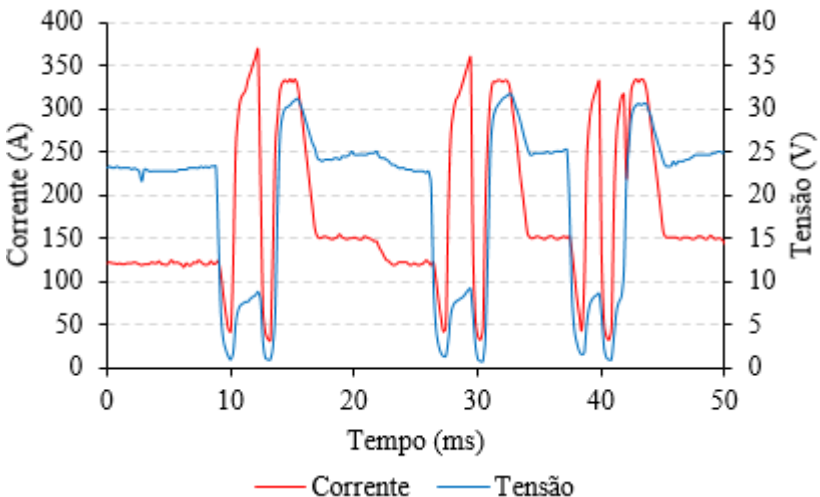


Figura 105 – Oscilograma do processo CCC descrito por Kindermann [6] (Parâmetro de maior energia).

Pode-se observar que diferente do formato de onda de menor energia neste se tem um patamar intermediário antes da corrente de base, que como citado por Gohr [51], esse patamar serve para controlar o aporte térmico e a penetração, bem como, também suavizar a

oscilação da poça. No entanto ainda sim se tem eventuais curtos-circuitos precoces, que geram instabilidade além de elevada emissão de respingos.

Da mesma forma que para o caso anterior foi feito a filmagem em alta velocidade para compreender o fenômeno físico que gera esses curtos prematuros, ou seja, compreender no tocante a oscilação excessiva da poça de fusão, verificando se o mecanismo é similar ao do anterior. Portanto para os frames a seguir, se tem:

- a) Aproximação da gota formada da poça de fusão;
- b) Contato suave da gota metálica com a poça de fusão;
- c) Estricção da ponte metálica (efeito *pinch*)
- d) Rompimento suave da ponte metálica e reabertura do arco;
- e) Reabertura em corrente elevada, gerando elevada pressão sobre a poça metálica;
- f) Máxima amplitude negativa da poça de fusão recorrente na região de amortecimento descrita por Gohr [51];
- g) Oscilação positiva da poça e contato prematuro da gota em formação com a poça de fusão;
- h) Estricção da ponte metálica;
- i) Rompimento abrupto da ponte metálica e expulsão de respingos.

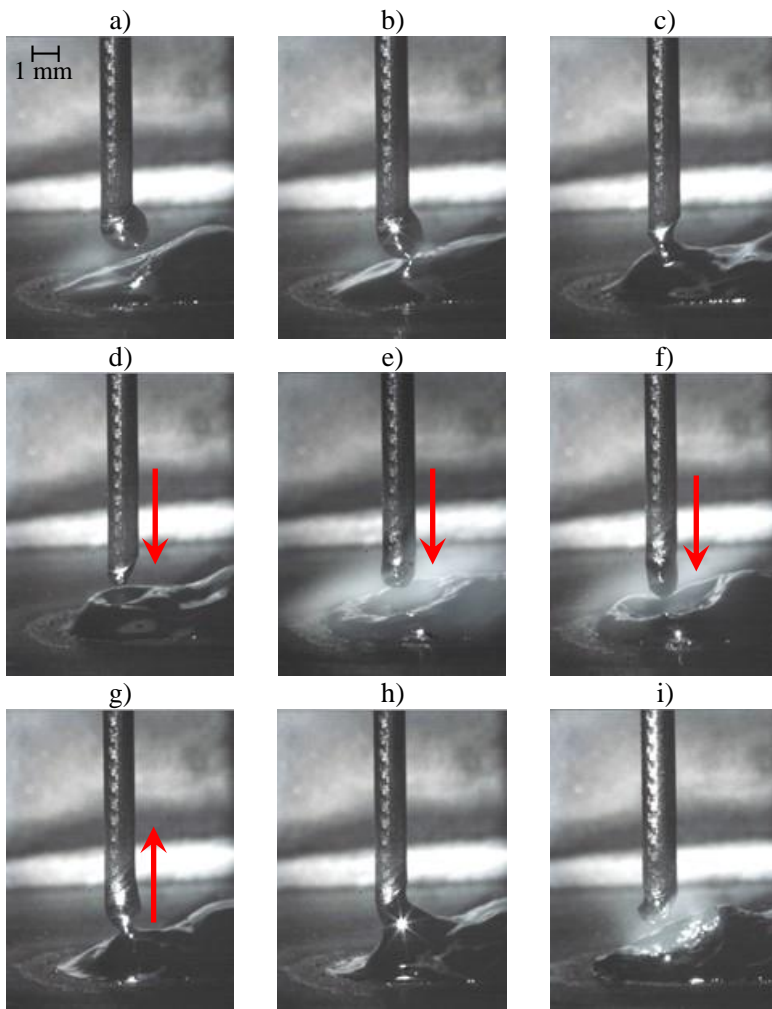


Figura 106 – Imagens referentes a aquisição via filmagem em alta velocidade do fenômeno de oscilação da poça de fusão e curto-circuito prematuro, para o parâmetro de maior energia.

Neste caso como a energia global em relação ao anterior é maior, onde se tem gotas com diâmetro médio de 1,4 mm, 15% maior que o diâmetro do eletrodo, o que em tese tende a dificultar a transferência por tensão superficial e, fora de posição a sustentação da mesma pode ser comprometida, além de corroborar para efeito explosivo e emissão de

fumos e respingos. Neste sentido também buscou-se reduzir o diâmetro de gota para um valor mais próximo ao do diâmetro do eletrodo [10].

Pode-se observar melhor o efeito de oscilação da poça metálica nos trechos “d”, “e” e “f” da Figura 106, que representa um período de 2,5 ms, onde se tem o fim do período de destacamento e a reabertura do arco, em seguida se tem a elevação da corrente a um patamar de 330 A para formação de uma nova gota metálica e a *posteriori* se tem o patamar intermediário de 150 A antes da base de 120 A. Entretanto, levando em conta o caso anterior, acredita-se que o efeito da taxa de subida da corrente, este de 70 A/ms, tem um efeito brusco sobre a ponte metálica, a qual se rompe antes da fonte prever seu colapso, reacendendo o arco em uma patamar de elevada corrente e potência, que como no caso anterior, exerce elevada pressão sobre a poça de fusão, gerando assim um efeito de oscilação, o qual devido sua magnitude, gera contatos prematuros entre o eletrodo e a poça, além de um efeito cíclico (ver Figura 110), conforme pode ver observado no tempo de 40 ms na Figura 105. Visto isto, também se mediu a taxa de estricção, sendo esta de 3,21 mm/ms.

Refletindo estas divergências constatadas se tem um processo com alguns trechos instáveis, devido ao efeito supracitado o qual corrobora com o caso anterior onde também se tem reaberturas do arco com valores de potência elevados, por exemplo, para este caso, pode ser observado no trecho de 40 ms, que na sequência ao destacamento com uma potência baixa, se tem um contato prematuro e reabertura do arco em uma potência elevada. Reflexo do efeito cíclico gerado pela oscilação da poça. A potência ponto a ponto está descrita no gráfico da Figura 107.

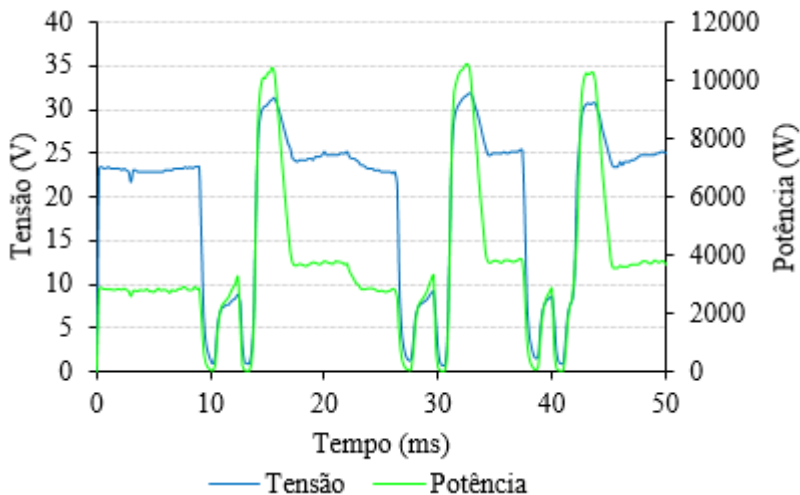


Figura 107 – Potência instantânea do parâmetro de maior energia.

Para mostrar isso de forma qualitativa se tem o ciclograma na Figura 108 respectivamente qual apresenta em alguns momentos tanto de curto como de arco descontinuidade e irregularidade na transferência, gerando períodos longos e curtos prematuros.

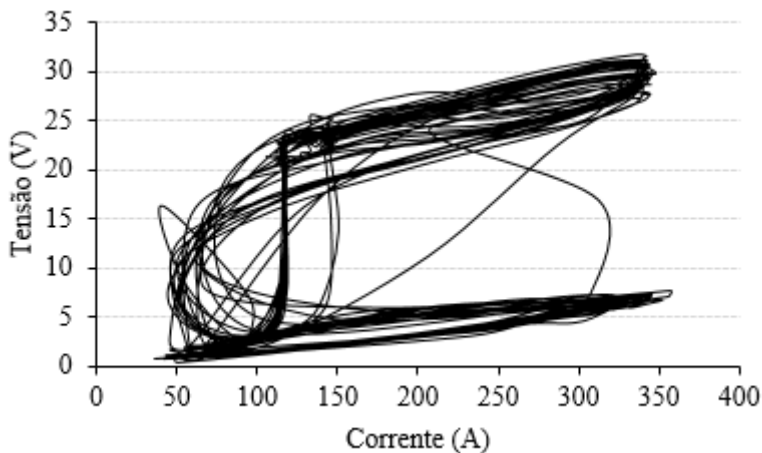


Figura 108 – Ciclograma do conjunto de parâmetros do formato de onda de maior energia descrito por Kindermann [6].

Além destas verificações se tem a análise dos histogramas, para o histograma de tempo de permanência em curto, onde se tem curtos com tempo de duração de maior incidência de 4,5 ms, um desvio padrão de 1,94 ms e um desvio padrão relativo de 52%, como mostra a Figura 109.

Este valor de duração pode se dar devido ao diâmetro das gotas, que tendem a dificultar a transferência, fazendo com que a derivada da corrente chegasse a picos de acima de 350 A, conforme mostra o oscilograma da Figura 105, podendo ocasionar em reaberturas do arco em corrente elevada e conseqüentemente respingos e fumos.

