

Renon Steinbach Carvalho

**TECNOLOGIAS PARA EXECUÇÃO DE REVESTIMENTOS VIA  
SOLDAGEM AUTOMÁTICA DAS PAREDES D'ÁGUA DE  
USINAS TERMELÉTRICAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra  
Coorientador: Prof. Dr. Nelso Gauze Bonacorso

Florianópolis  
2015

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

Carvalho, Renon Steinbach Carvalho  
Tecnologias para Execução de Revestimentos Via Soldagem Automática das Paredes D'Água de Usinas Termelétricas / Renon Steinbach Carvalho

Carvalho ; orientador, Jair Carlos Dutra Dutra ;  
coorientador, Nelso Gauze Bonacorso Bonacorso. -  
Florianópolis, SC, 2015.  
178 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. manipulador de soldagem. 3. revestimento de painéis. 4. sequência de soldagem. 5. deformação de tubos. I. Dutra, Jair Carlos Dutra. II. Bonacorso, Nelso Gauze Bonacorso. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Renon Steinbach Carvalho

**TECNOLOGIAS PARA EXECUÇÃO DE REVESTIMENTOS VIA  
SOLDAGEM AUTOMÁTICA DAS PAREDES D'ÁGUA DE  
USINAS TERMELÉTRICAS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, março de 2015.

---

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

---

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Coorientador – IFSC

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr. - Coordenador do Curso

**Banca Examinadora**

---

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Presidente

---

Prof. Marcelo Ferreira Motta, Dr. Eng. (UFC) – Relator

---

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng. (UFSC) - Membro

---

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr.Eng. (UFSC) – Membro

---

Norton Zanette Kejelin, Dr. Eng. (PETROBRAS) – Membro

---

Giovani Dalpiaz, Dr. Eng. (PETROBRAS) – Membro

---

Raul Gorh Júnior, Dr. Eng. (IMC - Soldagem) – Membro



Este trabalho é dedicado aos meus  
pais, Renato e Marivone.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente às pessoas que colaboraram, em diferentes contextos, na realização deste trabalho, em especial:

- ao meu mestre e coorientador, Prof. Nelso Gauze Bonacorso, pelos conhecimentos transmitidos ao longo dos últimos doze anos, durante graduação, mestrado e este doutorado. Agradeço também pelas oportunidades oferecidas e por despertar o entusiasmo para a pesquisa. Sem dúvida o principal responsável pela decisão de seguir o caminho da docência;
- ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação, pelo exemplo de dedicação e pela oportunidade de compor a equipe do LABSOLDA;
- aos Eng. Raul Gohr Júnior, Régis Henrique Gonçalves e Silva, aos Tecg<sup>o</sup> Fernando Costenaro Silva, Ricardo Campagnin, Jônathas Alexandre Alves, e ao Designer Marcelo P. Okuyama pela colaboração em diversos aspectos deste trabalho;
- à toda a equipe de engenheiros, tecnólogos, técnicos, estagiários e pessoal de apoio do LABSOLDA, pelo suporte em questões mecânicas, computacionais, eletrônicas, gráficas, administrativas e organizacionais, que muito contribui nas várias etapas do trabalho, em especial à Márcia Paula Thiel, Ramon Natal Meller, Rodrigo da Silva Machado, Ivan Olszanski Pigozzo, Renan Kindermann, Cleber Guedes, Diego Paulino, Diego Correia, Bruna Martinello Savi, Helinton Direne Filho, João Facco de Andrade, Cleber Marques, Alberto Bonamigo Viviani, Eduardo Bidese Puhl.
- à Mariana Kühn Scartom pelo apoio e compreensão na reta final;
- à Universidade Federal de Santa Catarina e ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, por proporcionar as condições necessárias para realização deste trabalho.
- à TRACTEBEL Energia, em especial ao Eng. Luiz Felipe, Franco Wronski Comeli e a equipe de P&D, pela viabilização da pesquisa e testes em campo.
- ao Instituto Federal Catarinense, por auxiliar em questões pertinentes a realização deste trabalho.





“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

(Ayrton Senna)



## RESUMO

Os tubos que compõem as paredes das caldeiras das usinas termelétricas sofrem perda de espessura por erosão e corrosão durante o seu funcionamento, motivo pelo qual a diminuição da espessura é avaliada periodicamente. A solução mais utilizada para aumentar a disponibilidade das usinas termelétricas é o revestimento por soldagem MIG/MAG das paredes das caldeiras com ligas metálicas mais resistentes ao desgaste. Os reparos são realizados no local ou previamente e, na maioria das vezes, de forma manual. A operação *in loco* apresenta problemas técnicos e econômicos, em virtude de difícil acesso, posições de soldagem desfavoráveis, retrabalho e consumo excessivo de material de deposição. Os ganhos obtidos com uma operação robotizada de soldagem são muitos, no entanto, os robôs convencionais não podem ser usados para esta tarefa em virtude da limitação do espaço para sua instalação nos andaimes montados no interior da caldeira. Já na operação em oficina existe o problema de falta de rigidez na base ao se instalar o robô sobre um trilho para aumentar seu espaço de trabalho. Neste projeto, um manipulador foi desenvolvido e construído, com a finalidade de revestir superfícies tubulares por soldagem. Ainda, foi desenvolvida uma metodologia para o revestimento de painéis tubulares em oficina, cujo objetivo é substituir grandes regiões afetadas da caldeira, bem como fabricar caldeiras mais resistentes ao desgaste. Para tornar a operação de revestimento dos painéis em oficina mais produtiva, e com melhor qualidade do que à realizada por soldadores, o manipulador específico apresenta quatro graus de liberdade em conjunto com um adequado procedimento de soldagem. Este procedimento engloba, além dos parâmetros de soldagem e de oscilação da tocha, uma técnica de resfriamento dos painéis, e um método que define a melhor sequência de soldagem, buscando assim, minimizar deformações térmicas nos tubos. Os resultados práticos da estratégia de revestimento de painéis, em laboratório e oficina, com aço inoxidável ER309L, no sentido vertical descendente, são apresentados com o objetivo de validar o equipamento, a metodologia e os procedimentos de soldagem desenvolvidos.

**Palavras-chave:** manipulador CNC, revestimento de painéis, sequência de soldagem, oscilação da tocha, MIG/MAG modo corrente, MIG/MAG CA.



## ABSTRACT

The tubes that compose the walls of boilers of power plants suffer thickness loss by erosion and corrosion during operation, being that the reason why the reduction of thickness is evaluated periodically. The solution most utilized to increase the availability of power plants is the gas metal arc welding (GMAW) cladding of the walls of the boilers with more wear resistant metal alloys. The repairs are done locally or at a shop and, in the majority of times, manually. The operation in loco presents technical and economic problems because of difficult access, unfavorable welding positions, rework and excessive consumption of deposition material. The gains obtained with a robotic welding operation are many, however, conventional robots cannot be used for this job due to limitation of space for installation in the mounted scaffolding in the boiler. Also, in the operation at the shop there is the problem of stiffness of the base when installing the robot on a rail to increase its workspace. In this project, a robot was developed and built with the purpose of cladding surfaces through deposition of weld material. Also, a methodology was developed for the cladding of panels, at the shop, with the goal of replacing large affected areas of the boiler, as well as to manufacture boilers that are more resistant to wear. This procedure includes, besides the welding parameters and torch oscillation, a cooling technique for panels and a method that defines the sequence of the best welding, thus seeking to minimize thermal deformations in the tubes. The practical results of the panel cladding strategy, in laboratory and workshop, with stainless steel ER309L, in descending vertically, are presented in order to validate the equipment, proposed methodology and developed welding procedures.

**Keywords:** CNC robot, cladding panels, sequence of welding, torch oscillation, GMAW current mode, GMAW AC.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Região afetada por erosão e corrosão .....	31
Figura 1.2.	Em (a) e (b) operação de inspeção e limpeza de tubos ...	32
Figura 1.3.	Instalação de tubos novos .....	33
Figura 2.1.	Vista superior das paredes de caldeiras [33].....	36
Figura 2.2.	Em (a) revestimento de tubos no interior da caldeira [16] e em (b) painel revestido manualmente em oficina da TRACTEBEL	
Energia	.....	37
Figura 2.3.	Em (a) robô antropomórfico de 6 graus de liberdade [28] e em (b) TARTÍLOPE V4 [29] .....	39
Figura 2.4.	Manipuladores utilizados para o revestimento de painéis tubulares [30, 31] .....	40
Figura 2.5.	Manipulador utilizado para o revestimento de painel tubular em oficina [32].....	40
Figura 2.6.	Eixos usados na oscilação da tocha: (a) apenas o eixo Y e (b) apenas o eixo A [33].....	41
Figura 2.7.	Método de acionamento em malha aberta .....	43
Figura 2.8.	Método de acionamento em malha fechada. Em (a) empregando um controlador e em (b) com a utilização de um servo <i>driver</i> .....	43
Figura 2.9.	Tela genérica do controlador CNC Mach3 .....	47
Figura 2.10.	Em (A) interior da caldeira 4 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda e em (B) visualização do pó no interior da caldeira .....	49
Figura 2.11.	Deformação em painel revestido.....	50
Figura 2.12.	Ovalização em tubo novo revestido .....	50
Figura 2.13.	Sequência de cordões sugerida pelo EPRI [14, 48] ...	51
Figura 2.14.	Sequência de cordões sugerida [48, 49].....	52
Figura 2.15.	Sequência de cordões sugerida [50].....	52
Figura 2.16.	Sequência de cordões sugerida [47].....	53
Figura 2.17.	Trajetórias sem e com oscilações mais usadas.....	54
Figura 2.18.	Eixos envolvidos na oscilação: (a) somente o eixo Y, (b) somente o eixo A e em (c) os eixos Y e Z [43] .....	54
Figura 2.19.	Esquema do processo aspensão térmica por arco elétrico [51] .....	56
Figura 2.20.	Esquemático de uma tocha genérica associada aos principais elementos utilizados no processo PTA-P [54].....	57
Figura 2.21.	Forças envolvidas no processo de transferência [56].	59
Figura 2.22.	Campo de incidência dos modos de transferência metálica em MIG/MAG em função da corrente e da tensão [55].....	60

Figura 2.23.	Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência do tipo curto-circuito [55].....	61
Figura 2.24.	Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência do tipo goticular [61] .....	62
Figura 2.25.	Representação do processo de transferência no modo pulsado [61] .....	64
Figura 2.26.	Modelo de forma de onda do MIG/MAG CA [65]....	65
Figura 2.27.	Escalada do arco voltaico no MIG/MAG CA durante polaridade direta .....	66
Figura 2.28.	Ilustração das alterações das seções transversais no processo MIG CA. Em (a) polaridade inversa, em (b) 10% polaridade direta, em (c) 30% polaridade direta, em (d) 50% polaridade direta, em (e) 70% polaridade direta e em (f) 90% polaridade direta [55].....	66
Figura 3.1.	Estrutura organizacional das principais áreas do projeto	70
Figura 3.2.	Fontes de energia: em (A) DIGITEC 450 e em (B) DIGIPLUS A7 .....	71
Figura 3.3.	Tocha TBi 241Aut.....	71
Figura 3.4.	Em (A) câmera térmica FLIR SC 7000, em (B) câmera de alta velocidade IDT Y4-S1, em (C) robô Motoman UP6 e em (D) TARTÍLOPE V4 .....	72
Figura 3.5.	Em (A) FLIR ALTAIR, em (B) IDT Motion Studio e em (C) SAP .....	73
Figura 3.6.	Bancada inicial para revestimento robotizado de painel tubular. Em (1) Fonte de soldagem, (2) Robô CNC, (3) Tubos de paredes de caldeira e (4) Gabinete de controle com IHM.....	74
Figura 3.7.	Bancada final para revestimento robotizado de painel tubular. Em (1) Gabinete de controle, (2) Fonte de soldagem, (3) Unidade de refrigeração, (4) Alimentador de arame, (5) Tubos de paredes de caldeira e em (6) Robô .....	75
Figura 3.8.	Dimensões geométricas dos cordões de solda abordadas no presente trabalho .....	77
Figura 3.9.	Especificações dimensionais do revestimento [33].....	77
Figura 3.10.	Exemplo de uso do software de tratamento de imagens para cálculo da diluição da solda .....	78
Figura 4.1.	Bancada para ensaios comparativos. Em (a) configuração para posição plana e em (b) para posição vertical.....	80
Figura 4.2.	Superfície dos cordões. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz.....	82



Figura 4.3.	Macrografias comparativas. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz.....	82
Figura 4.4.	Velocidade transversal da gota .....	84
Figura 4.5.	Bancada para filmagem da velocidade da gota.....	84
Figura 4.6.	Trajatória da gota para frequência de oscilação de 1,5 Hz . .....	85
Figura 4.7.	Trajatória da gota para frequência de oscilação de 2,5 Hz . .....	86
Figura 4.8.	Trajatória da gota para frequência de oscilação de 3,5 Hz . .....	87
Figura 4.9.	Bancada de ensaios. Em (A) robô (1) e fonte de soldagem (2) e em (B) realização do ensaio .....	90
Figura 4.10.	Dimensões, em milímetros, dos corpos de provas utilizados e dos cordões de solda .....	90
Figura 4.11.	Imagens da superfície dos cordões com diferentes frequências de oscilação. Em (A) 2 Hz, em (B) 3 Hz e em (C) 4 Hz....	90
Figura 4.12.	Regiões das análises macrográficas .....	91
Figura 4.13.	Macrografia das amostras na região A juntamente com as medidas de reforço e penetração.....	92
Figura 4.14.	Macrografia das amostras na região B.....	92
Figura 4.15.	Macrografia das amostras na região C.....	92
Figura 4.16.	Regiões onde foram feitas as análises químicas. Em (A) amostra de 2 Hz e em (B) amostra de 4 Hz .....	93
Figura 4.17.	Trajatória de oscilação .....	95
Figura 4.18.	Comprimentos de oscilação em relação à velocidade de soldagem e frequência.....	96
Figura 4.19.	Linhas de medição de temperatura. Em (A), (C) e (E) medição no sentido vertical respectivamente com 1,5, 2,5 e 3,5 Hz de frequência de oscilação. Em (B), (D) e (F) medição no sentido horizontal com 1,5, 2,5 e 3,5 Hz de frequência de oscilação .....	99
Figura 4.20.	Medição de temperatura no sentido vertical. Em (A) 1,5 Hz, em (B) 2,5 Hz e em (C) 3,5 Hz de frequência de oscilação....	100
Figura 4.21.	Medição de temperatura no sentido horizontal. Em (A) 1,5 Hz, em (B) 2,5 Hz e em (C) 3,5 Hz de frequência de oscilação....	101
Figura 4.22.	Ocorrência de pontos de temperatura. Em (A) 1,5 Hz, em (B) 2,5 Hz e em (C) 3,5 Hz de frequência de oscilação .....	102
Figura 4.23.	Forma de onda da corrente de soldagem no MIG CA.... .....	104
Figura 4.24.	Cordões no MIG CA e MIG CC .....	104