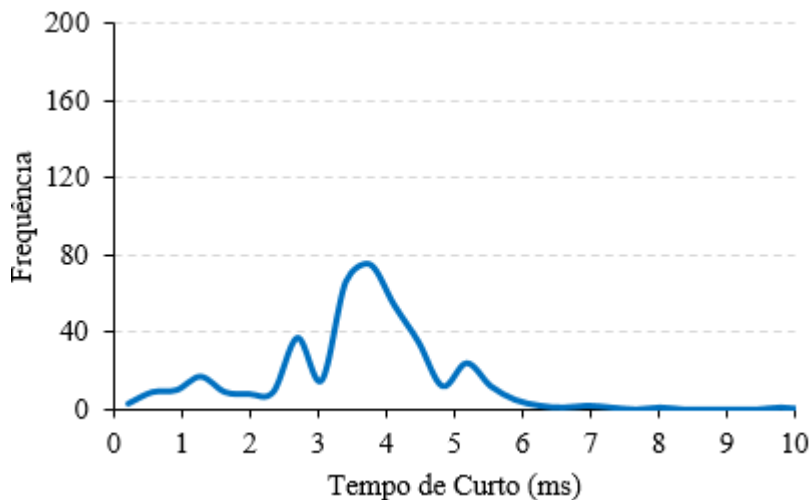


Figura 109 – Histograma de tempo de permanencia em curto para o parâmetro de maior energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos.

Da mesma forma que para o caso anterior, para o histograma do tempo de permanencia com o arco aceso se tem um formato bimodal, conforme ilustra a Figura 110. Isso corrobora com o teste anterior e se entende que este formato bimodal tende a representar a oscilação da poça, onde se tem curtos prematuros e em consequência disto, períodos distintos de arco aceso.

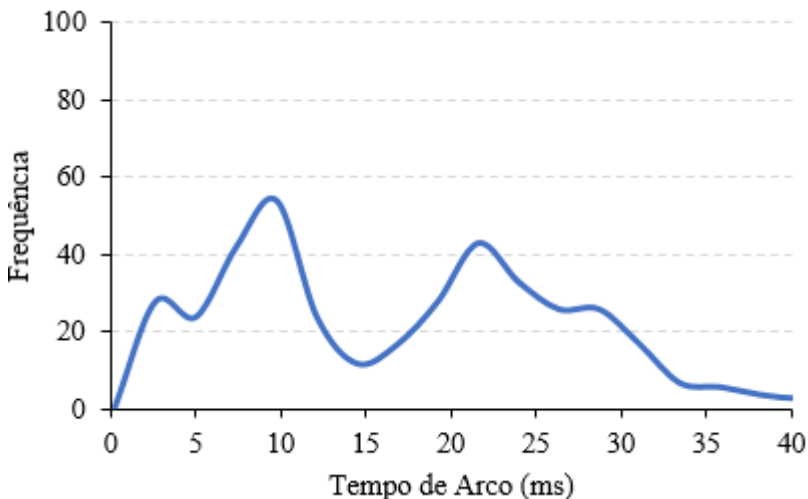


Figura 110 – Histograma de tempo de permanência com arco aceso para o parâmetro de maior energia descrito por Kindermann [6], para um período de 10 segundos.

A partir das informações obtidas com os ensaios utilizando o parâmetro de maior energia, pode-se realizar testes para correções ajustes, visando corrigir as divergências constatadas, quais estão escritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Variáveis elétricas para o parâmetro de maior energia com destaque aos parâmetros alterados

Período de Curto-Circuito						Período de Arco						
Ic <sub>1</sub>	tc <sub>1</sub>	Ic <sub>2</sub>	tc <sub>2</sub>	Ic <sub>3</sub>	Di <sub>3</sub>	Ia <sub>1</sub>	ta <sub>1</sub>	Ia <sub>2</sub>	ta <sub>2</sub>	Ia <sub>3</sub>	tr <sub>1</sub>	tr <sub>2</sub>
38	1,0	38	*	265	50	330	1,5	150	4,0	120	1,5	1,5

\*Correção do KR para valor de 1,00.

Para o parâmetro de maior energia as ações corretivas adotadas foram diminuir a Di<sub>3</sub> de 70 para 50 A/ms e, diminuir o tempo de arco do patamar intermediário de 4,5 para 4,0 ms. Diminuir o tempo do patamar junto da diminuição da Di<sub>3</sub> o que culminou em uma taxa de estricção de 2,4 mm/ms, cerca de 25% menor, resultando em uma diminuição do diâmetro de gota médio de 1,4 para 1,25 mm.

Os frames a seguir na Figura 111 ilustram a comparação entre os diâmetros de gota obtidos.

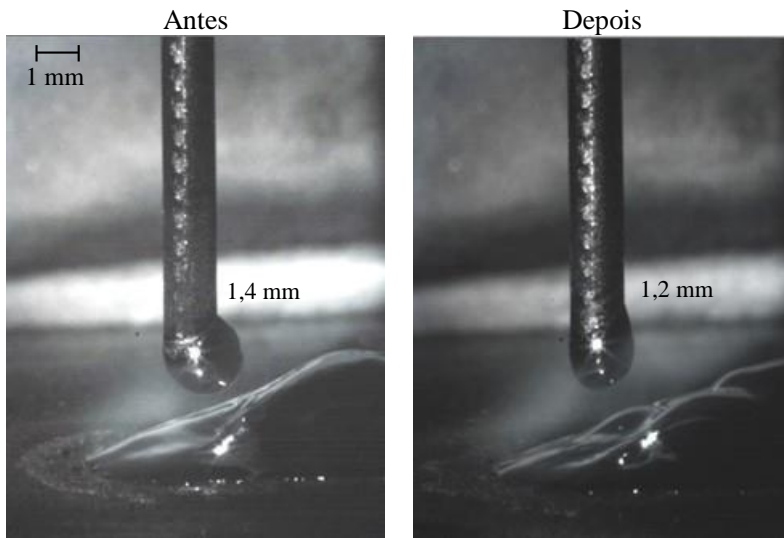


Figura 111 – Comparação entre os diâmetros de gota, antes e depois da modificação do formato de onda.

O oscilograma obtido com estas modificações apresentou coincidência entre os períodos, ou seja, repetibilidade. Além de uma diminuição no valor máximo de corrente atingido pela derivada, onde tinha-se um valor de até 370 A e agora se tem cerca de 350 A, conforme pode ser observado na Figura 112.



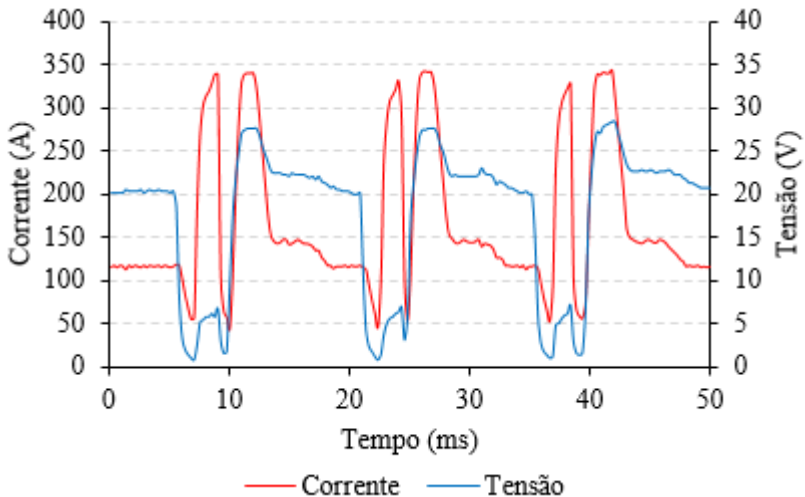


Figura 112 – Oscilograma do formato de onda de maior energia após as melhorias.

Da mesma forma que para o caso anterior, verificou-se que o efeito da reabertura do arco com potências altas tende a gerar além de respingos e fumos, instabilidade sobre o controle do CCC. Visto isto, as modificações geram uma diminuição significativa do efeito oscilatório da poça, gerado pela reabertura em potências elevadas, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 113.

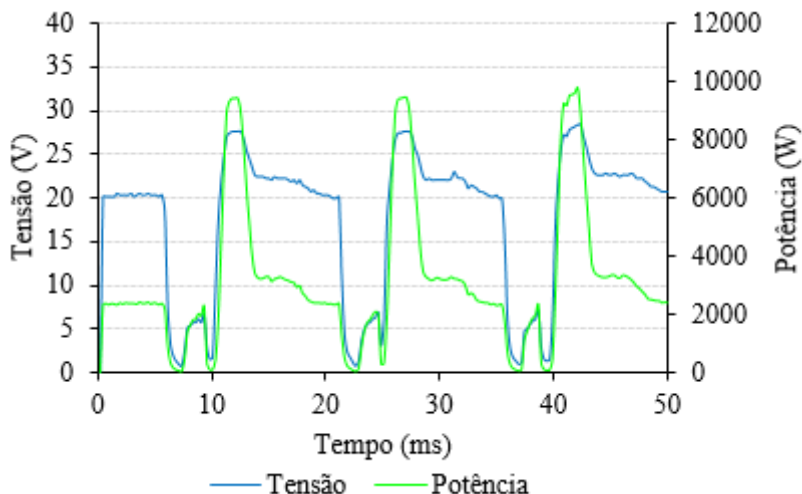


Figura 113 – Potência instantânea para o parâmetros de maior energia após as modificações.

Para melhor expressar a regularidade e coincidência dos períodos se tem o ciclograma, qual está exposto na Figura 114.

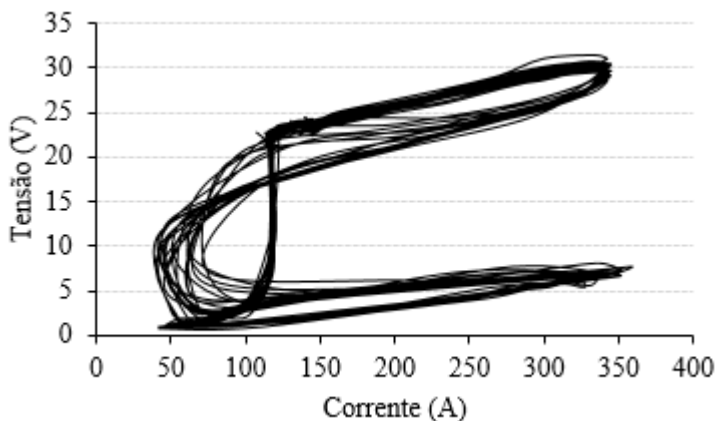


Figura 114 – Ciclograma referente ao conjunto de parâmetros de maior energia após a melhoria.

No histograma ilustrado na Figura 115 pode-se observar uma diminuição no tempo de curto, onde foi verificado um valor de 3,0 ms,

reflexo da diminuição do diâmetro da gota, se uma distribuição normal e desvio padrão de 0,80 ms e uma desvio padrão relativo de 28% cerca de 24% menor que o inicial, o que corrobora com a hipótese de que se tem maiores estabilidades com coeficientes de variação menores. Entretanto vale salientar o que é descrito por Scotti [10], que deve-se analisar o processo como um todo.

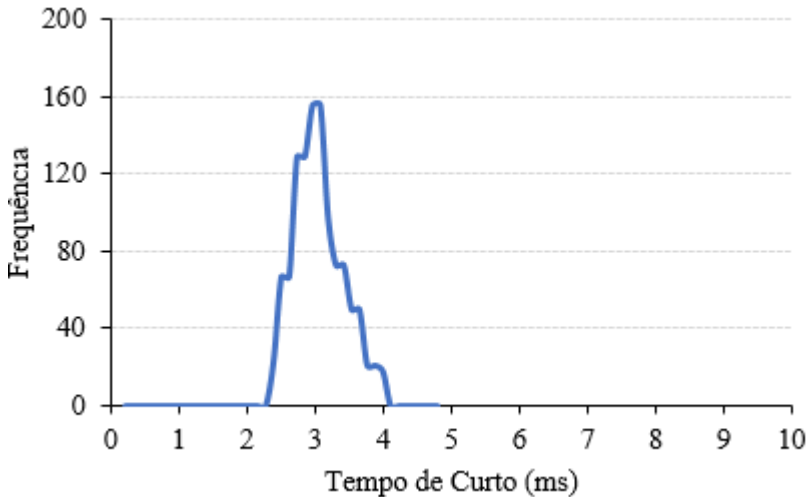


Figura 115 – Histograma de tempo de permanência em curto para o parâmetro de maior energia após as correções, para um período de 10 segundos.

No histograma referente ao tempo de permanência com o arco aberto (Figura 116), pode-se notar uma melhora, em relação ao formato, onde se modificou a estrutura de bimodal para um formato normal, refletindo à diminuição de curtos-circuitos precoces em função da oscilação da poça. Onde obteve um tempo de arco de aberto de cerca de 9,6 ms, menor em relação ao parâmetro sem as modificações.

Entretanto, nota-se alguns pontos com pequenas variações, semelhante a um ruído, observando o processo como um todo, percebe-se que para este caso, onde se tem uma corrente média de 150 A e uma velocidade de arame de 5 m/min é o limite para o CCC, qual se tem modificações no comprimento do arco, devido ao estado da transferência metálica, que está em um limiar próximo ao globular.

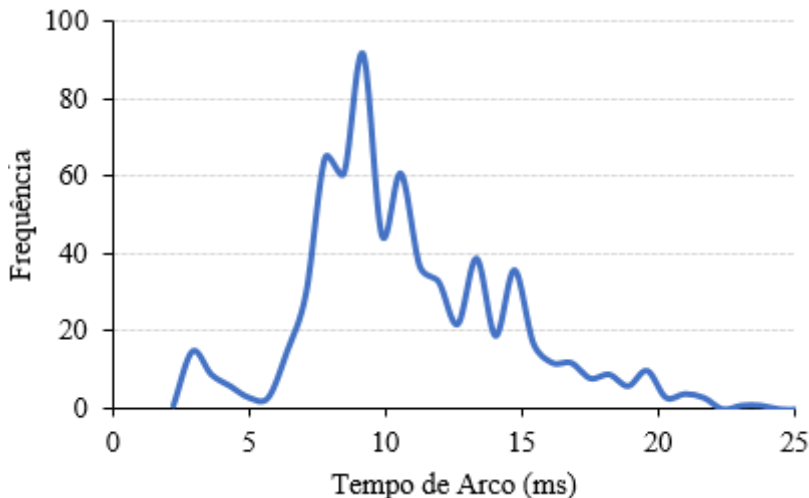


Figura 116 – Histograma de tempo de permanência com arco aceso para o parâmetro de maior energia após as correções, para um período de 10 segundos.

Em resumo, pode-se verificar um aumento da regularidade e da frequência de destacamento do processo após as modificações, onde obteve um parâmetro com uma frequência de destacamento de 95 Hz, 45% maior que a inicial. Contudo o efeito da  $Di_3$  sobre o processo foi crucial para a estabilidade do mesmo. A Figura 117 ilustra a comparação entre a frequência de destacamento dos dois processos, antes e depois das alterações.

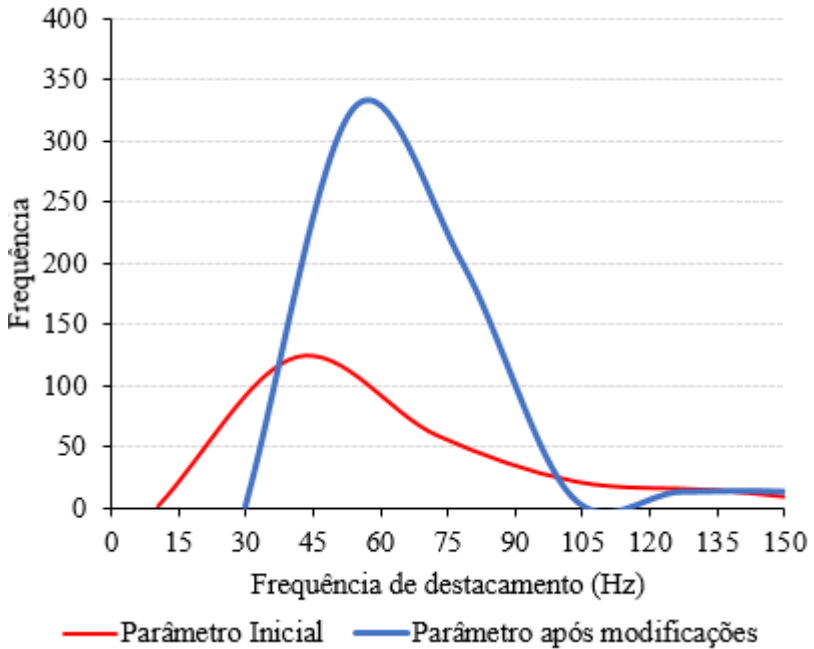


Figura 117 – Comparação entre as frequências de destaque antes e depois das melhorias realizadas no parâmetro de maior energia.

#### 4.4.3 Parâmetros de movimentação

As adequações dos parâmetros de movimentação foram realizadas posteriormente aos ajustes nas variáveis elétricas do processo CCC. Com base no banco de dados criado por Kindermann [6] este descrito pela Tabela 8.

Tabela 8 – Banco de dados para os parâmetros de movimentação descritos por [6].

Posição	GAP (mm)	Amplitude (mm)	Velocidade (cm/min)	Frequência (Hz)	Tempo de Parada (s)
Plana	1	-	30	-	-
	2,5	3	15	0,8	0,3
	4,5	7,6	6	0,3	1
Descendente	1	-	45	-	-
	2,5	3	17	0,8	0,3
	4,5	7,6	7,2	0,5	0,3
Sobre-cabeça	1	-	30	-	-
	2,5	3,2	18	1	0,3
	4,5	6,4	6	0,5	0,3

Como citado, Kindermann [6] criou um algoritmo que por meio de regressão ajusta os parâmetros de movimentação em função da posição angular e do valor da abertura da raiz. A revalidação dos parâmetros seguiu como critério inicial obter o menor valor de amplitude para realização de um passe com penetração adequada. Além disto buscou-se o máximo de harmonia entre os parâmetros, ou seja, procurou-se deixá-los o mais parecido possível, alterando principalmente a velocidade de soldagem.

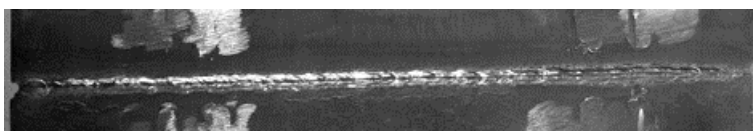
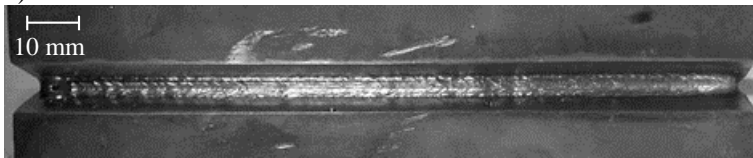
Para a posição plana, as verificações e alterações culminaram nos resultados descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de movimentação da tocha de soldagem para a posição plana

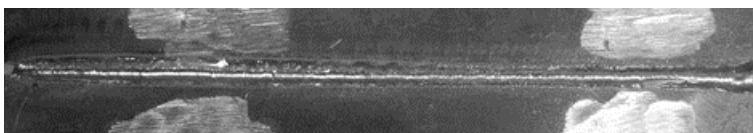
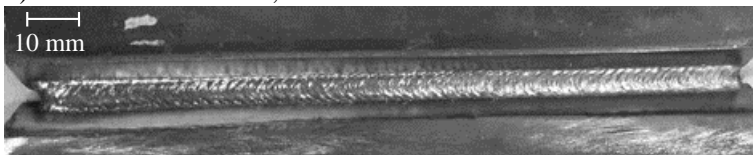
Abertura da raiz (mm)	Amplitude (mm)	Velocidade (cm/min)	Frequência (Hz)	Tempo de Parada (s)
1	-	30	-	-
2,5	2,8	12	0,8	0,3
4,5	7	8	0,7	0,3

Os resultados obtidos quanto as aparências dos cordões de solda estão apresentados na Figura 118. Onde se tem para todas as amostras a penetração na raiz, boa molhabilidade nos flancos e sem a incidência de defeitos superficiais e atendem os critérios da norma API 1104 [14].

a) Abertura da raiz de 1 mm



b) Abertura da raiz de 2,5 mm



c) Abertura da raiz de 4,5 mm

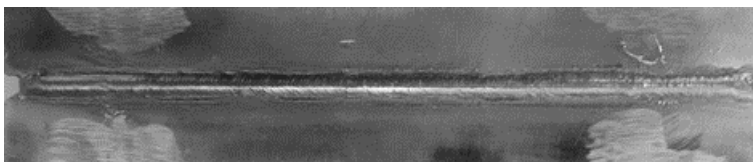
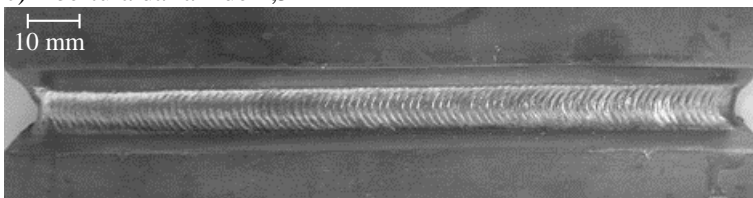


Figura 118 – Resultados para os ensaios na posição plana.

As macrografias extraídas destes corpos de prova, da mesma forma que a aparência dos cordões apresentaram boas características, como penetração e ausência de defeitos, conforme mostra a Figura 119.

Quanto à penetração pode-se verificar para a abertura de 1 mm uma penetração de 0,16 mm, na abertura de 2,5 mm se tem um reforço de 1,52 mm, visualmente parece excessiva, entretanto este valor se encontra dentro do limite sugerido pelas normas adotadas e para a abertura de 4,5 mm obteve-se um reforço de 0,60 mm, também dentro do limite de tolerância.

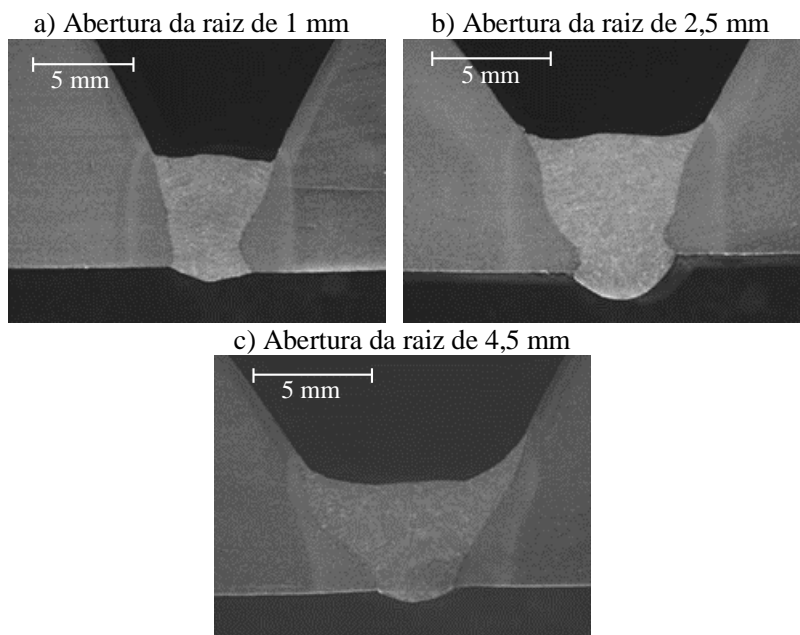


Figura 119 – Macrografias para a posição plana.