Figura 4.25.	Cordões no MIG CA com diferentes amplitudes de oscilação .....	107
Figura 5.1.	Modelo do sistema proposto .....	109
Figura 5.2.	Curso da junta prismática Z .....	111
Figura 5.3.	Subsistemas que compõem uma máquina automatizada....	113
Figura 5.4.	Em (A) transmissão de movimento por intermédio de pinhão cremalheira e em (B) por fuso de esferas recirculantes.....	119
Figura 5.5.	Junta rotacional A. Em (A) transmissão por coroa/sem-fim e em (B) polia-correia.....	120
Figura 5.6.	Esquema funcional do sistema robótico para o revestimento de tubos de caldeiras de usinas termelétricas .....	123
Figura 5.7.	Junta Prismática X.....	124
Figura 5.8.	Junta Prismática Z.....	125
Figura 5.9.	Junta Prismática Y.....	125
Figura 5.10.	Junta Rotacional A.....	126
Figura 5.11.	Componente de acoplamento.....	126
Figura 5.12.	Montagem do sistema .....	127
Figura 5.13.	Em (A) vista lateral do TARTÍLOPE VX sobre o painel tubular e em (B) perspectiva isométrica.....	127
Figura 5.14.	Projeto do TARTÍLOPE VX explodido. Em (A) vista lateral e em (B) perspectiva isométrica .....	128
Figura 5.15.	Diagrama de blocos funcional do sistema robótico .	129
Figura 5.16.	Em (a) tela inicial de programação do manipulador e em (b) tela de seleção da forma de trajetória .....	130
Figura 5.17.	Diagrama de blocos instrumental do sistema robótico dedicado ao revestimento de paredes de caldeiras .....	130
Figura 5.18.	Painel eletroeletrônico com tecnologia CNC.....	131
Figura 5.19.	Novo diagrama de blocos instrumental .....	132
Figura 5.20.	Concepção funcional do sistema de controle do manipulador .....	133
Figura 5.21.	Painel eletroeletrônico com tecnologia ARM: (A) vista frontal, (B) vista traseira, (C) vista lateral direita e (D) vista lateral esquerda .....	134
Figura 5.22.	Fluxograma do software de controle .....	135
Figura 5.23.	Bloco diagrama da hierarquia de objetos do software de controle .....	137
Figura 5.24.	Medição das juntas do TARTÍLOPE VX: (A) bancada de ensaios, (B) medição da junta X, (C) medição da junta Y e em (D) medição da junta Z.....	138
Figura 5.25.	Velocidade na junta prismática X.....	139

Figura 5.26.	Oscilação triangular na junta prismática Y .....	139
Figura 5.27.	Oscilação trapezoidal na junta prismática Y .....	140
Figura 5.28.	Oscilação triangular na junta prismática Z.....	140
Figura 5.29.	Posicionamento do trilho em relação ao tubo com destaque para os pinos de apoio .....	141
Figura 5.30.	Apoio do bocal da pistola em superfície plana e dificuldade sobre o tubo .....	142
Figura 5.31.	Em (A) comparação entre o bocal original plano e o novo bocal e em (B) encaixe do novo bocal à peça .....	142
Figura 5.32.	Gabarito utilizado para soldagem dos pinos .....	142
Figura 5.33.	Desalinhamento entre membranas e tubos .....	143
Figura 5.34.	Em (A) projeto do sistema de alinhamento de tubos e em (B) seção de parede pronta para a soldagem de união entre tubo e membrana .....	143
Figura 5.35.	Sistema de refrigeração dos painéis: a) desenho esquemático do circuito de água dentro dos painéis; b) espigão; c) tampa de nylon; d) mangueiras rígidas .....	144
Figura 5.36.	Termografia ao termino da soldagem. Em (a) sem refrigeração e em (b) com refrigeração .....	145
Figura 5.37.	Etapa de revestimento da membrana [29].....	147
Figura 5.38.	Etapa de revestimento da junção membrana-tubo [29].. .....	148
Figura 5.39.	Estratégia de revestimento dos tubos [29] .....	149
Figura 5.40.	Ordem de execução de um número par de cordões de solda no tubo em (a) e ímpar em (b) [29].....	150
Figura 5.41.	Sequência inovadora de execução dos cordões de solda .....	151
Figura 5.42.	Sequência de cordões para revestimento do tubo.....	151
Figura 5.43.	Determinação da amplitude angular da oscilação transversal pendular da tocha .....	152
Figura 6.1.	Em (a) resultado do revestimento do painel e em (b) a macrografia de um dos tubos [29].....	154
Figura 6.2.	Ovalização em tubo novo revestido com o uso do TARTÍLOPE V4 .....	155
Figura 6.3.	Em (a) marcação da mediatriz dos cordões, em (b) primeiro cordão da lateral, em (c) segundo cordão da lateral e (d) cordão de topo .....	156
Figura 6.4.	Em (a) superfície do painel revestido e em (b) detalhe da seção transversal.....	157
Figura 6.5.	Ovalização em tubo novo revestido com o uso do MIG/MAG corrente contínua.....	157

Figura 6.6. Pontos da superfície do revestimento para análise de composição química.....	158
Figura 6.7. Em (a) superfície do painel revestido e em (b) detalhe da seção transversal .....	159
Figura 6.8. Ovalização em tubo novo revestido com o uso do MIG/MAG CA.....	160
Figura 6.9. Em (a) bancada na posição vertical, em (b) painel com sistema de refrigeração e em (c) TARTÍLOPE VX sobre o painel.....	160
Figura 6.10. Em (a) painel empenado após o revestimento e em (b) detalhe do revestimento .....	161
Figura 6.11. Reforços.....	162
Figura 6.12. Penetrações .....	163
Figura 6.13. Diluições.....	163
Figura 6.14. Ovalização nos diferentes métodos de revestimento	164



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Dimensões das configurações de paredes mais encontradas. ....	36
Tabela 2.2. Composição química, em %, do aço 16Mo <sub>3</sub> [39].....	36
Tabela 2.3. Critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda [2]. ....	37
Tabela 2.4. Vantagens x desvantagens do acionamento com motores de passo .....	44
Tabela 2.5. Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua com escovas.....	44
Tabela 2.6. Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua sem escovas .....	45
Tabela 2.7. Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente alternada síncronos .....	45
Tabela 2.8. Classes e respectivos modos de naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG [55, 58].....	60
Tabela 3.1. Composição química, em percentual, do aço 309L.....	76
Tabela 3.2. Critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda [2]. ....	78
Tabela 4.1. Parâmetros da soldagem.....	81
Tabela 4.2. Análise da diluição e das características geométricas ....	83
Tabela 4.3. Composição química na superfície dos revestimentos ...	83
Tabela 4.4. Análise da velocidade da gota .....	88
Tabela 4.5. Análise de diluição para as amostras.....	93
Tabela 4.6. Composição química para as regiões especificadas para a amostra de 2 Hz .....	94
Tabela 4.7. Composição química para as regiões especificadas para a amostra de 4 Hz .....	94
Tabela 4.8. Parâmetros da soldagem MIG CA.....	103
Tabela 4.9. Largura dos cordões com MIG CA e MIG CC .....	105
Tabela 4.10. Análise da largura dos cordões no processo MIG/MAG CA .....	106
Tabela 5.1. Matriz morfológica.....	115
Tabela 5.2. Matriz de avaliação do controlador .....	116
Tabela 5.3. Matriz de avaliação do acionamento .....	118
Tabela 5.4. Matriz de avaliação da transmissão de movimento .....	120
Tabela 5.5. Matriz de avaliação do sensoramento .....	121



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

Ar: gás argônio  
ARM: Advanced RISC Machine  
At: amplitude de oscilação  
CA: corrente alternada  
CMT: *Cold Metal Transfer*  
CNC: Comando Numérico Computadorizado  
D : diluição (%)  
DBCP: distância bico de contato peça  
DFBC: distância flange bico de contato  
E: espessura de sobreposição  
 $E'_i$  e  $E''_i$ : pontos das extremidades laterais desta oscilação  
EPRI: Electric Power Research Institute  
eq.: equação  
ES: Energia de Soldagem  
ft: frequência de oscilação  
fps: frames per second  
HVOF: High velocity oxy-fuel  
 $I_b$ : corrente de base  
IHM: Interface Homem-Máquina  
 $I_m$ : corrente média  
 $I_n$ : corrente na fase negativa  
 $I_p$ : corrente de pulso  
 $I_s$ : corrente de soldagem  
 $I_t$ : corrente de transição  
M: mordedura  
MAG: Metal Active Gas  
MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura  
 $M_f$ : ponto central da oscilação da tocha de solda  
MIG: Metal Inert Gas  
Nc: número de cordões desejados  
Pe: penetração  
PTA-P: Plasma Transferred Arc alimentado com Pó  
R: reforço  
rpm: rotações por minutos  
 $t_b$ : tempo de base  
TIG: Tungsten Inert Gas  
 $t_n$ : tempo na fase negativa  
 $t_p$ : tempo de pulso  
Tt: período de oscilação



$U_s$ : tensão de soldagem  
 $U_m$ : tensão média de soldagem  
 $V$ : vale entre cordões  
 $V_g$ : velocidade da gota  
 $V_s$ : velocidade de soldagem  
 $V_t$ : velocidade transversal da tocha  
 $V_{tr}$ : velocidade de transferência da gota  
 $\alpha$ : é a amplitude de oscilação da tocha  
 $\beta$ : comprimento de arco a ser revestido  
 $\lambda$ : comprimento de oscilação  
 $\varphi$ : ângulo de sobreposição de cordões adjacentes  
 $\delta_i$ : ângulo de orientação da tocha



## SUMÁRIO

RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
LISTA DE FIGURAS .....	xv
LISTA DE TABELAS .....	xxii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS .....	xxiv
1. INTRODUÇÃO .....	31
1.2. Descrição dos Problemas .....	32
1.3. Objetivos e contribuições .....	33
1.4. Estrutura do Trabalho.....	35
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE .....	36
2.1. Caracterização da Superfície a ser Revestida.....	36
2.2. Manipuladores de Soldagem .....	37
2.3. Tecnologias de Acionamentos .....	42
2.4. Controladores de Movimento.....	45
2.5. Estratégias de Revestimento.....	48
2.6. Técnicas de Oscilação .....	53
2.7. Processos de Soldagem .....	55
2.7.1. Aspersão Térmica.....	56
2.7.2. PTA-P.....	56
2.7.3. Processo MIG/MAG.....	58
2.5.3.1 MIG/MAG Convencional .....	61
2.5.3.2 MIG/MAG Pulsado.....	63
2.5.3.3 MIG/MAG CA.....	65
2.8. Síntese deste Capítulo .....	67
3. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS .....	68
3.1. Estrutura Organizacional da Pesquisa .....	68
3.2. Equipamentos.....	71
3.2.1 Fontes de Energia.....	71
3.2.2 Tochas de Soldagem .....	71
3.2.3 Acessórios .....	72
3.2.4 Instrumentação .....	72
3.2.5 Descrição das Bancadas Principais .....	73
3.3. Materiais.....	76
3.3.1 Material de Aporte e Substrato.....	76
3.3.2 Gases .....	76
3.4. Ensaios .....	76
3.4.1 Ensaios de Soldagem.....	76
3.4.2 Determinação de Características Geométricas e Diluição....	77
3.4.3 Análise da Composição Química na Seção Transversal do Cordão de Solda.....	78

4.	ENSAIOS PRELIMINARES.....	79
4.1.	Comparação entre Soldagem na Posição Plana e na Posição Vertical .....	80
4.2.	Influência da Frequência de Oscilação da Tocha nas Características Geométricas e Químicas do Revestimento .....	89
4.3.	Método para a Definição das Variáveis de Deslocamento da Tocha de Soldagem .....	95
4.4.	Estudo Termográfico da Influência da Frequência de Oscilação da Tocha .....	97
4.5.	Análise da Largura dos Cordões na Soldagem com MIG/MAG CC e MIG/MAG CA .....	103
5.	PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO SISTEMA ROBÓTICO .....	108
5.1.	Requisitos do Sistema Robótico .....	108
5.2.	Concepção do Sistema Robótico.....	113
4.2.1	Controlador .....	115
4.2.2	Acionamento .....	117
4.2.3	Transmissão de Movimento .....	118
4.2.4	Sensores.....	120
5.3.	Esquema Funcional.....	121
5.4.	Detalhamento do Projeto do Robô.....	123
5.4.1.	Desenvolvimento Mecânico do Manipulador para Revestimento de Tubos de Caldeiras – TARTÍLOPE VX.....	123
5.4.2.	Desenvolvimento do Sistema de Controle .....	128
4.4.2.1	Versão Preliminar com Controlador CNC.....	128
4.4.2.2	Versão com Controlador Dedicado.....	131
4.4.2.2.1	Hardware do Controlador .....	132
4.4.2.2.2	Software do Controlador.....	134
5.5.	Ensaio de Validação do TARTÍLOPE VX.....	138
5.6.	Sistema Complementares.....	141
5.6.1.	Sistema de Fixação do Trilho aos Tubos.....	141
5.6.2.	Sistema de Alinhamento de Tubos.....	143
5.6.3.	Sistema de Refrigeração para as Paredes Tubulares ....	144
5.7.	Desenvolvimento de Trajetória Tridimensional de Soldagem	145
5.7.1.	Revestimento Membrana, Junção Tubo-Membrana e Tubo com o TARTÍLOPE V4 .....	146
5.7.2.	Revestimento Lateral, Topo e Membrana com o TARTÍLOPE VX.....	150
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	153
6.1.	Resultados Obtidos .....	153

6.1.1.	Resultados com o TARTÍLOPE V4 .....	153
6.1.2.	Resultados com o TARTÍLOPE VX e Soldagem com Corrente Contínua .....	155
6.1.3.	Resultados com o TARTÍLOPE VX e Soldagem com Corrente Alternada .....	158
6.2.	Aplicação em Campo .....	160
6.3.	Comparações dos Revestimentos .....	162
6.3.1	Geometria do Revestimento .....	162
6.3.2	Ovalização dos Tubos .....	164
6.4.	Discussão dos Resultados.....	164
7.	CONCLUSÕES .....	167
8.	TRABALHOS FUTUROS.....	169
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	170



## 1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos de erosão e corrosão afetam diretamente os tubos que constituem as paredes de caldeiras de usinas termelétricas, Figura 1.1. Há, então, necessidade de paradas cíclicas para manutenção, o que reduz o tempo de disponibilidade da usina para produção de energia.