Quanto a incidência de defeitos internos ao longo do cordão, como porosidades e falta de fusão, se tem os raios-x realizados nos mesmos, onde não houve a presença de defeitos que desqualifiquem a amostra, como é possível ver na Figura 120.



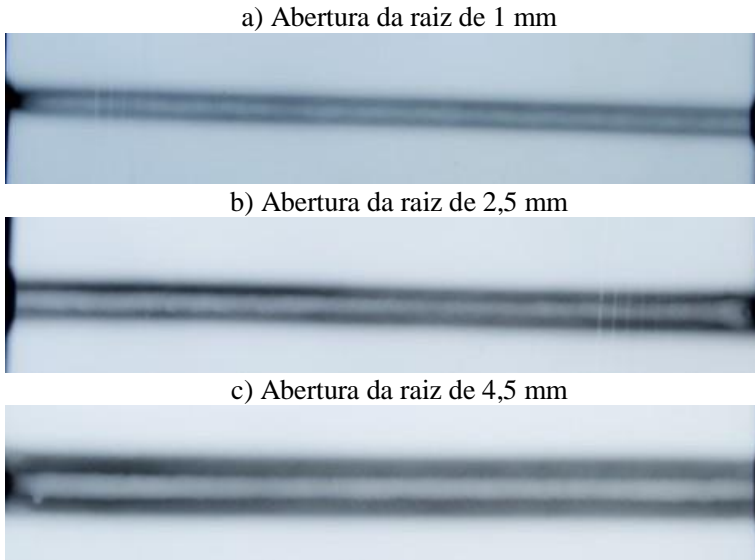


Figura 120 – Resultados dos ensaios não destrutivos de raios-x para a posição plana.

Para a posição vertical descendente, as verificações conceberam as alterações descritas na Tabela 10 respectivamente.

Tabela 10 – Parâmetros de movimentação da tocha de soldagem para a posição vertical descendente.

GAP (mm)	Amplitude (mm)	Velocidade (cm/min)	Frequência (hz)	Tempo de Parada (s)
1	-	35	-	-
2,5	3	14	0,6	0,3
4,5	6	8	0,6	0,3

Quanto à aparência dos cordões de solda se tem a Figura 121, a qual ilustra a face e o verso dos mesmos, onde se tem para todas as amostras a presença de raiz, boa molhabilidade nos flancos e sem a incidência de defeitos superficiais, exceto para a abertura de 1 mm e 4,5 mm que apresentaram uma pequena concavidade na raiz mas dentro do limite estabelecido pela API 1104 [14].

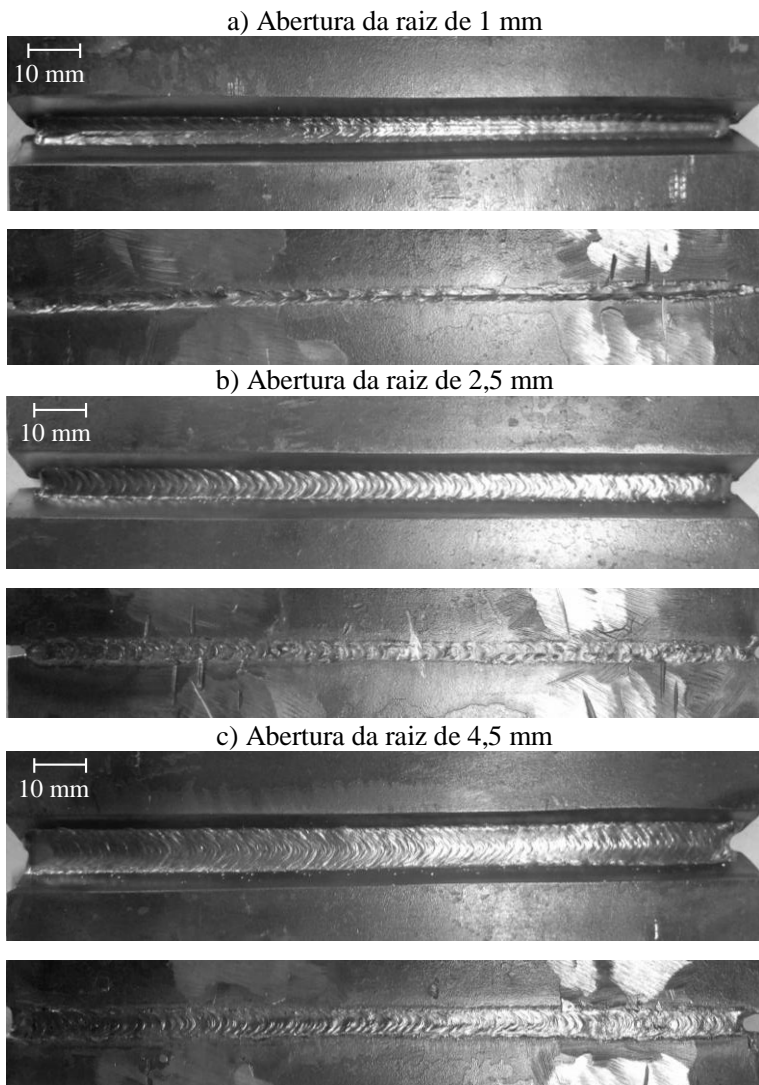


Figura 121 – Resultados para os ensaios na vertical descendente.

Da mesma forma que para posição plana, nas macrografias para a posição vertical descendente também foram verificadas boas características quanto à penetração e ausência de defeitos como mostra a Figura 122. Entretanto como citado anteriormente, as amostras com

abertura de 1 mm e 4,5 mm apresentaram uma leve concavidade de cerca de 0,3 mm para a Figura 122a e 0,4 mm para a Figura 122b, porém dentro do limite estabelecido pelas normas adotadas.

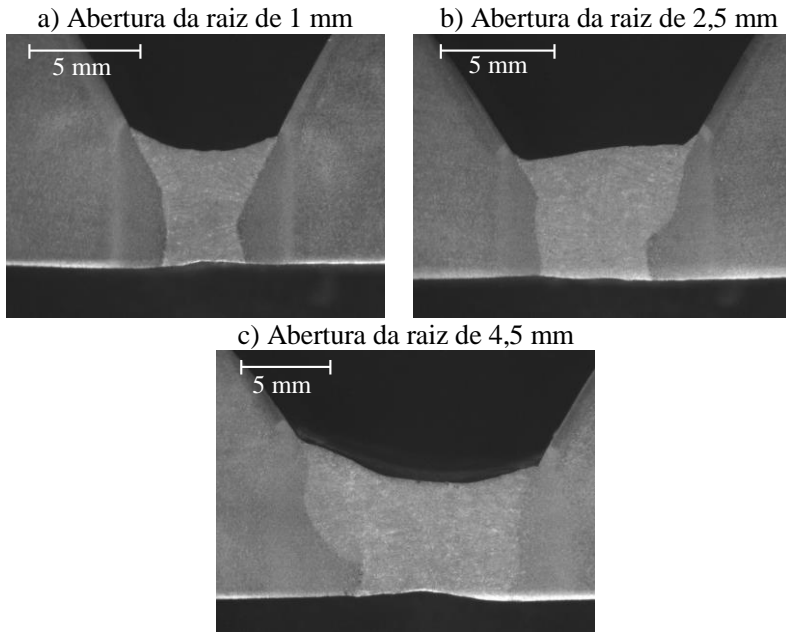


Figura 122 – Macrografias para a posição vertical descendente.

Para os ensaios de raio-x onde buscou-se verificar a incidência de defeitos internos ao longo do cordão. Obteve-se bons resultados sem a presença de defeitos, como mostra a Figura 123. Entretanto nas Figura 123a e na Figura 123b pode-se verificar que a leve concavidade constada fica mais visível no raio-x, porém sua profundidade não reflete uma descontinuidade.

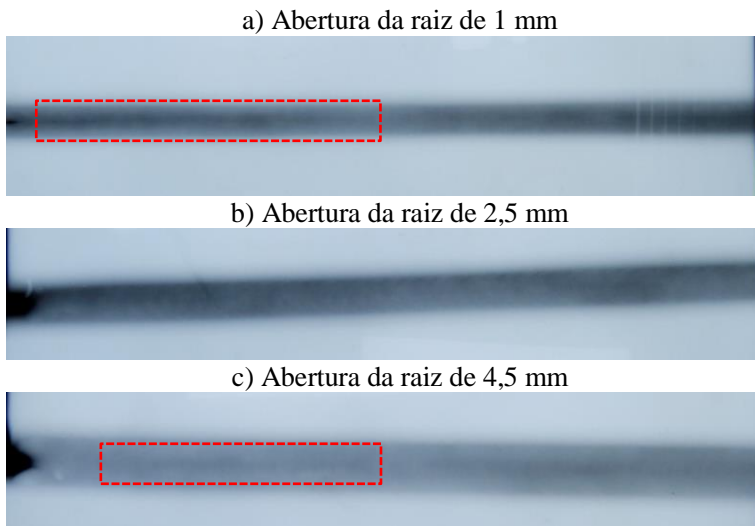


Figura 123 – Resultados dos ensaios não destrutivos de raios-x para a posição vertical descendente, com detalhe a leve concavidade na raiz.

Nos ensaios na posição sobre-cabeça, os parâmetros de movimentação também sofreram algumas alterações, as melhorias e alterações realizadas estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de movimentação da tocha de soldagem para a posição sobre-cabeça.

GAP (mm)	Amplitude (mm)	Velocidade (cm/min)	Frequência (Hz)	Tempo de Parada (s)
1	-	30	-	-
2,5	3	12	0,8	0,3
4,5	6	7	0,6	0,3

Igualmente aos ensaios anteriores também se obtiveram boas características, como penetração, molhabilidade nos flancos e sem defeitos superficiais, dentro do padrão estabelecido pela API 1104 [14], como é mostrado na Figura 124.

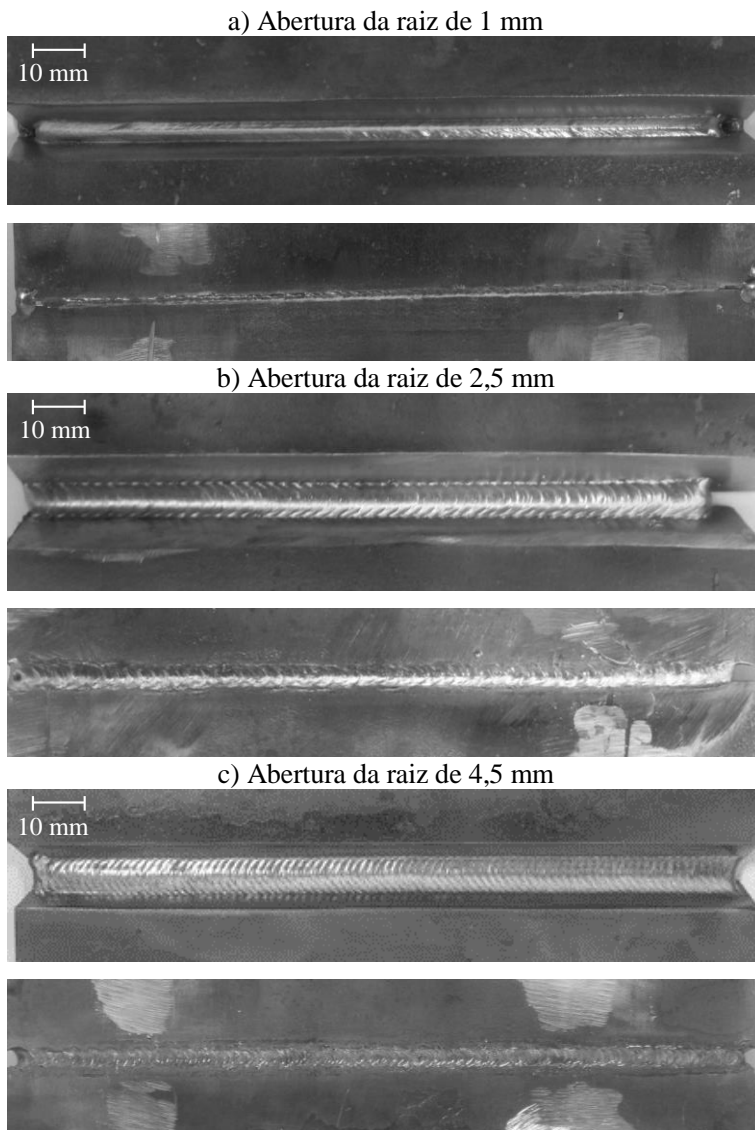


Figura 124 – Resultados para os ensaios na posição sobre-cabeça.

Para as macrografias obteve-se igual aos outros casos, bons resultados sem a presença de defeito, estes descritos na Figura 125, entretanto os cordões da Figura 125a e Figura 125b devido à posição tenderam a apresentar convexidade, porém nada além do permissível.

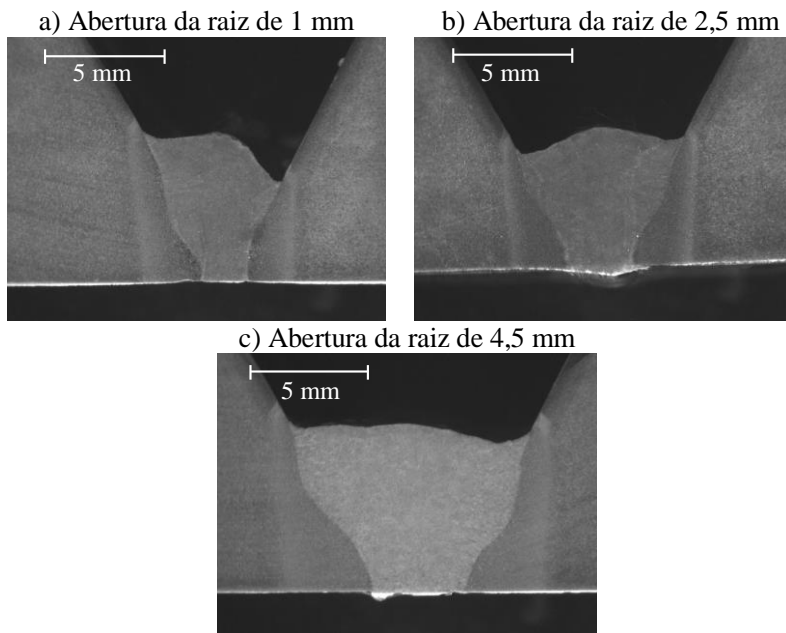


Figura 125 – Macrografias para a posição sobre-cabeça.

Para os raios-x também foram obtidos bons resultados sem a presença de defeitos internos, como mostra a Figura 126. Para esta posição, diferente do esperado, não houve concavidade na raiz como na vertical descendente.

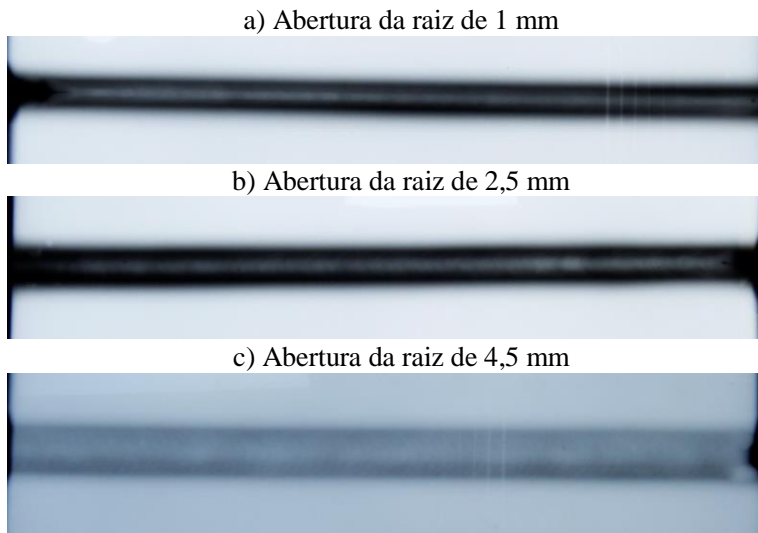


Figura 126 – Resultados dos ensaios não destrutivos de raios-x para a posição sobre-cabeça.

Contudo, obteve-se uma nova malha de dados de movimentação, para as três posições de soldagem empregadas na soldagem orbital, onde proveu-se melhorias e correções quando necessário, obedecendo os critérios de avaliação quanto a descontinuidades e defeitos. A Tabela 12, ilustra a novo banco de dados para os parâmetros de movimentação.

Tabela 12 – Parâmetros de movimentação atualizados.

Posição	GAP (mm)	Amplitude (mm)	Velocidade (cm/min)	Frequência (Hz)	Tempo de Parada (s)
Plana	1	-	30	-	-
	2,5	2,8	12	0,8	0,4
	4,5	7	8	0,7	0,3
Descendente	1	-	35	-	-
	2,5	3	14	0,6	0,3
	4,5	6	8	0,6	0,3
Sobre-cabeça	1	-	30	-	-
	2,5	3	12	0,8	0,3
	4,5	6	7	0,6	0,3

## 4.5 Validação do método de leitura prévia

A validação do método criado, iniciou pela criação de uma rotina de compensação do trilho dentro da PCA, que também sofreu um *upgrade* tanto em sua lógica, como em sua interface. Como pode ser observado na tela inicial da mesma na Figura 127, onde:

- a) Menu principal (*Main menu*), qual possui 9 abas, estas com funções específicas para o controle da comunicação, trajetória e parametrização do processo;
- b) Tela de comunicação com o sensor, que exibem a posição relativa dos 7 pontos de inflexão da leitura laser, além do *gap*, qualidade da leitura, área da seção, frequência de aquisição (aprox. 30 Hz) e, posição angular;
- c) Parâmetros de trajetória tais como, tamanho e orientação do *Offset*, posição angular, diâmetro interno do tubo, posição de início;
- d) Botões de controle da movimentação dos eixos do manipulador, contador métrica da distância percorrida em milímetros com botão de retorno ao zero. Na parte inferior se tem o botão de ajuste fino do ganho da movimentação, botão de zeragem, e botão de definição e calibração do *Offset*;
- e) Parâmetros instantâneos enviados para a fonte de soldagem e manipulador;
- f) Opções de operação, sendo esta uma parte da implementação, onde se tem a opção de realizar o escaneamento prévio da junta com o sensor Laser no TCP, apenas clicando do botão “*Scan*”, abaixo se tem um ajuste fino do *gap* e da velocidade de soldagem, sendo este um ganho percentual em função da leitura atual, onde se tem uma resolução de 0,5% por incremento. No rodapé desta região, se tem os botões de liga e desliga se algumas funcionalidades da PCA, como, adaptativo, seguimento de junta, tecimento e disparo da fonte de soldagem;
- g) Botão de iniciar o processo de leitura e ou soldagem, e ao seu lado o botão de emergência;
- h) Botão para geração de um relatório na forma de planilha em arquivo “.xls”;
- i) Guia de monitoramento da temperatura dos componentes internos do sensor Laser, tais como, placa de controle, CMOS e, Diodo emissor (Laser), abaixo se tem as guias de visualização do perfil da junta já pré-processado pelo



algoritmo nativo do sensor, ao lado perfil bruto sem a filtragem e por fim botão para visualização instantânea dos dados adquiridos ao longo do processo em função da posição angular.

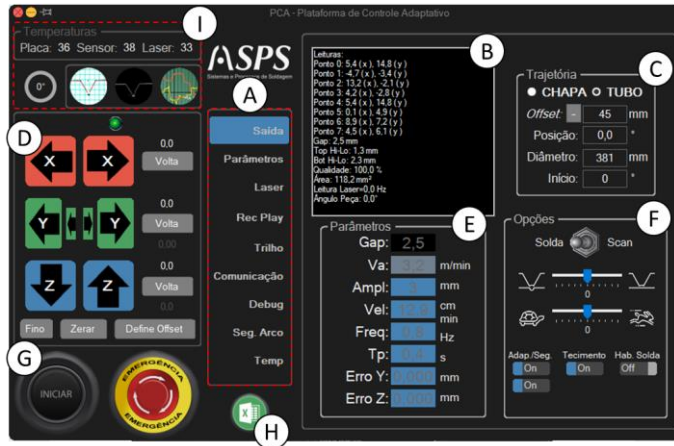


Figura 127 – Tela inicial da plataforma de controle adaptativo.

Nesta atualização realizada na PCA, além da atualização do algoritmo de seguimento de junta para remoção de *bugs*, atualizou-se a tabela de parâmetros de soldagem, como visto no capítulo 4.4.

O teste inicial consistiu em verificar a origem das falhas decorrentes no seguimento de junta, para isto, observou-se a junta pela perspectiva da tocha, colocando o sensor Laser em seu lugar no TCP, por meio do suporte de tocha descrito anteriormente.

Na pratica, se não houvesse divergência associada a erros sistemáticos oriundos do trilho ou duto, tanto os mapas gerados com a tocha no TCP quanto com Laser no TCP seriam iguais. Entretanto não foi esta a constatação, o que reafirmou a hipótese inicialmente levantada, que sugere que o trilho influencia a leitura do sensor retroativamente, uma vez que a folga já estava controlada paliativamente, como já discutido no capítulo 4.2.

Vale salientar que os dados a seguir não são dados absolutos, uma vez que o erro sistemático pode variar de junta para junta, portanto os dados a seguir ilustram uma das cinco aquisições realizadas em diferentes juntas sobre um seguimento de tubo ao longo de 180°.

Para o método de leitura prévia, criou-se uma rotina de aquisição, que executa o processo em vazio, apenas com o seguimento de junta

habilitado à uma velocidade constante de 30 cm/min, para o passo 1 e passo 2, como visto no fluxograma da Figura 56.

O gráfico da Figura 128 ilustra uma sobreposição dos mapas obtidos com a tocha e com o STL no TCP, para o deslocamento em Y, onde é possível observar as dissonâncias entre os mesmos.