A erosão é causada pelo impacto de cinza e partículas [1-6], fadiga térmica e durante a limpeza das cinzas aderidas às paredes, via jato de vapor de água proveniente dos sopradores de fuligem de carvão [2, 3]. Já a corrosão advém de reações de produtos da combustão com o material das paredes (tubos e membranas), sendo potencializada pelo uso de dispositivos limitadores de NOx (introduzidos por questões ambientais), os quais aumentam o caráter redutor da atmosfera interna [7, 8, 9], e também pelo uso de carvão inadequado [2]. Frisa-se que estudos específicos sobre o tema mostram que as condições químicas internas das caldeiras, levam à formação de compostos de enxofre e cloro com baixo ponto de fusão, que dissolvem a camada de óxido de ferro, e por consequência expõe o aço ao ataque corrosivo [7, 8].



Figura 1.1. Região afetada por erosão e corrosão

No Brasil ocorreu uma significativa expansão do parque termelétrico, que, em 2001, representava 14% da capacidade instalada, alcançando 27% [10]. Neste contexto, as inovações, os estudos e melhoramento do aparato industrial são totalmente necessários e intrínsecos ao crescimento deste ramo.

Atrelada ao aumento da dimensão do parque gerador termelétrico, cresce a necessidade de maior disponibilidade de suas usinas, principalmente em virtude dos períodos de estiagem que reduzem a produtividade das usinas hidroelétricas. Desta forma, as falhas de componentes, manutenções não previstas e falta de produtividade em paradas são fatores que contribuem para redução na disponibilidade de

máquina, comprometendo o desempenho geral da usina, ocasionando não apenas em redução de rentabilidade, como também em multas.

A evolução dos métodos de soldagem busca o emprego de ligas metálicas mais resistentes nos revestimentos das paredes de caldeiras, evitando, assim, a ocorrência dos problemas supracitados. Desta maneira, os índices de perda de espessura das paredes dos tubos tendem a cair, aumentando os períodos de tempo entre as manutenções, bem como maior disponibilidade para a geração de energia.

Um dos meios de aprimorar os métodos de soldagem é a introdução de sistemas automatizados. Contudo, o Brasil ainda carece de equipamentos com tecnologia nacional, o que inibe investimentos para a expansão do setor de soldagem, uma vez que equipamentos provenientes do exterior apresentam elevado custo de aquisição e manutenção. Assim, na maioria dos casos o desenvolvimento de procedimentos de soldagem mais avançados acaba também sendo prejudicado.

Neste cenário, é notório que o desenvolvimento de manipuladores de soldagem, dedicados ao revestimento de tubos de caldeiras de usinas termelétricas, juntamente com procedimentos de soldagem inovadores irá contribuir significativamente para a manutenção das referidas usinas.

## 1.2. Descrição dos Problemas

Em usinas a carvão, a ocorrência dos problemas ligados aos fenômenos de erosão e corrosão, são predominantemente ocasionados pelo fato das paredes d'água serem construídas com material de alta resistência à fluência, mas de baixa resistência aos fenômenos citados. Para monitorar os efeitos, regularmente as paredes das caldeiras são inspecionadas, Figura 1.2, com o intuito de avaliar o desgaste e, desta forma, tomar ações para evitar a ruptura de tubos [11]. São mencionadas na literatura taxas de perda de espessura de tubos de 0,4 mm/ano [12], 1,2 a 2,5 mm/ano [4, 13], 0,2 a 2,5 mm/ano [8], 1,0 mm/ano [9].



Figura 1.2. Em (a) e (b) operação de inspeção e limpeza de tubos



A partir do momento que a espessura da parede é reduzida, até o limite de suportar a pressão interna, os tubos desgastados são substituídos por novos ou reparados. Neste processo, tanto a união dos tubos entre si, como a união dos tubos com a membrana são executadas por soldagem manual, uma operação lenta, que ocasiona longos períodos de indisponibilidade da caldeira, Figura 1.3. Adicionalmente, estas operações não agregam características de melhoria de resistência contra os mecanismos de falhas, posto que os tubos continuam sem revestimento [12, 14, 15]. Neste sentido, não se busca, no estado atual, uma alternativa que prolongue o tempo entre as manutenções, e sim, tão somente a reparação. Tais melhorias seriam obtidas se os tubos novos fossem revestidos por um material mais resistente aos danos provenientes da erosão e corrosão, provendo, assim, maior disponibilidade da caldeira para a produção de energia elétrica.



Figura 1.3. Instalação de tubos novos

### 1.3. Objetivos e contribuições

O presente trabalho se caracteriza pelo desenvolvimento de um novo equipamento associado a novas metodologias de soldagem. Esta necessidade é decorrente das inovações alcançadas nos últimos anos, em procedimentos de soldagem com maior produtividade.

Tais inovações possibilitam a execução de revestimentos em posição de dificuldade (vertical) com elevadas correntes de soldagem e, conseqüentemente, altas velocidades de deslocamento. Esta posição de soldagem contribui para que os revestimentos fiquem com menor

reforço, o que torna possível a adição de menor quantidade de material à peça, e menor diluição.

No desenvolvimento de revestimento de tubos de caldeiras atuam, de forma cooperativa, pesquisadores do LABSOLDA e da TRACTEBEL Energia. Várias frentes de trabalho foram conduzidas de forma integrada pelos grupos, visando desenvolver tecnologia e a construção de um sistema capaz de realizar operações automatizadas de revestimento de painéis tubulares.

O presente trabalho focou o desenvolvimento de tecnologias para o revestimento de painéis em oficina. O projeto global reúne as tecnologias e esforços desenvolvidos nas áreas de projetos de mecanismos, eletroeletrônicos, softwares e procedimentos de soldagem em torno de três objetivos principais:

- Desenvolver um sistema robótico para o revestimento, em oficina, de painéis tubulares destinados a caldeiras de usinas termelétricas;
- Desenvolver estratégia robotizada para o revestimento de painéis tubulares, na posição vertical descendente, por soldagem MIG/MAG;
- Integrar e avaliar experimentalmente as tecnologias e metodologias desenvolvidas.

O desenvolvimento de um sistema robótico dedicado, e os procedimentos de soldagem específicos são as principais inovações e contribuições técnico-científicas. Mais especificamente:

- Construção de um compacto manipulador de quatro graus de liberdade dotado de sistema mecânico de seguimento de curvatura do painel e com dinâmica para oscilação da tocha de soldagem;
- Alteração do sistema de controle baseado em CNC para um sistema com tecnologia baseada em um microcontrolador ARM, com software próprio desenvolvido para o referido controle de movimento;
- Melhorias no TARTÍLOPE V4;
- Definição do tipo de trajetória com oscilação para cada região do painel e a mais adequada sequência dos cordões de solda para o revestimento;
- Desenvolvimento de tecnologia de oscilação da tocha de soldagem via a movimentação sincronizada de mais de um eixo do manipulador;
- Determinação da influência da frequência de oscilação da tocha no perfil dos cordões e nas temperaturas atingidas pelo material de base;

- Determinação dos parâmetros de soldagem MIG/MAG para proporcionar maior produtividade e qualidade do revestimento.

Com o aumento pretendido da eficiência do revestimento dos painéis de caldeiras, ocorrerá elevação no período entre paradas para manutenção, uma vez que o revestimento será efetuado com materiais nobres mais resistentes à erosão e corrosão.

Enfim, este projeto cria subsídios tecnológicos para novas pesquisas, além de amenizar uma deficiência existente no país que consiste na falta de equipamentos para soldagem automática.

#### **1.4. Estrutura do Trabalho**

A fim de contemplar os objetivos apresentados, a estrutura do presente trabalho está subdividida em seis capítulos.

O primeiro capítulo, denominado introdução, apresenta o tema de forma genérica, justificando a necessidade de investimento e ampliação dos estudos visando o aprimoramento quanto ao procedimento de soldagem.

No segundo capítulo, aborda-se as tecnologias utilizadas atualmente no revestimento de tubos de caldeiras. É destacado o processo MIG/MAG com algumas de suas variantes (convencional, modo corrente, pulsado e alternado). Já no contexto de métodos para a automação da soldagem, são expostas tecnologias de sistemas robóticos para a execução da referida tarefa de revestimento.

No terceiro capítulo são apresentados os equipamentos, materiais e métodos empregados na pesquisa. A seguir, o quarto capítulo trata do desenvolvimento mecânico, de hardware e software do sistema robótico, e de sistemas auxiliares, bem como a metodologia proposta para revestimento automatizado dos painéis.

O capítulo cinco trata de ensaios preliminares, sobre chapa, com o processo MIG/MAG de forma automatizada, com o intuito de verificar a soldagem em distintas situações.

Os resultados práticos e discussões destes são apresentados no capítulo seis. Já no sétimo capítulo conclui-se o tema desta pesquisa, e no capítulo oito apresentam-se sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros derivados deste.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

### 2.1. Caracterização da Superfície a ser Revestida

As paredes das caldeiras de usinas termelétricas são formadas por vários tubos, unidos por solda às membranas de ambos os lados, conforme a Figura 2.1, sendo que existem vários modelos de paredes caracterizados pelo conjunto de parâmetros dimensionais: a, b, c e d.

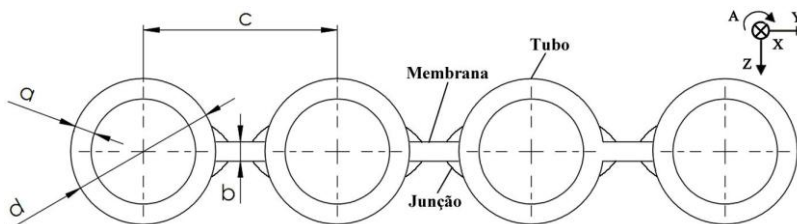


Figura 2.1. Vista superior das paredes de caldeiras [33]

A Tabela 2.1 apresenta os valores dos parâmetros dimensionais para as três configurações de paredes encontradas na caldeira da unidade C do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, a qual é responsável por 42% de geração de energia do complexo e a que mais apresenta problemas de corrosão/erosão. A primeira configuração corresponde a 2/3 das paredes na posição horizontal e a segunda aos demais 1/3. A terceira configuração corresponde às dimensões das paredes na posição vertical. Tais tubos são construídos com o aço 16Mo<sub>3</sub>, o qual é resistente à alta temperatura e com composição química de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.1. Dimensões das configurações de paredes mais encontradas.

Parâmetro	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
a (mm)	5,0	5,6	5,0
b (mm)	6,0	6,0	6,0
c (mm)	56,0	56,0	60,0
d (mm)	38,0	42,0	32,0

Tabela 2.2. Composição química, em %, do aço 16Mo<sub>3</sub> [39]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
0,12 – 0,20	0,35	0,40 – 0,90	0,025	0,01	0,30	0,30	0,30	0,25 – 0,35

Quanto as características do revestimento, o EPRI defini diretrizes com os limites médios de penetração, reforço e diluição do revestimento, Tabela 2.3, bem como os defeitos que reprovam a soldagem [2]. Esta diretriz afirma também que tubos com espessura menor que 2,5 mm não devem ser revestidos, apenas substituídos.

Tabela 2.3. Critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda [2].

Parâmetro	Descrição	Faixa tolerável
Pe (mm)	Penetração	$0,35 < P < 0,56$
R (mm)	Reforço	$R < 3,18 (1/8")$
D (%)	Diluição	$10,0 < D < 15,0$

## 2.2. Manipuladores de Soldagem

Para que o tempo de operação da caldeira seja máximo é interessante que as regiões passíveis de desgaste sejam revestidas antes que os tubos atinjam a espessura limite.

No primeiro momento tem-se a operação manual como uma possível alternativa. Contudo, executar os revestimentos manualmente significa uma tarefa difícil, demorada e dependente da habilidade de profissionais. A Figura 2,2 apresenta alguns revestimentos manuais onde nota-se que é necessário grande quantidade de cordões para revestir um tubo, além dos mesmos não serem uniformes e possuírem respingos em excesso.

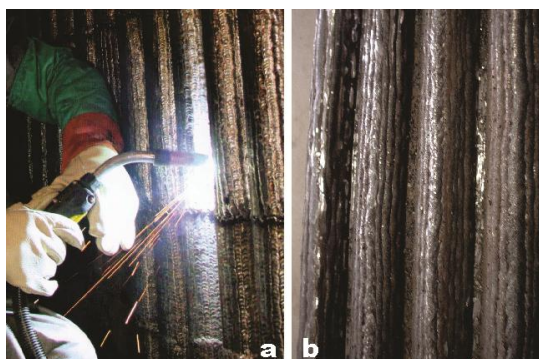


Figura 2.2. Em (a) revestimento de tubos no interior da caldeira [16] e em (b) painel revestido manualmente em oficina da TRACTEBEL Energia

Com o emprego da soldagem automatizada, haveria uma série de vantagens em relação ao processo manual, tais como: maior produtividade em virtude dos longos períodos de soldagem sem interrupção, maior repetitividade, melhor uniformidade e qualidade do revestimento, redução da quantidade de material consumido e redução do tempo de exposição do soldador a condições insalubres [17, 18, 19].