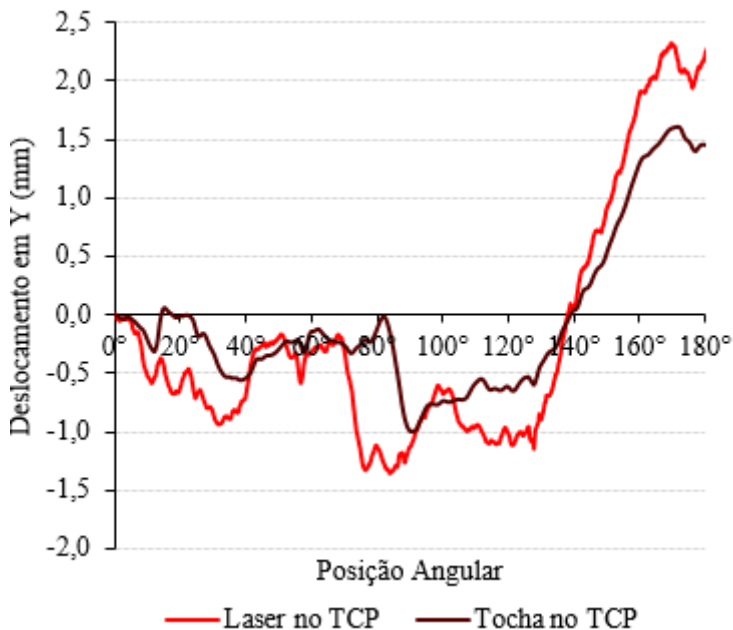


Figura 128 – Aquisição dos mapas de deslocamento em Y para uma junta tubular.

Da mesma forma, se tem na Figura 129 o gráfico com as curvas que representam o mapa de deslocamento do eixo Z, onde também é possível observar variações entre as mesmas.

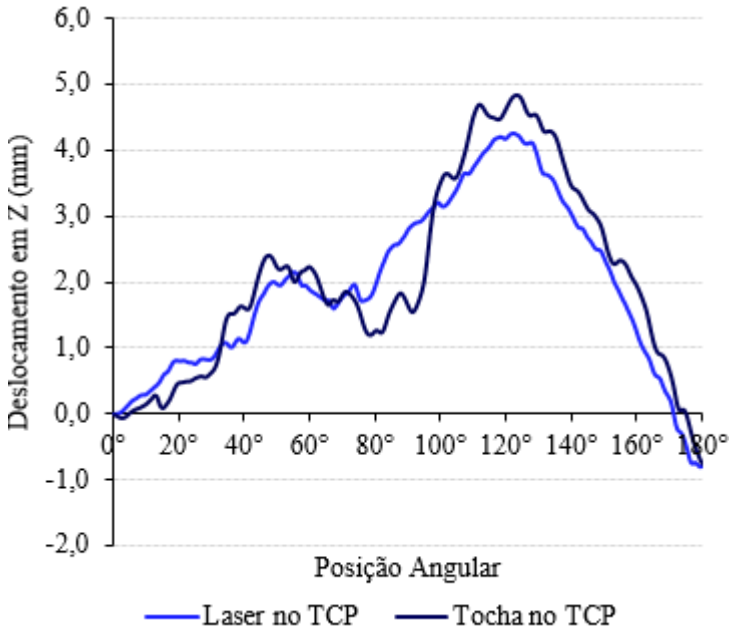


Figura 129 – Aquisição dos mapas de deslocamento em Z para uma junta tubular.

Analisando os dados dispostos nos gráficos pode-se observar desvios entre as curvas, o que comprova a influência do trilho sobre a leitura do sensor, estes desvios afetam principalmente o eixo Y, uma vez que a margem de erro permissível sobre a oscilação (tecimento), para haver uma penetração adequada é baixa, como pode ser visualizado na Tabela 13, qual ilustra uma relação percentual do erro permissível em função do gap.

Tabela 13 – Relação *Gap* e erro percentual permissível para raiz adequada.

Posição	GAP (mm)	Amplitude (mm)	Limite Inferior	Limite Superior
Plana	1	0	-	-
	2,5	2,8	6%	12%
	4,5	7	28%	17%
Descendente	1	-	-	-
	2,5	3	10%	13%
	4,5	6	17%	15%
Sobre-cabeça	1	0	-	-
	2,5	3	10%	13%
	4,5	6	17%	15%

Os limites supracitados, ou seja, o limite inferior e superior são o valor percentual mínimo de ganho sobre o *gap* para não ocorrer perfuração da raiz e o limite superior é o valor máximo para haver penetração adequada.

O erro encontrado nesta junta é a diferença entre os mapas, e este erro é que deve ser descontado previamente da trajetória a ser realizada pelo manipulador, a Figura 130 ilustra o gráfico do erro absoluto desta junta. Onde pode-se observar erro máximo de cerca de 0,8 mm para o eixo Y. O que independente do *gap* já é uma medida fora dos limites obtidos para a amplitude de oscilação, conforme a Tabela 13. E para o eixo Z obteve-se um erro de aproximadamente 1,3 mm o que gera uma variação na DBCP, e pode interferir na leitura de tensão do processo CCC, ou até causar uma colisão entre o bocal e a peça.

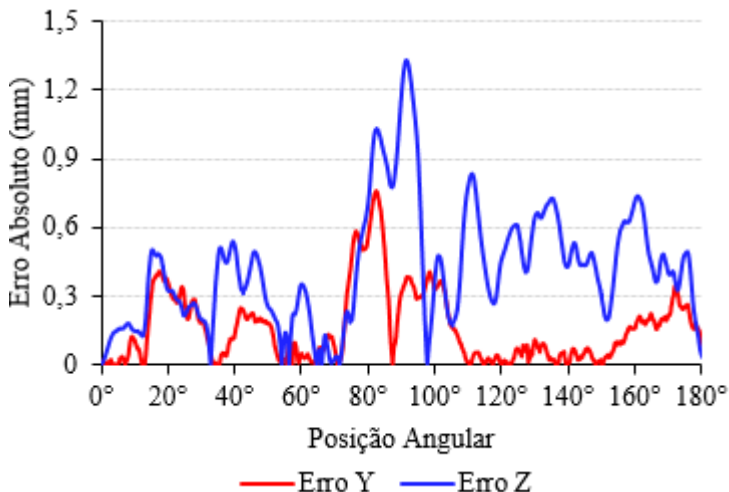


Figura 130 – Erro Absoluto entre os mapas do eixo Y e Z.

A partir do erro gerado pela composição dos mapas Y e Z, criou-se uma curva de correção que é aplicada online, durante o processo, como mostrado no passo 3 e passo 4 do fluxograma da Figura 56.

Para ilustrar a diferença entre os métodos utilizados se tem na Figura 131 os mapas Y e Z de uma junta utilizando o método de leitura prévia sobreposto pelo método antigo.

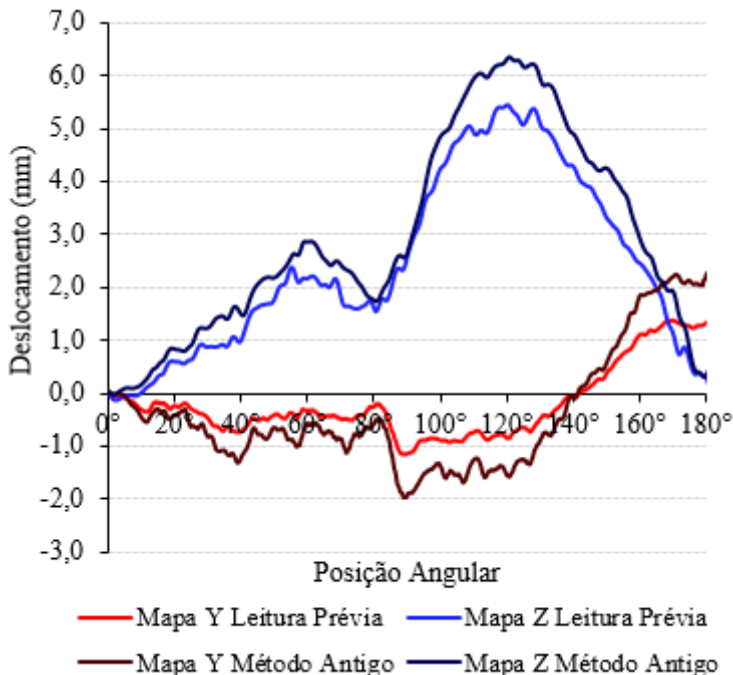


Figura 131 – Comparação entre os mapas Y e Z com o método com e sem leitura prévia.

Pode-se observar que há divergências entre as curvas, onde os mapas utilizando o método antigo possuem até 1,2 mm de defasagem na correção da trajetória em relação ao método de leitura prévia, ou seja, devido aos desvios concernentes ao trilho somado ao *offset* de medição, se tem esta inconsistência que neste caso em específico é de 1,2 mm, entretanto esse erro pode ser prejudicial para a junta, tanto ocasionando em perfurações como falta de penetração.

Os desvios associados ao trilho, as quais pelos motivos já abordados, causam interferências na geração e manutenção da trajetória. Estas interferências podem gerar defeitos que muitas vezes acabam invalidando a peça e, gerando diversas operações de retrabalho. Nos testes utilizando o método sem leitura prévia os desvios supracitados geraram um erro na posição sobre-cabeça do duto que ocasionou a perfuração da raiz, além de gerar um cordão de solda com ondulações (descentralização) o que por sua vez, gerou falta de penetração na raiz,

como mostra a Figura 132, estas ondulações na etapa de preenchimento podem ser prejudiciais, causando falta de fusão por exemplo.

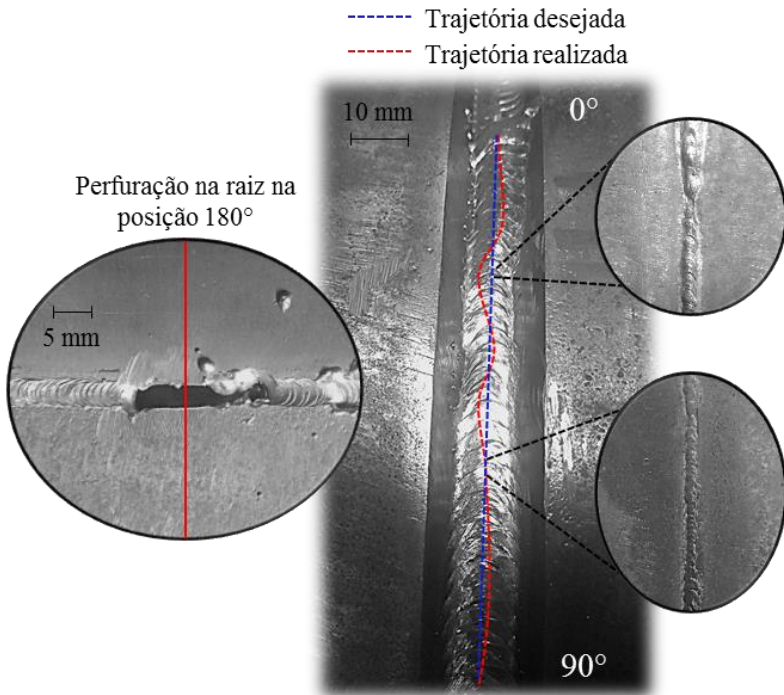


Figura 132 – Teste utilizando o método sem leitura prévia com detalhe aos defeitos constatados.

Utilizando o método de leitura prévia obteve-se uma melhora significativa no seguimento da junta, validado por meio da soldagem de 2 juntas orbitais soldadas de 0 a 180° de ambos os lados do tubo, partindo da posição plana à sobre cabeça, trocando o STL de lado.

Tanto no primeiro como no segundo corpo prova pode-se observar que para ambos os lados da junta obteve-se continuidade e penetração adequada da raiz, e em sua sobreposição nos extremos, conforme ilustram as Figura 133 e Figura 134.