No entanto, a soldagem automática tem ficado para trás quando comparada com a automação de outros processos de produção industrial. Isto porque, a soldagem é um processo de fabricação mais complexo, sendo que a ferramenta de trabalho, arco elétrico, não possui forma definida e há inúmeras variáveis que influenciam o processo, dificultando sua automatização [20, 21].

A robotização da soldagem, além de proporcionar as vantagens citadas, abre caminho para que a indústria utilize processos de soldagem com maior produtividade, os quais são inviáveis de serem realizados de forma manual. Muitos destes métodos buscam produtividades elevadas, conseqüentemente, exigem velocidades de deslocamento de tocha que normalmente não são estabelecidas manualmente por longos períodos com repetitividade. Portanto, o emprego de sistemas automatizados, passa a ser importante para que se conduza adequadamente o desenvolvimento de procedimentos de soldagem de maior produtividade.

Quando analisada somente a questão de graus de liberdade de deslocamento, uma alternativa para o revestimento de tubos de parede de caldeira são os robôs antropomórficos, Figura 2.3a. Estes robôs proporcionam facilidade de posicionamento e orientação da tocha de soldagem no espaço. Entretanto, apresentam problemas para serem utilizados tanto no interior das caldeiras, quanto em oficina. No primeiro caso, por se tratar de um ambiente confinado, há a dificuldade de operação devido às colisões ocasionadas durante a execução de trajetórias. Já no revestimento em oficina, os cordões são efetuados com grandes comprimentos no intuito de reduzir o tempo total de revestimento. Para o uso de robôs antropomórficos seria necessário que o mesmo fosse instalado sobre um trilho flexível para aumentar seu espaço de trabalho. Contudo, tais robôs, de forma geral, são pesados e necessitam de grande rigidez em sua base, fato que não ocorre quando é utilizado um trilho flexível. Em suma, estes robôs são voltados principalmente para a operação fixa em uma linha de produção ou aplicações especiais onde estes requisitos possam ser atendidos [17, 22].

Para a operação em campo, é aconselhável a aplicação de manipuladores de soldagem com uma concepção mecânica diferenciada,

que suprindo os requisitos de robustez, apresente facilidade de transporte e de instalação. Todavia, a maioria dos equipamentos previstos para uma determinada aplicação, geralmente, são manipuladores bem simples, apresentando apenas 2 ou 3 graus de liberdade. Com esta restrição de mobilidade, o manipulador não viabiliza o correto posicionamento da tocha de soldagem em muitas situações.

Nos últimos anos foram desenvolvidos equipamentos para a manutenção de caldeiras de usinas termelétricas [23]. Contudo, muitos deles são voltados apenas para a inspeção da espessura dos tubos. Mesmo esta tarefa não exigindo todos os requisitos necessários para um sistema destinado ao revestimento, a necessidade de ser compacto é pertinente em ambos os casos. Em situações de manutenção no interior das caldeiras os equipamentos entram na mesma por intermédio de pequenas aberturas, chegando, em alguns casos, a apenas 450 mm de diâmetro [11].

No âmbito de equipamentos voltados para operações de revestimento, o LABSOLDA já projetou e construiu um sistema robótico para a manutenção de caldeiras de usinas termelétricas. Tal equipamento é chamado de TARTÍLOPE V4 e possui 4 graus de liberdade, Figura 2.3b [24-27].

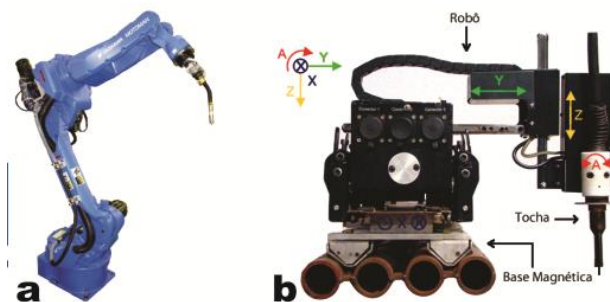


Figura 2.3. Em (a) robô antropomórfico de 6 graus de liberdade [28] e em (b) TARTÍLOPE V4 [29]

Todavia, o TARTÍLOPE V4 possui limitações relacionadas com o curso e velocidade das juntas Y, Z e A. Estas são decorrentes do equipamento ter sido projeto para atuar também na soldagem orbital de união de dutos, onde tanto os deslocamentos lineares quanto os requisitos de velocidade são menores. Logo, embora este equipamento apresente bom uso para a soldagem de união de dutos, e até mesmo para o revestimento de tubos de caldeira, possui restrições que dificultam a

utilização/desenvolvimento de procedimentos de soldagem que buscam elevada produtividade, uma vez que estes necessitam de maiores velocidades e cursos de deslocamento.

Mesmo no âmbito internacional, não há soluções específicas para o revestimento automatizado dos painéis que constituem as paredes de caldeiras e, sim, adaptações de manipuladores de soldagem de uso genérico.

Estes por sua vez, divergem em duas frentes de atuação possíveis. Na primeira delas o revestimento é feito no interior das caldeiras com os painéis já instalados, Figura 2.4, podendo ser novos ou não. Na segunda abordagem, o revestimento é feito em painéis novos dentro de oficinas antes da instalação na caldeira, Figura 2.5.

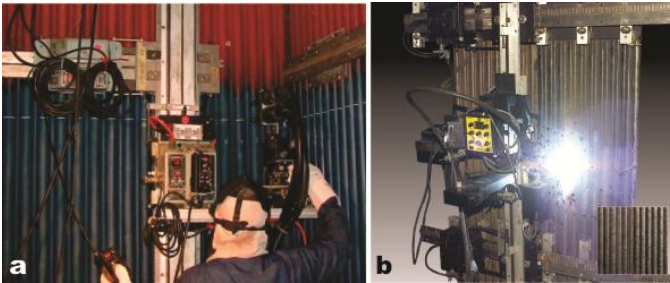


Figura 2.4. Manipuladores utilizados para o revestimento de painéis tubulares [30, 31]



Figura 2.5. Manipulador utilizado para o revestimento de painel tubular em oficina [32]

Com a análise dos equipamentos apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5, nota-se que se caracterizam por serem complexos, bem como, por



não atenderem às particularidades exigidas para o revestimento de tubos. Isto porque, possuem limitações quanto à velocidade de deslocamento o que causa redução da produtividade. Os referidos equipamentos apresentam velocidade de deslocamento na ordem de 3 m/min, sendo mais do que suficientes para a soldagem [30, 31]. Contudo, no revestimento de tubos são efetuados cordões entre 3 e 6 m de comprimento, assim, o tempo gasto no reposicionamento para o início de um novo cordão torna-se elevado.

Ainda, considerando aos equipamentos citados, estes apresentam dois grandes problemas. O primeiro é relacionado com o movimento de oscilação da tocha, o qual necessita ser de pequena amplitude, tendo em vista que é gerado por apenas um dos eixos do robô. Nos exemplos das Figuras 2.4 e 2.5, a oscilação da tocha MIG/MAG entre os pontos Q1 e Q2 é executada somente por um eixo, conforme mostram as imagens (a) e (b) da Figura 2.6 [29, 33].

Este tipo de limitação de trajetória da tocha torna o processo de soldagem MIG/MAG instável quando se deseja reduzir a quantidade e a altura dos cordões pelo aumento da amplitude de oscilação da tocha, uma vez que causa elevada variação na DBCP (distância bico de contato peça), conforme mostra as imagens (a) e (b) da Figura 2.6. Tal instabilidade, em termos de acentuada variação da corrente elétrica do arco devido ao aumento da variação da DBCP, produz: descontinuidade da geometria do cordão e de penetração, podendo perfurar o tubo, bem como ocasionar respingos em excesso [34].

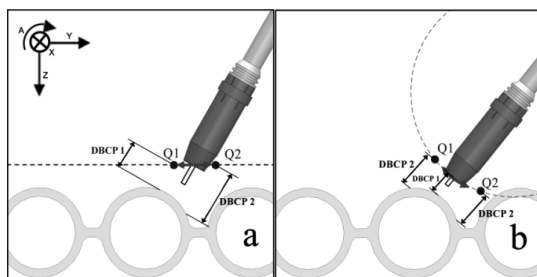


Figura 2.6. Eixos usados na oscilação da tocha: (a) apenas o eixo Y e (b) apenas o eixo A [33]

O segundo problema diz respeito à variação da DBCP em operações de revestimento de painéis pré-fabricados e ainda não instalados na caldeira, causada pela deformação de seus componentes: tubos e membranas. Esta deformação é proveniente do empenamento do painel, que ocorre em função do calor aplicado durante o processo de

soldagem. Para acompanhar a curvatura gerada nos painéis há necessidade de uma contínua correção das trajetórias de revestimento, posto que, a base destes equipamentos adaptados são trilhos rígidos. Isto torna mais acentuada a interferência do operador e pode acarretar em falhas nos cordões.

### **2.3. Tecnologias de Acionamentos**

No desenvolvimento de manipuladores são considerados fatores elementares sobre a dinâmica que o sistema deverá executar. Neste estudo, são definidas as velocidades máximas e as acelerações de cada junta. A partir destes dados criam-se subsídios para a seleção de um atuador, sendo que estes podem ser: pneumáticos, hidráulicos ou elétricos.

No contexto geral, o controle de movimentos na automação da soldagem segue alguns padrões típicos de desempenho esperado por uma determinada tecnologia de acionamentos. Em aplicações convencionais busca-se:

- Baixa inércia;
- Acelerações e desacelerações rápidas;
- Constância de velocidade;
- Baixa incerteza de posicionamento.

Com base nas características citadas, o emprego de atuadores pneumáticos na automação industrial é muito baixo, posto que há dificuldade em controlar o posicionamento devido à compressibilidade do fluido. Assim, é mais comum o uso de atuadores hidráulicos, que proporcionam elevados torques em baixas velocidades, ou motores elétricos, sendo voltados para altas velocidades e baixos torques [22].

Mesmo com a viabilidade em efetuar o controle de motores hidráulicos, a indústria utiliza mais os motores elétricos. Isto ocorre devido ao fato que os sistemas hidráulicos apresentam um maior custo, possuem baixa eficiência e poluem o ambiente de trabalho em caso de possível vazamento.

Todas as referidas tecnologias de acionamento apresentam duas formas para o controle de sua trajetória. O primeiro e mais tradicional dos métodos, é o acionamento em malha aberta, Figura 2.7. Em suma, quando é solicitado certo deslocamento da carga a determinada velocidade, não se tem garantia que o comando será executado com sucesso.

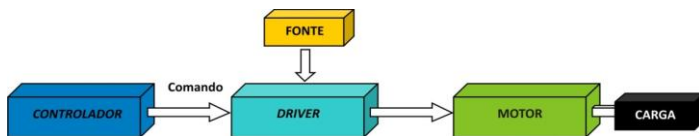


Figura 2.7. Método de acionamento em malha aberta

O segundo caso, denominado de acionamento em malha fechada, Figura 2.8, utiliza um sistema eletrônico de controle de movimento que dosa a corrente fornecida ao motor, tendendo a manter os parâmetros desejados mesmo que forças externas atuem no sistema. Desta maneira, insucessos no deslocamento são menos prováveis, proporcionando alta confiabilidade na execução da trajetória.

Este sistema de acionamento em malha fechada pode ser encontrado em duas diferentes topologias. Na primeira delas a malha de controle é fechada por intermédio de um controlador, sendo que é utilizado um *driver* para o acionamento do servo motor, Figura 2.7a. Já a outra metodologia, emprega um servo *driver*, o qual é responsável pelo acionamento do servo motor em malha fechada de velocidade e posição.

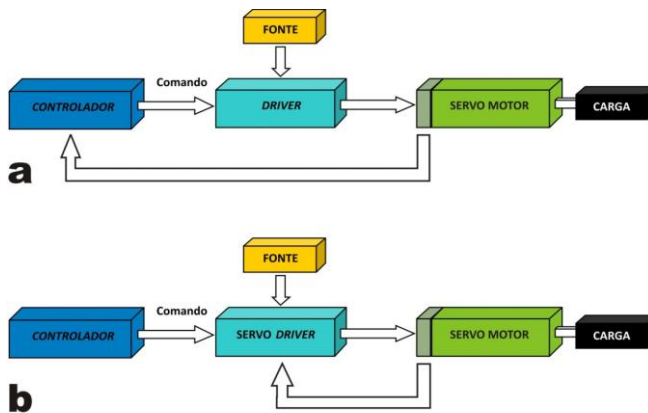


Figura 2.8. Método de acionamento em malha fechada. Em (a) empregando um controlador e em (b) com a utilização de um servo *driver*

Uma vez que a tecnologia de acionamento que faz uso de *drivers* e motores elétricos é a mais empregada na automação industrial, cabe ressaltar que dentro dela encontram-se diversas subdivisões. Dentre estas podem ser destacadas [93, 94]:

- Acionamentos com motores de passo;
- Acionamentos com servo motores de corrente contínua com escovas;
- Acionamentos com servo motores de corrente contínua sem escovas;
- Acionamentos com servo motores de corrente alternada síncronos.

Evidentemente todas as referidas tecnologias de acionamento elétrico apresentam vantagens e desvantagens. Ou seja, cada aplicação terá uma tecnologia mais indicada. A seguir são apresentadas tabelas que exemplificam as vantagens e desvantagens de cada tipo de tecnologia de acionamento elétrico [22 94, 95].

Tabela 2.4. Vantagens x desvantagens do acionamento com motores de passo

<b>Acionamentos com motores de passo</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Solução de custo mais baixo	Ruído, ressonância e baixa suavidade em pequenas velocidades
Poucas restrições ambientais	Perda de posição não detectada em malha aberta
Baixo índice de defeitos	Consumo de corrente quando parado Excessiva perda eletromagnética em altas velocidades

Tabela 2.5. Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua com escovas

<b>Acionamentos com servo motores CC com escovas</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo	Manutenção das escovas
Rotação suave em baixas velocidades	Baixo desempenho térmico
Altas velocidades em regime	Problemas em ambientes de vácuo
Alto pico de torque	
Grande variedade no mercado	
Eletrônica de acionamento de baixo custo	

Tabela 2.6. Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua sem escovas

<b>Acionamentos com servo motores CC sem escovas</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Praticamente todas as vantagens dos servo motores de corrente contínua com escovas	Motor com custo elevado  Eletrônica de acionamento complexa e cara
Manutenção reduzida	
Elevadas velocidades	
Praticamente não há restrições ambientais	
Bom desempenho térmico	

Tabela 2.7. Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente alternada síncronos

<b>Acionamentos com servo motores CA síncronos</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Torque constante em toda a faixa de velocidade	Motor com custo mais elevado  Eletrônica de acionamento mais complexa e cara
Baixa relação peso potência	
Manutenção reduzida	

## 2.4. Controladores de Movimento

Na automação da soldagem, é indispensável um excelente controle de movimento, posto que falhas neste sistema interferem diretamente sobre a qualidade do cordão de solda.

No desenvolvimento de controladores de movimento, no contexto geral, pode-se adotar duas linhas de pesquisa. A primeira trata da elaboração de todo o hardware e software de controle. Evidentemente, esta forma de trabalho promove maior flexibilidade ao equipamento, dado que há possibilidade de modificar qualquer parte do sistema, a fim de que mesmo seja adaptado às necessidades impostas na execução da tarefa. Contudo, a construção de hardware e software próprio acarreta em maior tempo de desenvolvimento.

A segunda forma de efetuar o controle de movimento é por intermédio da aquisição de um sistema de controle comercial. Na maioria das vezes estes sistemas comerciais empregam placas que são

utilizadas juntamente com um microcomputador convencional. Todavia, estas placas possuem elevado custo de aquisição, girando na ordem de US\$ 2000,00. Tal fato torna inviável, em alguns casos, a aplicação destas para o controle de movimento de manipuladores que buscam ter baixo custo.

Em face aos elevados custos e com o objetivo de conceber um sistema de controle baseado em microcomputador, partiu-se para o estudo de controladores com tecnologia NC (Numerical Control). A referida tecnologia surgiu em meados do século 20, a partir de pesquisas em conjunto da força área norte-americana e do MIT [96]. Contudo, passou a ganhar respaldo em 1972 com a introdução de microcomputadores para o controle do deslocamento [97]. Deste momento em diante passou a ser tratada como tecnologia CNC [98].

Com a tecnologia CNC iniciou-se o desenvolvimento de softwares para edição e controle de trajetórias a serem executadas. Atualmente existe uma extensa variedade de controladores CNC, distinguindo-se entre sistemas de grande complexidade e custo elevado, e outros mais simples e com baixo custo.

Ao se tratar da implementação de controladores CNC em máquinas especiais, na maioria dos casos é vantajoso o emprego dos controladores mais simples e com baixo custo. Isto ocorre, fundamentalmente, porque sistemas com menor custo possuem flexibilidade para a reprogramação de algumas funções. Fato este que não ocorre com os sistemas mais complexos, posto que em geral são softwares de arquitetura fechada, não possibilitando, desta forma, a configuração de parâmetros fundamentais para o correto funcionamento de um equipamento desenvolvido. Entretanto, existem algumas exceções como, por exemplo, o controlador Mach3, primeira opção a ser analisada [84].

O referido controlador é uma opção de baixo custo para controlar fresadoras, tornos e robôs manipuladores cartesianos com até 6 juntas, 3 prismáticas e 3 rotacionais. Este não apresenta hardware, e sim apenas um programa que roda em ambiente Windows. Tal programa comunica-se com o mundo externo por intermédio da porta paralela, sendo assim, caso tenha-se a necessidade de um maior número de entradas/saídas basta-se instalar portas paralelas sobressalentes. Apresenta uma interface flexível podendo-se criar ambientes dedicados a cada tarefa [24].

A tela básica de comando do Mach3, Figura 2.9, a qual é destinada a operação de fresamento, apresenta suas funções principais listadas a seguir. No item 1 destaca-se a barra com as opções de configuração do software. Nesta barra de ferramentas têm-se as opções

para criação de arquivos, configurações dos pinos de entrada e saída de sinais, rampa de aceleração dos motores, configurações de plugins, seleção de telas e edição das funções pertinentes aos botões da tela. Já em 2, visualiza-se o programa em código G que será executado. Tal visualização do código em execução é fundamental, pois desta maneira é possível que o operador detecte algum erro de programação e cancele a operação. Em 3 encontram-se as posições correntes dos eixos, bem como a opção de referenciá-los. Em 4 tem-se a ilustração das trajetórias a serem realizadas, a qual ajuda na detecção de erros mais grosseiros de trajetória. Em 5 o controle do processo, com opções de start, stop, load G code, edit G code, entre outros. Este item traz as principais ações de comando do Mach3. O item 6 mostra as informações pertinentes à ferramenta utilizada, onde se tem informações como o diâmetro, altura e posição no carrossel de ferramentas. Os dados relativos ao *feed rate* da máquina são vistos no item 7. Aqui é possível a alteração da velocidade de deslocamento no transcorrer da execução da trajetória, a fim de corrigir possíveis erros de programação. O campo referente ao item 8 permite a visualização da velocidade em rpm do eixo árvore.

Todavia, mesmo com as possibilidades de alterações no Mach3, este controlador praticamente impossibilita, em virtude de suas características de construção, que parâmetros de soldagem sejam alterados durante a execução do revestimento.

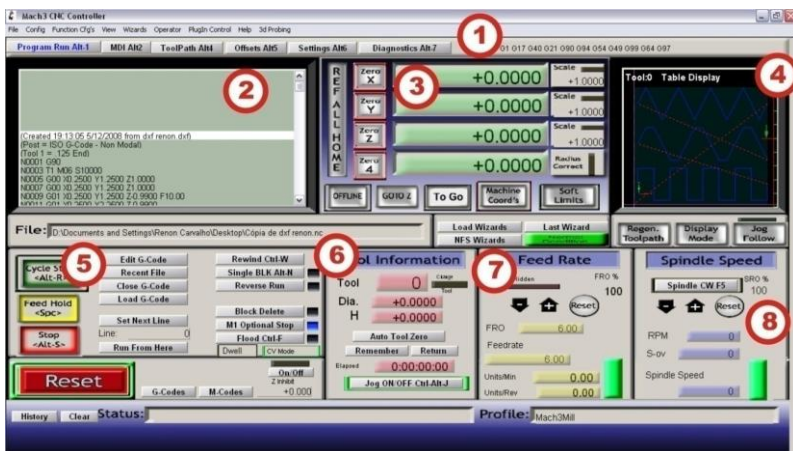


Figura 2.9. Tela genérica do controlador CNC Mach3

Há alternativas dedicadas ao controle de movimento de manipuladores para a soldagem. Uma delas é o sistema de controle

empregado em um dos equipamentos do LABSOLDA, TARTÍLOPE V2, como base para o desenvolvimento do controlador do novo sistema robótico. Este sistema apresenta movimentação automática em dois eixos para aplicação em processos de soldagem e corte de chapas metálicas. O objetivo deste manipulador é a realização de soldas utilizando o movimento de oscilação da tocha, podendo possuir sistemas de correção de trajetória via joystick com um operador ou de forma automático com seguimento de junta.

O sistema implementado no TARTÍLOPE V2 é capaz de realizar oscilações do tipo trapezoidal, triangular e retangular. Juntamente com estas formas de oscilação é viável a utilização de um seguimento de junta inteligente que corrige automaticamente imperfeições no alinhamento do dispositivo com a junta de soldagem. Ele é composto basicamente de duas partes: teclado e módulo eletrônico.

O teclado possui a função de interface com o usuário. É formado por doze teclas e um display de cristal líquido, onde são apresentadas as informações de programação. Já o módulo eletrônico processa e controla os movimentos e possui *drivers* que geram os sinais de forma de onda de tensão e corrente para os motores de passo.

O sistema de controle é baseado num PC104 que é um computador compacto para aplicações industriais, sendo robusto e confiável. Seu módulo de programação é baseado no sistema DOS, sendo que toda a programação foi feita em linguagem C.

## **2.5. Estratégias de Revestimento**

O revestimento de painéis tubulares pode seguir duas estratégias básicas: revestimento no interior da caldeira ou revestimento em oficina. Os dois métodos apresentam benefícios e malefícios.

Na soldagem no interior da caldeira tem-se a vantagem de praticamente não haver deformações na região soldada, uma vez que esta é parte integrante da parede como um todo. Entretanto, a soldagem de materiais dissimilares leva ao aparecimento de tensões residuais significativas devido à diferença entre os coeficientes de dilatação e contração térmica [88, 89]. Tais tensões residuais de soldagem têm influência na vida em fadiga, surgimento de trincas, aceleração dos processos de corrosão assistida por tensão, entre outros [90, 91, 92]. Além disto, o local é de difícil acesso, insalubre, caracterizado como um ambiente confinado e não permite a soldagem de grandes comprimentos em virtude dos andaimes, Figura 2.10.



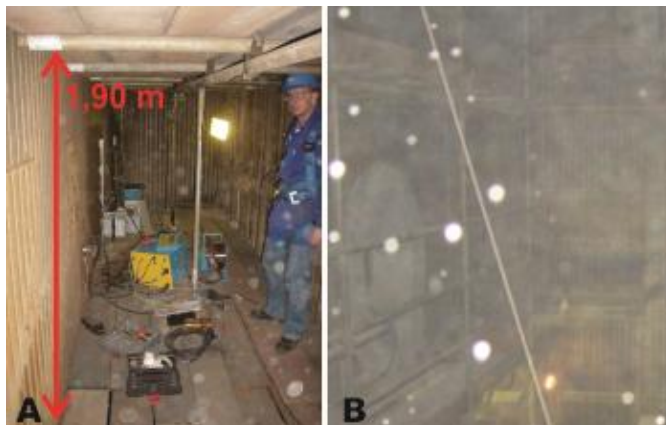


Figura 2.10. Em (A) interior da caldeira 4 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda e em (B) visualização do pó no interior da caldeira

Estes fatores requerem mão de obra cada vez mais especializada e aumentam o tempo total de reparo, dado que deve ser considerada toda a operação (transporte e instalação dos equipamentos, revestimento e desinstalação do sistema). Uma vez que, durante o período de manutenção, a unidade de geração não produz energia, a elevação deste tempo impacta diretamente na produção de energia elétrica do parque termelétrico. Tomando como base a caldeira 7 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, a qual no ano de 2013 teve uma produção média mensal de aproximadamente 220 GWh, é notório que tempo excessivo de manutenção acarreta em grandes perdas na produção.

Já no revestimento de painéis novos em oficina é possível a soldagem de grandes extensões, dado que não há andaimes que dificultem a instalação do robô. Isto por si só já diminui o tempo total gasto no revestimento de uma área de parede tubular. Além disto, os painéis podem ser revestidos antes da parada para manutenção e posteriormente apenas instalados no seu referido local na caldeira, reduzindo o tempo total de parada.

Em contrapartida, no revestimento em oficina ocorrem deformações geométricas dos painéis, sendo estas provenientes do movimento de material que ocorre em função do calor aplicado durante o processo de soldagem [45, 46].

O primeiro tipo de deformação diz respeito ao empenamento dos painéis tubulares, que no transcorrer do revestimento ocorre para o lado

onde é efetuado o depósito de material. Em painéis de 6 m de comprimento chega-se a ter uma flecha de deformação de até 30 cm, Figura 2.11. Isto implica que após o término do revestimento os painéis devem passar por uma calandra para serem desempenados.



Figura 2.11. Deformação em painel revestido

O segundo problema trata de deformações geométricas em cada um dos tubos, as quais podem chegar a situações de ovalização que prejudicam a instalação na caldeira. No exemplo da Figura 2.12, o tubo apresentava originalmente diâmetro interno de 28 mm, sendo que após a execução dos cordões ocorreu uma redução no diâmetro interno no sentido horizontal para 27,3 mm e aumento no sentido vertical para 29,7 mm, o que representa uma diferença de 8,0% entre eles.



Figura 2.12. Ovalização em tubo novo revestido

Como os tubos novos são unidos aos tubos antigos, já instalados na caldeira, por intermédio de soldagem com junta de topo e o processo

TIG, diferenças geométricas entre eles gera desalinhamento da junta e, conseqüentemente, falhas na união. Mesmo que a união tenha relativo sucesso, a geometria diferente dos tubos prejudica o fluxo de água durante a operação, o que reduz a eficiência da caldeira. Entretanto, a literatura traz estudos que indicam que determinadas seqüências de execução dos cordões pode reduzir substancialmente este problema. A aplicação destas técnicas, que mantém a geometria do tubo o mais próxima da original, reflete também na qualidade do revestimento, uma vez que este passa a ser mais homogêneo, com maior resistência a corrosão e há distribuição uniforme das tensões sobre a peça [47].

O EPRI (*Electric Power Research Institute*) descreve dois modos para o revestimento do tubo, Figura 2.13. O primeiro deles, Figura 2.13a, pode gerar trincas na parte superior do tubo, uma vez que as ligas utilizadas no revestimento tem condutividade térmica mais baixa do que o material empregado na construção dos painéis [14]. Nota-se também uma quantidade excessiva de material depositado caracterizando desperdício de recursos. Já na situação ilustrada na Figura 2.13b há menor adição de material e um cordão a menos no tubo. Isto reduz as deformações e a possibilidade de trincas. Outra proposta é realizar cordões mais estreitos com velocidade de soldagem mais elevada, a qual é apresentada na Figura 2.14.