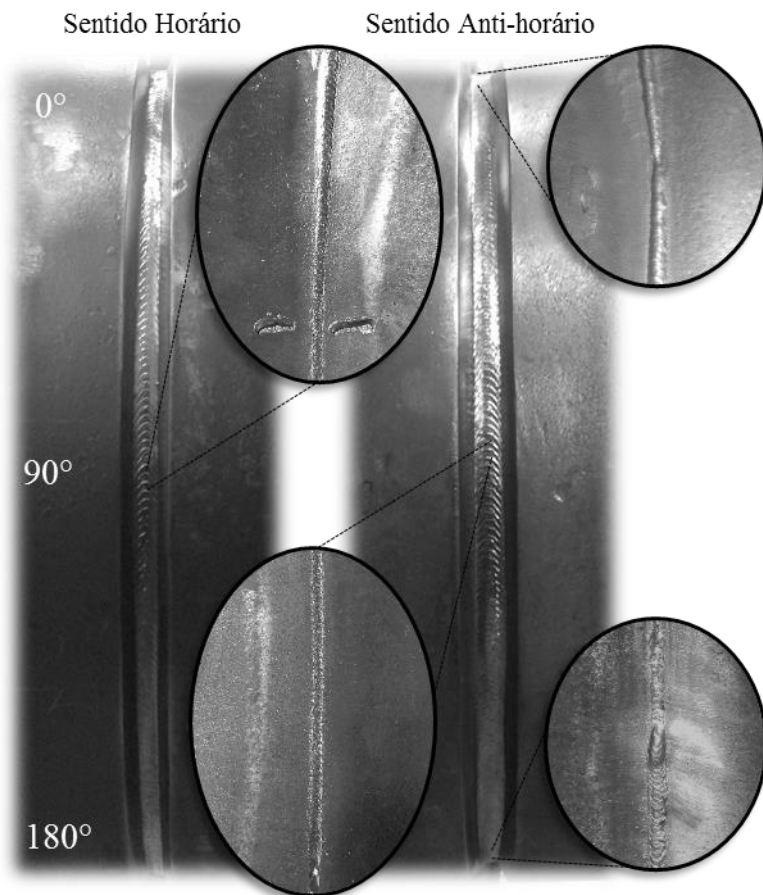


Figura 133 – Corpo de prova 1 da matriz de ensaios com solda.



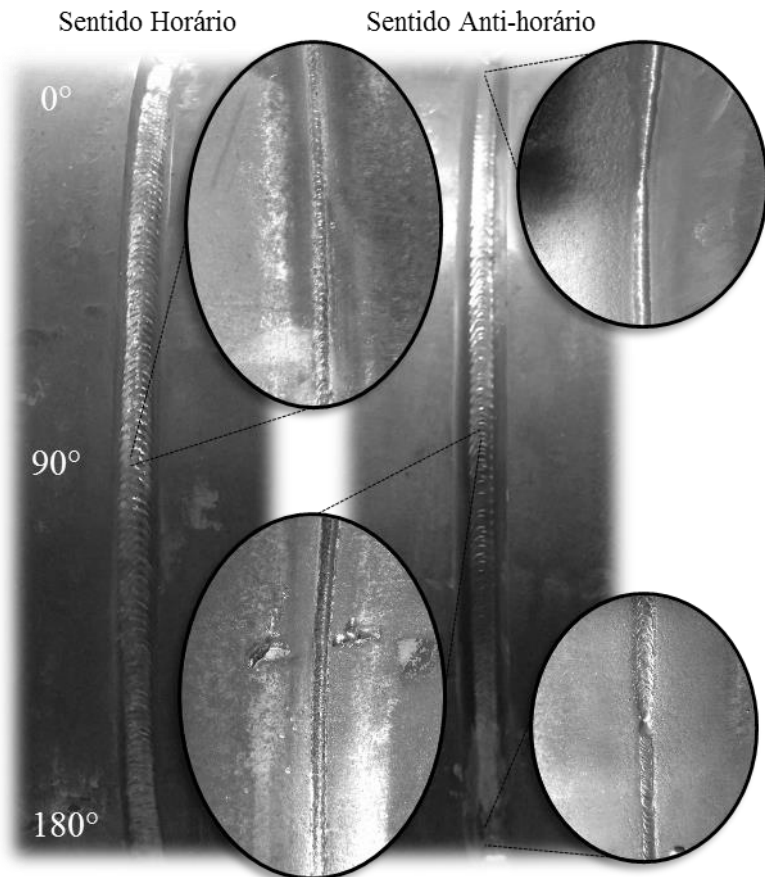


Figura 134 – Corpo de prova 2 da matriz de ensaios com solda.

Para a qualificação dos passes de raiz feitos nos corpos de prova, foram utilizados os critérios descritos no capítulo 3.2.3, para o limite de concavidade foi utilizado o valor máximo de  $-0,5$  mm e para o reforço foi utilizado a relação de largura da raiz para 5 quadrantes ao longo do duto, estes segundo a ISO 5817 conforme descrito na Tabela 14.

Tabela 14 – Limites de referência para o reforço da raiz (mm).

	CP 1		CP 2	
	Horário	Anti-horário	Horário	Anti-horário
0°	2,2	2,2	2,2	2,2
45°	1,9	2	2,2	2
90°	2,2	1,6	2	2
135°	2	1,9	2	2
180°	2	2	2,4	2,4

Os resultados das medições para os cinco quadrantes estão descritos na Tabela 15. Nas medições de concavidade pode-se observar que todos os quadrantes ficaram abaixo do limite de -0,5 mm.

Para as medições de reforço, levando em consideração a relação com a largura da raiz em cada quadrante pode-se observar que todas as medições ficaram dentro do limite estabelecido respectivamente.

Tabela 15 – Medições do reforço e concavidade da raiz (mm).

	CP 1		CP 2	
	Horário	Anti-horário	Horário	Anti-horário
0°	0	0	2	2
45°	1,5	1,8	2,5	2
90°	0	0	0	0
135°	-0,2	0	0	-0,2
180°	-0,4	-0,4	-0,2	-0,2

Contudo, pode-se observar que além do algoritmo de seguimento de junta, o adaptativo também funcionou corretamente, onde durante a montagem dos corpos de prova não preocupou-se em manter o mesmo gap ao longo da junta como mostram os gráficos da Figura 135 e Figura 136 e, mesmo assim as juntas ficaram dentro dos critérios estabelecidos previamente. Na região 0° das juntas anti-horárias pode observar uma abertura de cerca de 7,5 mm qual representa o começo do cordão anterior, ou seja, sua sobreposição.

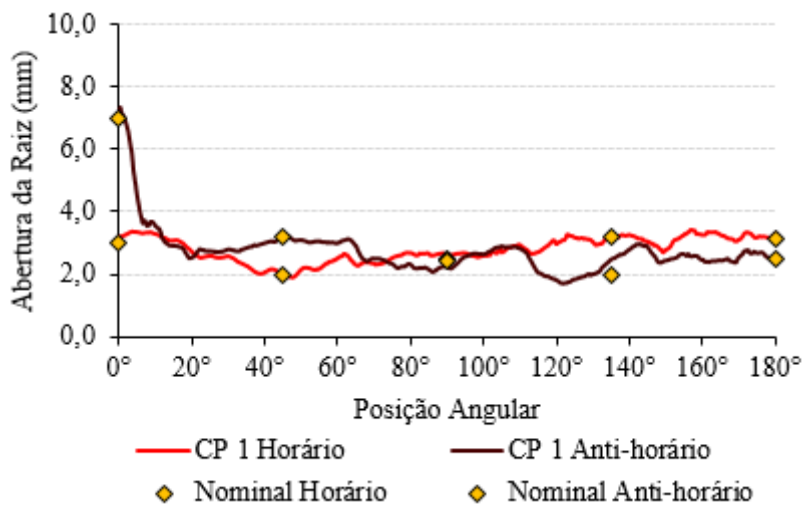


Figura 135 – Variação do Gap do corpo de prova 1.

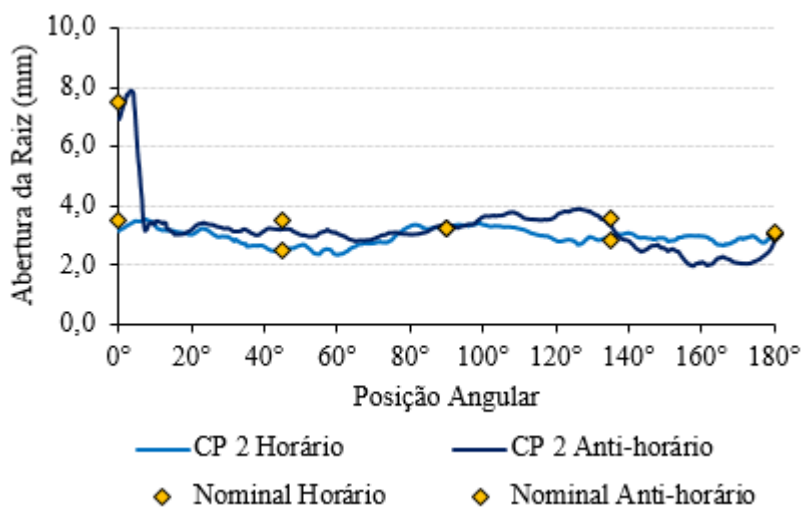


Figura 136 – Variação do Gap do corpo de prova 2.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Os processos avançados de soldagem concatenam o melhor da tecnologia e da ciência aplicada. Com isto, se tem processos complexos que unem diversas áreas do conhecimento de engenharia, os necessita de um amplo conhecimento destas para atuar sobre o mesmo de forma a melhorá-lo e a explorar suas possibilidades. Neste contexto, a variante CCC do processo MIG, como oferece a possibilidade de alteração de todas às variáveis de soldagem, nele disponível, tende a alocar complexidade em sua parametrização.

Há uma interdependência entre as variáveis e uma influência distinta de cada uma sobre o processo, onde neste trabalho, pode-se observar que a variável Di3 responsável pela imposição de uma taxa constante de corrente, durante o curto-circuito, tem uma influência significativa sobre o funcionamento do algoritmo que controla a reabertura do arco. Se a mesma for exacerbada tende a gerar um efeito cíclico de oscilação sobre a poça de fusão, gerando intervalos com reabertura do arco com potências elevadas, o que gera instabilidade, que comprometem além das características intrínsecas do processo, que são: baixa emissão de respingos, fumos e aporte térmico (em relação aos processos convencionais). Às características metalúrgicas do cordão de solda, gerando defeitos e discontinuidades nos mesmos.

A influência do meio (configurações funcionais) sobre a capacidade dos sistemas de sensoriamento LASER com manipuladores de base móvel para correção de trajetória não é bem explorada na literatura. Este trabalho demonstrou que este fator tem relevância fundamental para o funcionamento de tais sistemas. A desconsideração de perturbações retroativas da trajetória (advindas da movimentação da base sobre um trilho deformável) leva a inconsistências nas ações de correção de posição da tocha.

Percebe-se, também, que independentemente da base de apoio do manipulador, haverá influência do *offset* de medição sobre a leitura do sensor, o que é incontornável neste tipo de sistema de visão. Contudo, o método de leitura prévia da junta, desenvolvido e demonstrado, permite a correção e manutenção da trajetória, frente a deformações do trilho. Esta inovação, consequentemente, maior robustez e confiabilidade ao

sistema de soldagem orbital adaptativa em desenvolvimento e demonstra seu potencial de aplicação para situações reais de soldagem em campo.

Outro fator que pesa para a operacionalidade deste sistema é sua confiabilidade quanto à calibração dos eixos, uma vez que os sistemas analisados não possuíam *feedback* que garantisse o perfil de deslocamento programado, compensando as folgas concernentes ao mesmo. Entretanto, a utilização de um tensor sobre o eixo Y, por exemplo, melhorou significativamente a confiabilidade do mesmo. O uso do tensor, apesar de ser uma solução simples, demonstrou um efeito de melhora significativa.

Nota-se, portanto, que o método de leitura prévia para compensar os desvios associados ao trilho/*offset* de medição de fato melhora significativamente a geração de trajetória e, por sua vez, a operacionalidade do sistema de soldagem adaptativa. Contudo, ainda é perceptível a necessidade de avanços de *hardware*, no que diz respeito ao manipulador, principalmente no controle dos eixos. A combinação de aprimoramentos do *hardware* e as soluções em *software* abordadas neste trabalho tem grande potencial para solucionar grande parte dos problemas de movimentação encontrados em sistemas automatizados de soldagem.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Nesta seção, sugere-se alguns tópicos que podem ser abordados em trabalhos futuros, sendo estes:

- Conceber e propor uma técnica com um segundo sensor atrás da tocha de soldagem sobre a geração da trajetória online em um único passe, verificando sua confiabilidade em relação ao método de leitura prévia;
- Criar um algoritmo de aquisição do *Tracking point* por meio de uma câmera, mirando sobre a poça de fusão. Com isto a influência do trilho ou base sobre a geração da trajetória tende a se atenuar;
- Analisar a transferibilidade de resultados para outros tipos de junta com vistas à criação de um banco de dados (parâmetros de soldagem) para diferentes tipos de junta, criando assim uma biblioteca para que o algoritmo de soldagem adaptativa abranja uma maior matriz de necessidades;
- Criar uma biblioteca de parâmetros para o enchimento da junta, e com isto avaliar a diferentes variantes do processo MIG, por exemplo, MIG convencional, CCC e *Soft MIG*, processos estes disponíveis na fonte IMC A7 da IMC, caracterizando quanto a qualidade e eficiência sobre a necessidade de produzir juntas conformes sobre a ótica de uma norma específica.

## REFERÊNCIAS

- [1] PETROBRAS. Exploração e Produção de Petróleo e Gás, 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/planejamento-estrategico-horizonte-2030-as-grandes-escolhas-da-petrobras.htm>>. Acesso em: 05 28 2018.
- [2] PIGOZZO, I. O. **SOLDAGEM TIG ORBITAL: OTIMIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E PROSPECÇÕES TECNOLÓGICAS PARA PROCEDIMENTOS DE PASSE DE RAIZ**. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 134. 2015.
- [3] CHO, D. W. et al. A study on V-groove GMAW for various welding positions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 9, p. 1640 - 1652, April 2013.
- [4] JEFF, N. Maximizing pipeline welding efficiency. **Welding Journal**, Miami, FL, v. 92, n. 6, p. 74 - 78, June 2013. ISSN 0043-2296.
- [5] BAE, K. -Y.; LEE, T.-H.; AHN, K. -C. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 120, n. 1-3, p. 458 - 465, November 2002.
- [6] KINDERMANN, R. **Soldagem Orbital Do Passe De Raiz – Algo-Ritmos Para Controle Adaptativo Por Meio De Sensoriamento Laser**. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 174. 2016.
- [7] XU, Y. et al. Computer vision technology for seam tracking in robotic GTAW and GMAW. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 32, p. 25 - 36, October 2014.
- [8] BRÜGGEMANN, L. C. **Investigações prospectivas em processos e técnicas para o passe de raiz na soldagem MIG/MAG orbital para união de dutos**. UFSC. Trabalho de conclusão de curso, Florianópolis, p. 92. 2013.
- [9] VIVIANI, A. B. **Intergração de um Sensor Laser a um Manipulador Cartesiano de Soldagem para Seguimento Automático de Junta**. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 99. 2015.
- [10] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG melhor entendimento melhor desempenho**. São Paulo: Artliber, 2014.
- [11] SILVA, R. H. G. E. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 127. 2005.
- [12] YAPP, D.; BLACKMAN, S. A. Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding. **COBEF - II Brazilian Manufacturing Congress**, 21 Maio 2003. 9.

- [13] DIRENE, H. **MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz**. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 108. 2014.
- [14] API. **API Standard 1104 - Welding of Pipelines and Related Facilities, 21ª ed.** American Petroleum Institute. [S.l.], p. 118. 2013.
- [15] DIRENE, H. F.; SILVA, R. H. G. E.; DUTRA, J. C. Comparação do Processo MIG/MAG em Transferências por Curto-Circuito em Controle de Corrente (CCC) com o Processo STT na Soldagem de Passes de Raiz em Dutos. **Conjectura e Informação ANP**, 2014. 15.
- [16] COURT, S. A.; POLLARD, G. Inclusion chemistry and morphology in shielded metal arc (SMA) steel weld deposits. **Metallography**, v. 22, n. 3, p. 219 - 243, May 1989.
- [17] COSTA, T. F. et al. Avaliação de Processos MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 4, p. 356 - 368, Out/Dez 2012.
- [18] SARTORI, F. et al. Uma Análise Comparativa entre Diferentes Versões de Variantes Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital. **Soldagem e Inspeção**, v. 22, n. 4, p. 442 - 452, 2017.
- [19] BEESON, R. Pipeline Welding Goes Mechanized. **Welding Journal**, Miami, FL, v. 78, n. 11, p. 47 - 49, November 1999. ISSN 0043-2296.
- [20] JOHNSEN, M. R. U.S. Pipeline Industry Enters New Era. **Welding Journal**, Miami, FL, v. 78, n. 11, p. 37 - 41, November 1999. ISSN 0043-2296.
- [21] SERIMAX. Disponível em: <<http://www.serimax.com/en/about-us-premium-welding-solutions/our-history/>>. Acesso em: 21 Março 2018.
- [22] SERIMAX. Datasheet Saturnax 01. Disponível em: <<http://www.serimax.com/assets/assets/Saturnax-01-Welding-Bug-Refineries-Datasheet-BD.pdf>>. Acesso em: 21 Março 2018.
- [23] SERIMAX. Datasheet Saturnax 09. Disponível em: <<http://www.serimax.com/assets/assets/SATURNAX09-Datasheet-BD.pdf>>. Acesso em: 21 Março 2018.
- [24] BLACKMAN, S. A.; DORLING, D. V. Technology Advancements Push Pipeline Welding Productivity. **Welding Journal**, Miami, FL, v. 79, n. 8, p. 39 - 44, August 2000. ISSN 0043-2296.
- [25] CRC-EVANS. Disponível em: <<http://www.crc-evans.com/equipment/welding-machines>>. Acesso em: 22 Março 2018.
- [26] RAJAGOPALAN, S. CRC-Evans Automatic Welding Introduces Laser Vision Welding System. **Pipeline e Gas Journal**, v. 242, n. 7, July 2015.
- [27] EMMERSON, J. G. FCAW Orbital Pipe Welding Technology Improves Fab Shop Productivity. **Welding Journal**, Miami, FL, v. 78, n. 11, p. 57 - 60, November 1999. ISSN 0043-2296.



- [28] MAGNATECH. Pipeliner II 609 - Orbital weld head for multi-pass GMAW/FCAW pipe welding, 2018. Disponível em: <<http://magnatech-international.com/content/uploads/2014/08/Pipeliner-II-609.pdf>>. Acesso em: 22 Março 2018.
- [29] SPS - SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. Disponível em: <[http://sps-soldagem.com.br/sobre\\_sps.php#topico01](http://sps-soldagem.com.br/sobre_sps.php#topico01)>. Acesso em: 22 Março 2018.
- [30] BIDESE, E. **Tecnologias Para Controle Adaptativo Da Soldagem De Raiz Utilizando Sensores De Triangulação Laser**. UFSC. Tese de Doutorado. Florianópolis. 2017.
- [31] DVS. **Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen**. DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren. [S.l.], p. 8. 2005.
- [32] MENDONÇA, F. K. **EVOLUÇÃO DA TÉCNICA DE SEGUIMENTO DE JUNTA VIA SENSORIAMENTO DO ARCO PARA OPERAÇÕES DE SOLDAGEM EM POSIÇÕES FORÇADAS**. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 125. 2013.
- [33] REISGEN, U. et al. Machine vision system for online weld pool observation of gas metal arc welding processes. **Weld World**, v. 58, p. 707 - 711, may 2014. ISSN 10.1007/s40194-014-0152-9.
- [34] KENNEDY, W. P. The Basics of Triangulation Sensors, 2017. Disponível em: <<http://archives.sensorsmag.com/articles/0598/tri0598/>>. Acesso em: 23 Novembro 2017.
- [35] JUNEGHANI, B.; NORUK, J. Keeping Welding Costs from Spiraling Out of Control. **The Fabricator**, Elgin, IL, p. 42 - 44, Janeiro 2009.
- [36] YE, Z. et al. Passive Vision Based seam Traking System for Pulsed-MAG Welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 67, n. 2013, p. 1987 - 1996, Novembro 2012.
- [37] META VISION. **Smart Laser Tools User, Manual User, Version 1.0.1**. [S.l.]. 2012.
- [38] DING, Y.; HUANG, W.; KOVACEVIC, R. An on-line shape-matching weld seam tracking system. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**, v. 42, p. 103 - 112, June 2016.
- [39] IMC SOLDAGEM. Disponível em: <<https://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/sistemas-de-monitoramento>>. Acesso em: 24 Abril 2018.
- [40] BURSTER - THE MEASUREMENT SOLUTION. Disponível em: <<https://www.burster.com/en/sensors/p/detail/8712-8713/>>. Acesso em: 24 Abril 2018.
- [41] IDT VISION. **IDT Cameras specification Manual**. Tallahassee, FL, p. 138. 2017.

- [42] MARQUES, C. **Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema flexível nacional**. UFSC. Tese de Doutorado. Florianópolis, p. 210. 2017.
- [43] ISO. **ISO 5817: Welding - Fusion-Welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections**. International Standard: Switzerland. [S.l.]. 2003.
- [44] ASME. **ASME IX: Qualifications Standard for Welding, Brazing and Fusing Operators**. The American Society of Mechanical Engineers. New York. 2015.
- [45] BAGAD, V. S. **Mechatronics**. 4ª. ed. [S.l.]: Technical publication pune, 2009. 1-8 p. ISBN 9788184314908.
- [46] TAO, G.; KOKOTOVIÉ, P. V. Continuous-Time Adaptive Control of Systems with Unknown Backlash. **IEEE Transactions on automatic control** , v. 40, n. 6, p. 1083-1087, June 1995.
- [47] FIORI, A. **MODELAGEM MATEMÁTICA DA DINÂMICA DE UMA TRANSMISSÃO MECÂNICA DO TIPO FUSO DE ESFERAS DE UM ROBÔ GANTRY**. Unijuí. Dissertação de Mestrado. Panambi, RS, p. 109. 2015.
- [48] TBI INDUSTRIES. **MIG/MAG Welding torches TBI Expert**. [S.l.], p. 32. 2018.
- [49] TBI INDUSTRIES. **MIG/MAG Machine Torchers**. [S.l.], p. 4. 2018.
- [50] TBI INDUSTRIES. **TBi 511 E3 - ESAB**. [S.l.], p. 3. 2018.
- [51] GOHR, R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. UFSC. Tese de Doutorado. Florianópolis, p. 165. 2002.