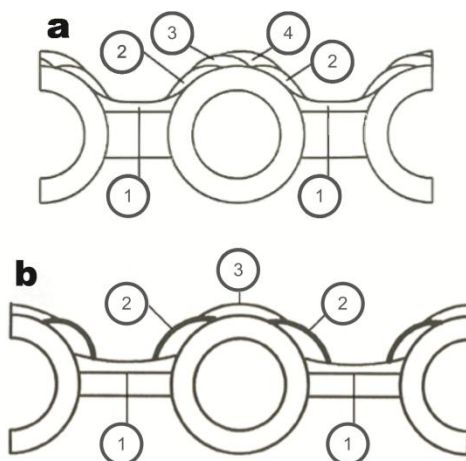


Figura 2.13. Seqüência de cordões sugerida pelo EPRI [14, 48]

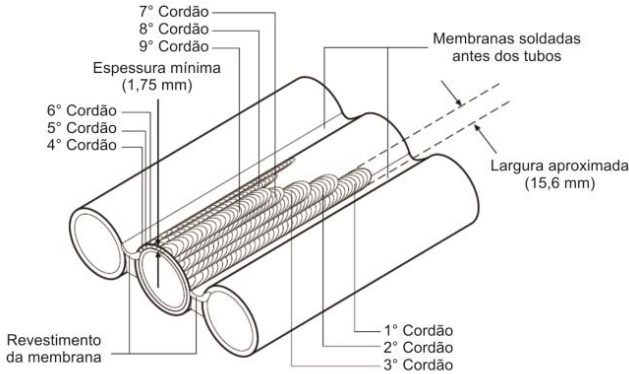


Figura 2.14. Sequência de cordões sugerida [48, 49]

Há alternativas que sugerem a realização de dois cordões sobrepostos, Figura 2.15, com o objetivo de gerar um revestimento mais uniforme, evitando eventuais falhas [50]. Em primeiro lugar, todas as membranas (2, 2') são revestidas com o cordão (11) e, em seguida, é feito o cordão (11'). Posteriormente, ocorre o revestimento do tubo iniciando-se pelas laterais até chegar à parte superior na seguinte ordem: (12, 12'), (13, 13'), (14, 14'), (15, 15') e (16, 16').

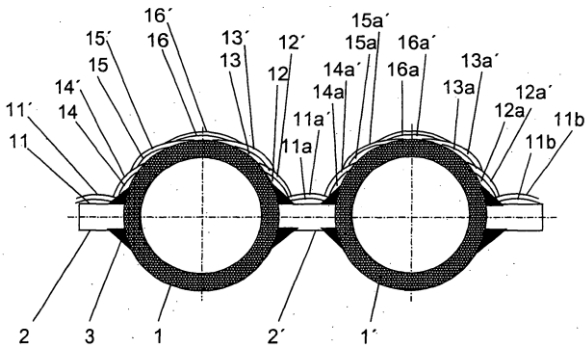


Figura 2.15. Sequência de cordões sugerida [50]

Em todas estas quatro propostas o revestimento é iniciado pela membrana, em seguida é efetuado nas laterais no tubo, finalizando na parte superior.

Todavia, mesmo estes procedimentos tendem a gerar problemas de ovalização dos tubos, reduzindo a largura da parede da caldeira, características indesejáveis no revestimento.

Diferentemente dos métodos anteriores, o apresentado a seguir, Figura 2.16, inicia o revestimento pela parte superior do tubo e vai descendo até chegar à membrana. O primeiro cordão a ser realizado é o 102 e em seguida o seu oposto, ou seja, o cordão 104. O terceiro cordão a ser realizado é o 106. Posteriormente, são executados na sequência os cordões 108, 110, 112, 114, 116, 120, 122, 124, 126, 128 e 130.

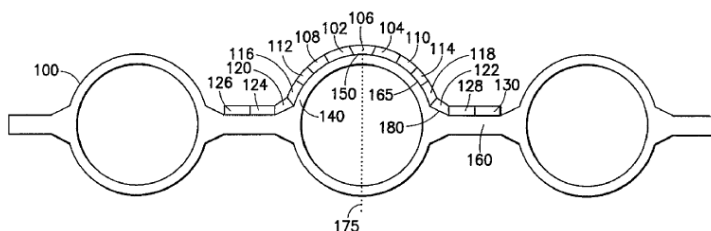


Figura 2.16. Sequência de cordões sugerida [47]

O revestimento por intermédio deste modo alternativo também produz distorção nos tubos. Contudo, a ovalização e, conseqüentemente, a diminuição da largura da parede são menores [47].

## 2.6. Técnicas de Oscilação

Normalmente os painéis são revestidos de forma mecanizada, com diversos passes lineares, sem oscilação da tocha, e alta velocidade de soldagem. Os cordões de solda resultantes são do tipo filete com um baixo valor de relação largura/altura. Além das características geométricas da secção transversal destes cordões de solda não serem ideais para o revestimento, a execução desta tarefa é demorada. Este aumento do tempo de execução do revestimento é devido à necessidade de realizar o movimento de retorno da tocha, no final da execução de cada cordão de solda, para a posição inicial do próximo cordão [33].

As técnicas de oscilação, movimento periódico da tocha, são geralmente efetuadas transversalmente à direção de soldagem, sendo que um dos objetivos é diminuir o tempo total da tarefa de revestimento por intermédio da realização de cordões mais largos, o que, conseqüentemente, reduz o número de cordões de solda. Sua aplicação controla a poça de fusão e torna mais suave o ciclo térmico de soldagem, e o aumento da área contribui também com a distribuição do calor, resultando em menor diluição, penetração e reforço [40, 41]. Existem diversos tipos de trajetórias de soldagem, Figura 2.17, sendo que os

mais utilizados nos manipuladores apresentam as formas: linear, triangular, trapezoidal e retangular [42]. Em função da necessidade da aplicação é possível usar outras formas como a senoidal, exponencial, duplo oito, etc.

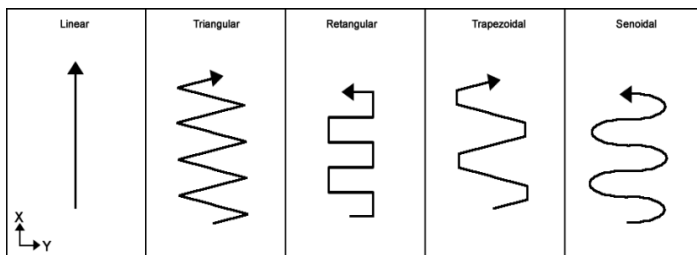


Figura 2.17. Trajetórias sem e com oscilações mais usadas

Estas trajetórias são aplicadas geralmente em superfícies planas, sendo executadas por um eixo perpendicular ao sentido de soldagem. Como já citado anteriormente, a aplicação em tubos apresenta grande variação da DBCP devido à geometria cilíndrica dos mesmos. Quanto maior o diâmetro do tubo, maior é a variação na DBCP [33].

De forma geral, o manipulador é fixado por meio de um trilho, que está situado paralelamente à parede de tubos, sendo que a oscilação é realizada somente no eixo Y, Figura 2.18a ou no eixo de oscilação A, Figura 2.18b. Deste modo, se for aplicado uma oscilação com as trajetórias convencionais, o resultado é uma variação significativa na DBCP. Para amenizar este problema é possível aplicar a orientação da tocha de maneira que esta fique perpendicular ao tubo e realize a oscilação por meio dos movimentos simultâneos dos eixos Y e Z do manipulador, Figura 2.18c. Assim, a variação de altura é minimizada e proporciona uma DBCP praticamente constante [29].

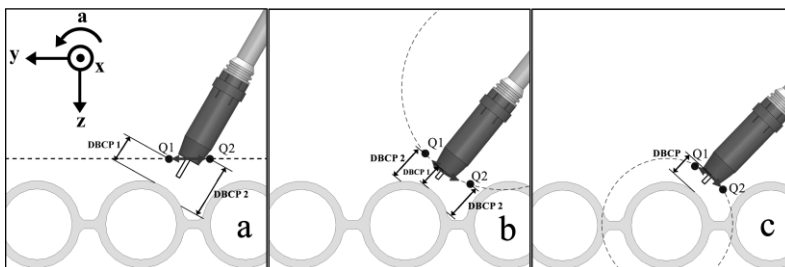


Figura 2.18. Eixos envolvidos na oscilação: (a) somente o eixo Y, (b) somente o eixo A e em (c) os eixos Y e Z [43]

A execução da trajetória com oscilação da tocha envolve distintas variáveis, dentre elas [44]:

- Velocidade de soldagem (cm/min): corresponde a velocidade de deslocamento longitudinal da tocha no eixo X;
- Amplitude (mm): é a distância entre as extremidades laterais da trajetória de oscilação no eixo Y;
- Frequência (Hz): é o número de ciclos de oscilação do eixo Y, Z ou A por segundo;
- Tempos de parada (s): são os intervalos de tempo no qual a tocha se desloca apenas no eixo X, caracterizando uma trajetória do tipo trapezoidal, ou o tempo no qual a tocha fica parada no eixo X e Y, caracterizando uma trajetória do tipo triangular;
- Distância de soldagem (mm): é o deslocamento no eixo X a partir do ponto inicial, podendo ser no sentido positivo ou negativo do eixo X.

Para uma soldagem de qualidade todos os fatores citados devem ser considerados e é fundamental que a DBCP seja praticamente a mesma durante toda a tarefa.

## **2.7. Processos de Soldagem**

Além dos dispositivos de deslocamento de tocha, é fundamental a seleção do processo de revestimento mais adequado. Um processo de soldagem, para ser utilizado com sucesso no revestimento automatizado de painéis sujeitos à erosão e corrosão em paredes de tubos de caldeiras, deve possuir as seguintes características:

- Depositar camadas isentas de defeitos de soldagem, como falta de fusão, mordeduras, porosidades, trincas, perfuração do tubo e descontinuidade dos cordões;
- Possibilidade de aplicar o processo com elevada taxa de deposição na posição vertical descendente;
- Ausência de respingos na deposição dos cordões, o que evita desperdícios e danos nos equipamentos automatizados;
- Produzir camadas de solda com excelente acabamento superficial e com baixa diluição, penetração e reforço.

Atualmente, os processos aplicáveis que mais se aproximam destas características ideais são a aspensão térmica, Plasma com alimentação automática de pó (PTA-P) e o MIG/MAG com arame maciço.

### 2.7.1. Aspersão Térmica

A aspersão térmica é muito utilizada para revestir superfícies. O material de adição pode ser composto tanto de materiais metálicos quanto não metálicos, que podem estar na forma de pó ou de arame. Neste processo de revestimento, é utilizada uma fonte de calor, geralmente chama ou arco elétrico, para aquecer o material até o ponto de fusão para, em seguida, projetar as partículas por meio de uma vazão de gás, normalmente ar comprimido, sobre uma superfície a ser revestida, Figura 2.19. O material adere com o impacto, se deforma e preenche as rugosidades superficiais. O resfriamento solidifica as partículas em estruturas lamelares conhecidas por panquecas [51].

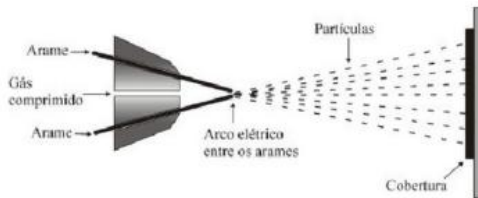


Figura 2.19. Esquema do processo aspersão térmica por arco elétrico [51]

Existem diversas variantes do processo de aspersão térmica, com características específicas, vantagens e desvantagens. Geralmente a variação ocorre em virtude da fonte calorífica, que pode ser à chama, arco elétrico, detonação, HVOF (*High velocity oxy-fuel*) ou plasma. A maioria destes processos apresenta grande porosidade, que pode resultar no descolamento de uma parte do material, além de que nem todos os materiais podem aderir à superfície revestida [35, 36]. Isto ocorre principalmente devido à falta de ligação metalúrgica, uma vez que normalmente a ligação resultante é apenas mecânica.

### 2.7.2. PTA-P

O processo de soldagem PTA-P apresenta muitas vantagens para a soldagem de revestimento, como bom acabamento superficial, baixo aporte térmico, baixa diluição, possibilidade de misturar ligas em pó e de ser aplicado em todas as posições de soldagem [52]. Ao contrário da aspersão térmica, a soldagem obtém a fusão completa por ligação metalúrgica à superfície do tubo [53].



A complexidade do sistema, Figura 2.20, a grande quantidade de variáveis independentes existentes, a baixa eficiência energética e o elevado custo dos equipamentos e consumíveis são os inconvenientes da utilização do PTA-P [53]. O PTA-P utiliza três sistemas de gás, sendo o primeiro o gás de plasma, necessário para abrir e manter o arco piloto. O segundo é denominado gás de arraste, utilizado para transportar as partículas de pó do silo alimentador até o bocal da tocha. E por fim o gás de proteção, que serve para proteger o material fundido da contaminação da atmosfera [54].

O gás de arraste necessita de válvula de controle de vazão para garantir a continuidade da deposição de material, uma vez que alta vazão do gás de arraste promove o lançamento de partículas para fora da poça de fusão. O gás de plasma também necessita de válvula de controle de vazão, para manter a pressão do arco constante e, conseqüentemente, a penetração e estabilidade do arco principal [52, 54]. Quanto à questão funcional, são necessárias duas fontes de soldagem com sistema de refrigeração, uma para o arco piloto e outro para o arco principal, além de que a tocha e mangote de soldagem são relativamente grandes e pesados, quando comparada aos outros processos de soldagem. Estes fatores tornam a infraestrutura para o revestimento mais complexa e dificulta o posicionamento e a movimentação da tocha ao redor do tubo.

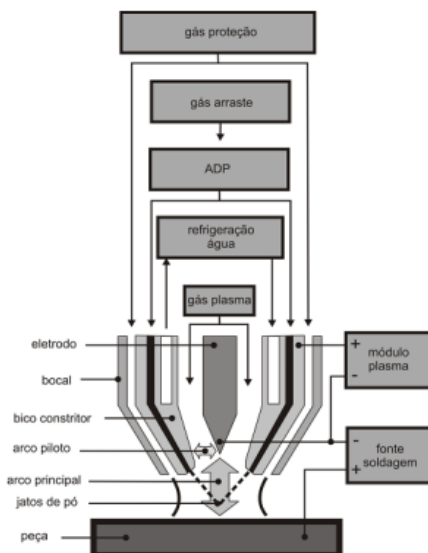


Figura 2.20. Esquemático de uma tocha genérica associada aos principais elementos utilizados no processo PTA-P [54]

### 2.7.3. Processo MIG/MAG

O processo MIG/MAG pode ser descrito como um processo de soldagem a arco, que emprega eletrodo consumível contínuo e insuflamento de gás. Este gás de proteção, que é fornecido por uma fonte externa, tem a função de evitar a contaminação do arame, das gotas de metal fundido em transferência e da poça de fusão pelos gases da atmosfera. Desempenha também o papel de ser o meio ionizante, conferindo as propriedades de estabilidade do arco e controlando a transferência metálica, consumo do eletrodo e fusão do metal de base [55, 56].

As principais características do processo MIG/MAG são a relativamente elevada taxa de fusão do arame-eletrodo, a possibilidade da variação de modos com que a transferência metálica se dá e a relativa portabilidade da tocha. O pequeno comprimento de eletrodo permite a utilização de uma alta densidade de corrente sem afetar a rigidez mecânica do eletrodo por aquecimento. Já os seus diâmetros pequenos conferem um arco elétrico concentrado e de alto poder de fusão do metal de base. Em virtude destas características, credita-se ao processo MIG/MAG uma alta capacidade de produção [55]. A referida alta capacidade de produção é atingida, dentre outros fatores, pelo fato da alimentação de arame ser contínua, o que possibilita aumentar o ciclo de trabalho, o qual relaciona o tempo entre arco aberto e tempo total de soldagem.

O processo MIG/MAG possui versatilidade e um dos pontos que contribui para isto são o pouco peso e os aspectos ergonômicos da tocha de soldagem, a qual, juntamente com os cabos, possui três funções básicas: conduzir o gás de proteção até a região do arco, guiar o arame-eletrodo e conduzir a corrente de soldagem até o bico de contato. Outra característica importante para a versatilidade do processo é a possibilidade de se alterar o modo de transferência metálica e com isso permitir a soldagem em diferentes posições. O modo como o material é transferido no arco determina: a estabilidade do processo e afeta a quantidade de respingos, a possibilidade de soldagem em diferentes posições, a geometria/qualidade da solda e a aparência superficial do cordão [55,56].

A transferência metálica no processo MIG/MAG se dá pela interação complexa de diferentes forças que atuam na extremidade fundida do eletrodo, poça de fusão e arco voltaico. Mesmo com um grande número de mecanismos envolvidos, de forma geral são apresentados como fundamentais os oriundos da ação das forças de

origem eletromagnética, gravitacional e tensão superficial. As variáveis elétricas (tensão e corrente), composição química do eletrodo e da peça, bem como a natureza do ambiente onde forma o arco (atmosfera inerte ou ativa) tem influência direta sobre a magnitude de cada força supracitada [56, 57]. A Figura 2.21 ilustra as principais forças que atuam sobre o arco.

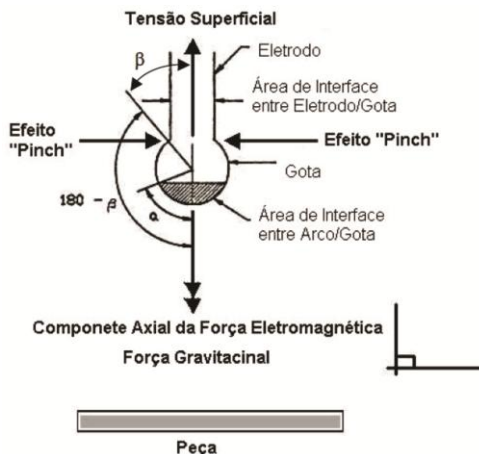



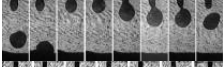
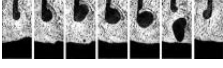
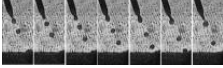
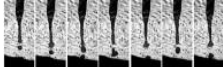
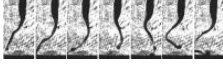
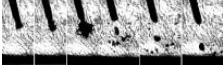


Figura 2.21. Forças envolvidas no processo de transferência [56]

A transferência metálica ocorre, basicamente, por dois mecanismos, os quais caracterizam duas classes. No primeiro deles há o contato da gota com a peça antes do destacamento, definindo a classe denominada de transferência por contato, que pode ser dividida em três categorias. Já no segundo mecanismo, a gota destaca-se antes que haja o contato com a peça, caracterizando a classe como transferência por voo livre. Esta segunda classe pode ainda ser subdividida em seis diferentes modos, em virtude das particularidades da formação e destacamento das gotas [55, 58]. A Tabela 2.8 ilustra os principais modos de transferência do processo MIG/MAG.

A Figura 2.22 apresenta a relação entre os parâmetros do processo e os tipos de gases de proteção com os respectivos modos de transferência. Entre os campos dos modos existem áreas de intercessão, onde pode ocorrer instabilidade na transferência [55, 59].

Tabela 2.8. Classes e respectivos modos de naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG [55, 58]

Classe de modos	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por contato	Curto-circuito		Tensão superficial e efeito pinch
	Ponte		Tensão superficial
	Curto-circuito forçado		Efeito pinch fortemente acen-tuado
Por voo livre	Globular		Gravitacional
	Globular Repul-siva		Gravitacional e reação
	Goticular (ou Goticular proje-tada)		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		Eletromagnética
	Goticular rota-cional		Eletromagnética
	Explosiva		Eletromagnéticas e reações químicas

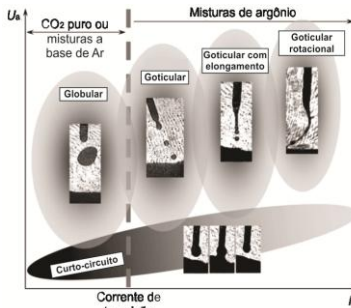


Figura 2.22. Campo de incidência dos modos de transferência metálica em MIG/MAG em função da corrente e da tensão [55]

### 2.5.3.1 MIG/MAG Convencional

O processo de soldagem MIG/MAG convencional é o que utiliza a forma mais simples de equipamento. A fonte de energia é do tipo tensão constante o que torna a corrente uma variável dependente, fundamentalmente, da velocidade de alimentação do arame e das suas características físicas e químicas. Deste modo, as variáveis independentes e básicas são a tensão e a velocidade do arame-eletrodo e devem ser previamente ajustadas. Em virtude do nível destas variáveis independentes e do tipo de gás de proteção, o processo apresenta diferentes formas de transferência metálica [56]. Conforme já apresentado na Tabela 2.8, pode-se caracterizar dois grandes grupos: o dependente totalmente da ocorrência de curto-circuito e o totalmente independente.

Com o intuito de descrever de forma sucinta a transferência por curto-circuito é apresentada a forma de onda da tensão e da corrente típica para esta modalidade de transferência, Figura 2.23. Nela nota-se que após a ocorrência de um curto-circuito tem início o período de arco, onde ocorre a formação da gota metálica. Quando é estabelecido o contato físico, entre a gota e a poça de fusão, os valores de tensão caem próximos a zero e a corrente elétrica que percorre o circuito cresce em magnitude. Como consequência, é iniciado o processo de constricção da parte restante da gota que forma a ponte de ligação entre o eletrodo e a peça. Dentre as forças que atuam neste momento a tensão superficial e a eletromagnética (efeito *pinch*) são as principais, sendo a intensidade da segunda tanto maior quanto maior o valor da corrente e menor a espessura da ponte. O efeito de constricção da ponte de ligação culmina com seu rompimento e a transferência do metal fundido do eletrodo para a poça de fusão. A partir do rompimento da ponte ocorre a reignição do arco e o início de um novo ciclo [40, 56, 58, 60].

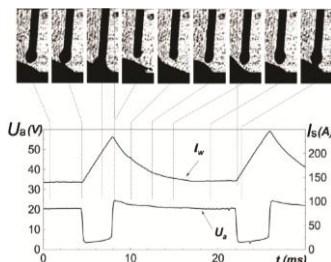


Figura 2.23. Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência do tipo curto-circuito [55]

Um dos problemas destas variações de corrente é o aparecimento de salpicos, os quais ocorrem frequentemente no momento em que a gota toca a peça e durante a reignição do arco [56], situações onde há o transitório nos valores da corrente. Uma alternativa para a redução do problema é o amortecimento da taxa de crescimento da corrente por intermédio da indutância.

Outra forma de amenizar a quantidade de salpicos é fazer a imposição de corrente ao invés de tensão. Com a imposição de corrente, a mesma passa a ser uma variável regulada e parcialmente controlada em tempo real durante o processo, fato que proporciona maior repetibilidade de resultados. Isto é consequência de que a corrente de soldagem está muito mais definida, não se permitindo variar como acontece no sistema tradicional. Em suma, o fato de não ocorrer oscilações bruscas nos valores da corrente de soldagem tende a fazer com que o processo fique mais estável e reduza os respingos e salpicos. O principal problema deste método é a dificuldade na abertura do arco em virtude da não elevação da corrente de soldagem [61].

Com o aumento da corrente de soldagem é atingida a transferência goticular, a qual não apresenta ocorrência de curto-circuito e é caracterizada pela transferência de pequenas gotas uniformes, com diâmetro menor do que 1,25 vezes o diâmetro do eletrodo [62], de forma sequencial e em alta frequência. Por isto, os oscilogramas de corrente e tensão deste tipo de transferência não mostram variações significativas dos sinais, Figura 2.24 [55].

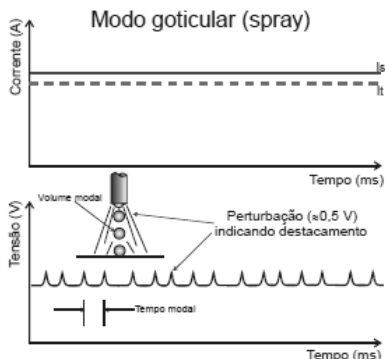


Figura 2.24. Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência do tipo goticular [61]

Este modo de transferência metálica aplica uma corrente de soldagem acima do patamar denominado de corrente de transição ( $I_t$ ), ou

seja, valores acima da corrente que delimita a fronteira entre o modo globular e o modo goticular. Quando a corrente de soldagem ultrapassa o nível de  $I_t$ , ocorre uma redução significativa e abrupta do tempo da formação da gota até o destacamento, gerando também um aumento súbito da frequência de transferência das gotas, maior do que 200 gotas por segundo. É importante salientar que o valor de  $I_t$  é dependente do gás de proteção. Assim, misturas de argônio com baixos teores de oxigênio e  $CO_2$  são os gases de proteção que propiciam a transferência goticular mais facilmente. A partir do aumento do teor de  $CO_2$ , a corrente de transição sobe, até que alcançando teores maiores do que 18-20% este tipo de transferência dificilmente é observada [55, 61].

Ao se trabalhar acima de  $I_t$ , as gotas passam a ser projetadas com alta velocidade em direção à poça de fusão, sendo que a trajetória de seu voo coincide com o eixo do eletrodo, independente da inclinação do eletrodo. Deste modo, a transferência goticular poderia ser empregada em qualquer posição. Todavia, por necessitar de altas correntes, o que ocasiona altas energias imposta e a criação de uma grande poça de fusão, este tipo de transferência dificulta a soldagem fora da posição plana ou de chapas finas. Desta forma, suas principais aplicações são a união e o enchimento de chanfros em chapas com espessuras normalmente maiores que 3 mm [58, 63].

Ainda como características deste modo de transferência tem-se elevada estabilidade do arco, praticamente não gera respingos, boa penetração na solda, boa molhabilidade, produz cordões com bom aspecto superficial, soldagem em alta velocidade e alta taxa de deposição.

### 2.5.3.2 MIG/MAG Pulsado

O processo MIG/MAG Pulsado foi desenvolvido com o objetivo de reunir as melhores qualidades do curto-circuito e do goticular. Com isto, é possível manter uma transferência estável e regular, com pouco ou nenhum respingo e bom acabamento do cordão, com um baixo valor de corrente média, o que viabiliza a soldagem de chapas finas, em virtude da baixa energia de aporte [55].

Esta transferência é obtida com a utilização de dois níveis de corrente de soldagem distintos, denominados corrente de base ( $I_b$ ) e corrente de pulso ( $I_p$ ), sendo que cada uma possui o seu respectivo tempo de duração, tempo de base ( $t_b$ ) e tempo de pulso ( $t_p$ ). A Figura 2.25 mostra um oscilograma de corrente bem como as variáveis envolvidas no MIG/MAG Pulsado, as quais devem ser ajustadas de

forma a produzir uma gota metálica por pulso. Com isto, tem-se uma transferência metálica uniforme, com baixo valor de corrente média, e melhor controle sobre a quantidade de material depositado [56].

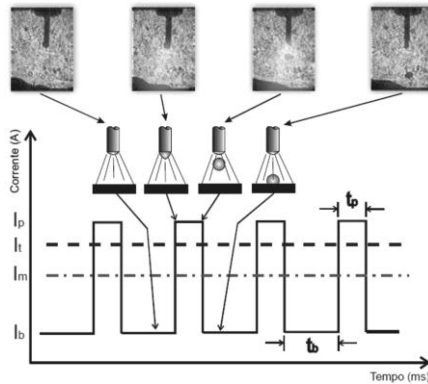


Figura 2.25. Representação do processo de transferência no modo pulsado [61]

As funções básicas das variáveis podem ser descritas como:

- Corrente de pulso ( $I_p$ ): deve possuir um valor acima da corrente de transição ( $I_t$ ), para promover o destacamento de uma gota. Este valor depende basicamente do material, diâmetro do eletrodo e do gás de proteção;

- Tempo de pulso ( $t_p$ ): deve ser ajustado em conjunto com a corrente de pulso para produzir uma gota por pulso. Assim como o item anterior, depende do material, diâmetro do eletrodo e do gás de proteção;

- Corrente de base ( $I_b$ ): é ajustada para a obtenção de uma corrente média que equilibre a velocidade de fusão do arame com sua velocidade de alimentação. Fica limitada entre um valor mínimo, abaixo do qual a manutenção do arco fica comprometida, e um valor máximo, sendo que acima deste a transferência deixa de ser por projétil;

- Tempo de base ( $t_b$ ): é ajustado de acordo com o diâmetro de gota desejado e a soma do mesmo com o tempo de pulso deve garantir a fusão de uma quantidade suficiente de arame para formar a referida gota.

Para que haja o destacamento da gota é necessária a combinação adequada da corrente de pulso e do tempo de pulso, denominados



parâmetros de destacamento de gota. Seus valores permanecem inalterados para uma determinada situação de soldagem, uma vez que estão relacionados às características do eletrodo e gás de proteção.

### 2.5.3.3 MIG/MAG CA

Ainda com o objetivo da soldagem de reduzida penetração e aquecimento, surgem variantes dentro do processo MIG/MAG Pulsado. Uma destas é o processo MIG/MAG CA, onde é introduzido um intervalo com polaridade negativa ( $t_n$ : tempo na fase negativa e  $I_n$ : corrente na fase negativa) na forma de onda da corrente, Figura 2.26.

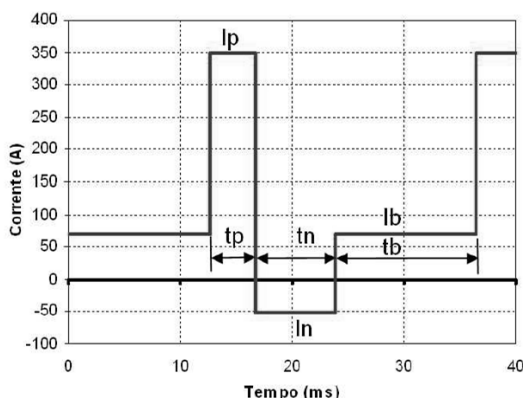


Figura 2.26. Modelo de forma de onda do MIG/MAG CA [65]

O uso da polaridade direta, comparada à outra polaridade, resulta em maior taxa de fusão, devido a uma maior eficiência na transferência de calor do arco para o arame. Este aumento de eficiência é justificado pela maior agitação do metal fundido, decorrente de uma elevada intensidade de corrente, causada pelo fato da mancha catódica apresentar uma menor área, quando comparada à área da mancha anódica que o arame apresentaria se estivesse em polaridade inversa [66]. Embora estas considerações sejam relevantes, o fato de haver um salto, ou escalada, da mancha catódica para a parte sólida do arame-eletrodo, faz com que haja uma maior exposição da gota ao arco voltaico, fazendo com que o calor seja usado eficientemente para fundir o arame-eletrodo [67].

O envolvimento da extremidade do arame-eletrodo, quando em polaridade direta, é resultado da mobilidade da mancha catódica

provocada pela limpeza catódica ocorrida na extremidade do arame-eletrodo, fazendo com que o arco escale para a parte sólida do arame-eletrodo onde a camada de óxido ainda não foi removida, Figura 2.27 [65].

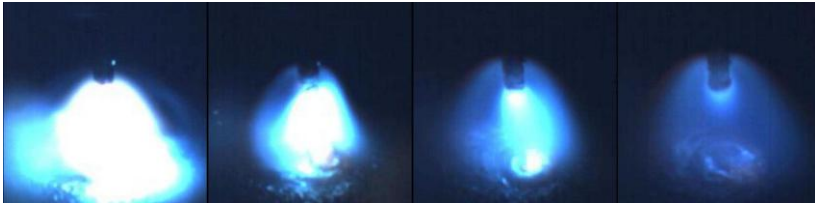


Figura 2.27. Escalada do arco voltaico no MIG/MAG CA durante polaridade direta

Dentre as vantagens do uso deste processo tem-se a possibilidade de controlar a penetração mediante a variação do balanço entre polaridade inversa e direta. Adicionalmente, o processo MIG/MAG CA apresenta menor sensibilidade quanto ao afastamento da tocha e quanto maior o percentual de tempo em polaridade negativa menor a penetração e maior a taxa de fusão do arame [68]. De forma geral, este processo é favorável para condições de soldagem de chapas finas.

É esperado que haja uma redução da penetração e da diluição à medida que a relação das durações CC- / CC+ aumentar, Figura 2.28. Entretanto, nem toda a faixa de variação poderá ser utilizada, em virtude da deformação do formato do cordão ou pela instabilidade da transferência [55].



Figura 2.28. Ilustração das alterações das seções transversais no processo MIG CA. Em (a) polaridade inversa, em (b) 10% polaridade direta, em (c) 30% polaridade direta, em (d) 50% polaridade direta, em (e) 70% polaridade direta e em (f) 90% polaridade direta [55]

O uso da corrente alternada se apresenta como uma alternativa para associar os benefícios das duas polaridades. Contudo, para operacionalizar a soldagem MIG/MAG CA deve ser considerado também os problemas inerentes à mudança da polaridade, que provocam a extinção do arco durante esta mudança.

Um dos fatores fundamentais para a reignição do arco é a vaporização de gotas fundidas, que proporciona a presença de vapores metálicos no arco. Isto promove o aumento da condutividade elétrica do arco, sendo a principal fonte de elétrons livres para a condução da corrente em baixas temperaturas [65]. Neste contexto, a proposição de técnicas como o MIG/MAG CA, que resultam na redução da temperatura das gotas, indicam que o efeito benéfico da alta temperatura da gota para a formação de vapores, pode ser inibido, sendo esperada maior dificuldade para a reignição do arco, o que deve ser suprido por recursos da fonte de soldagem. Para promover a reignição do arco durante a mudança de polaridade uma solução é a aplicação de um pulso de alta tensão durante um período da ordem de micro segundos [56]. Esta proposta foi implementada nas fontes de soldagem utilizadas no presente trabalho.

## **2.8. Síntese deste Capítulo**

Por ser uma operação com características próprias é importante que o sistema automático destinado a esta tarefa de revestimento possua propriedades mecânicas/dinâmicas capazes de atender as solicitações de posicionamento e velocidade para o revestimento.

Também é fundamental definir em qual seqüência os cordões devem ser realizados, com o intuito de reduzir a ovalização dos tubos, bem como proporcionar um revestimento uniforme.

Por fim, a análise dos processos de soldagem contribui para o preenchimento dos requisitos desejados. O emprego do MIG/MAG apresenta como principais vantagens a facilidade de automatização e a possibilidade de maior produtividade. Adicionalmente, o emprego de robôs e novas técnicas de movimentação da tocha permitem atingir velocidades de soldagem e características geométricas dos cordões que garante maior produção e revestimentos uniformes com pequena diluição quando comparados ao que normalmente é atingido na soldagem manual com o MIG/MAG.

### **3. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente trabalho dá continuidade a uma linha de pesquisa antes já iniciada no LABSOLDA. Na primeira incursão sobre revestimento de tubos de caldeira de usinas termelétricas, foram realizadas inovações em equipamentos, procedimentos e infraestrutura.

Em assim sendo, uma das bancadas de ensaios, empregada em trabalhos de mestrado do LABSOLDA, foi parcialmente absorvida pelo presente trabalho, que recebeu continuamente novos equipamentos e instrumentos.

#### **3.1. Estrutura Organizacional da Pesquisa**

Em um trabalho como o aqui proposto, o qual envolve conhecimentos em distintas áreas da engenharia, torna-se fundamental a divisão das atividades em grandes grupos de atuação. Em virtude destas características, este trabalho adota como metodologia a divisão das atividades em grupos, Figura 3.1.

Cabe destacar que ao longo do projeto foram realizadas visitas ao Complexo Termelétrico Jorge Lacerda para o reconhecimento e verificação da problemática do revestimento por soldagem das paredes de água em campo, identificação de dificuldades, intercâmbio de informações com engenheiros da TRACTEBEL Energia e direcionamento das soluções.

O primeiro grupo, denominado Desenvolvimento de Hardware e Software para o Controle do Sistema Robótico, foi subdividido em duas áreas, a saber:

- Projeto de Hardware e Software para o Controle de Movimento: esta etapa caracteriza-se pela elaboração do software que será empregado para controlar o deslocamento do sistema robótico. Tanto hardware quanto software foram desenvolvidos de modo a serem um conjunto genérico que poderá ser aplicado em outros dispositivos construídos pelo LABSOLDA;

- Projeto de Interface Gráfica e Software para Oscilação Tridimensional: além de se ter um software robusto, é indispensável que o mesmo seja de fácil utilização. Desta forma, a interface desenvolvida incorpora características que a torna mais intuitiva. Quanto ao software para oscilação tridimensional, a movimentação conjunta dos eixos Y e

Z, tende a trazer vantagens para o revestimento, conforme já foi abordado no texto;

O segundo grupo, chamado de Desenvolvimento do Projeto Mecânico e de Acionamento do Sistema Robótico, foi subdividido em duas linhas de atuação que estão descritas a seguir.

- Projeto e Fabricação dos Componentes Mecânicos do Sistema Robótico: o projeto mecânico deste novo sistema robótico apresentou uma nova concepção, quando comparado com os demais equipamentos desenvolvidos pelo LABSOLDA, tanto na parte de componentes mecânicos, quanto nos acionamentos. O objetivo foi contemplar ao máximo todas as particularidades do ambiente onde o robô executará as tarefas;

- Projeto do Acionamento Elétrico do Sistema Robótico: considerando as elevadas velocidades de deslocamento, e elevadas frequências de oscilação, foi necessário projetar um sistema de acionamento que proporcionasse tais velocidades e que possuísse confiabilidade e robustez na execução das trajetórias. Logo, foram estudadas diferentes tecnologias de acionamento pra se concluir qual a mais adequada.

O terceiro grupo, Desenvolvimento de Procedimentos de Soldagem com o Processo MIG/MAG, encontra-se subdividido nas duas frentes de trabalhos apresentadas abaixo.

- Elaboração de Procedimentos Preliminares em Chapas Planas: foram estudados procedimentos de soldagem visando as maiores taxas de deposição possíveis, para as posições de soldagem vertical e plana, com o intuito de verificar a posição mais adequada de soldagem. Neste ainda, foi analisada a influência da velocidade de oscilação da tocha sobre as características geométricas dos cordões. Paralelamente, conduziu-se um estudo comparativo entre o MIG/MAG CC e o MIG/MAG CA;

- Revestimento de Painéis Tubulares: este item compreende o revestimento de painéis tubulares com estratégias e procedimentos de soldagem distintos, aplicados em laboratório e em campo. Adicionalmente, tem-se uma comparação entre as ovalizações dos tubos em cada modo de revestimento. Em suma, são apresentados os resultados da presente tese.

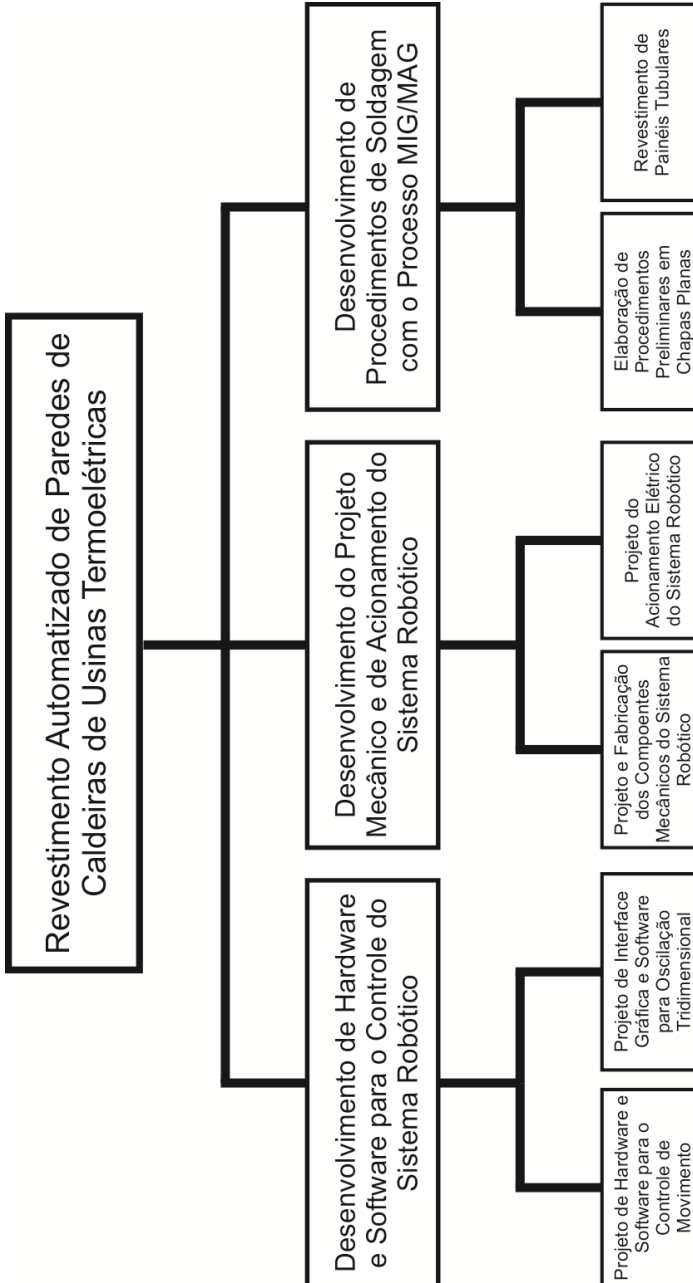


Figura 3.1. Estrutura organizacional das principais áreas do projeto

## 3.2. Equipamentos

### 3.2.1 Fontes de Energia

No transcorrer do trabalho foram empregadas duas fontes de soldagem. A primeira delas foi a de modelo DIGITEC 450 [69], fabricada pela empresa brasileira IMC Soldagem. Esta é uma fonte eletrônica multiprocesso, transistorizada, chaveada no secundário do transformador da estrutura de potência, controlada remotamente via microcomputador. Posteriormente, foi empregada uma fonte DIGIPLUS A7, a qual é uma evolução da DIGITEC com adequações de hardware e software a novas tecnologias de eletrônica, Figura 3.2.



Figura 3.2. Fontes de energia: em (A) DIGITEC 450 e em (B) DIGIPLUS A7

### 3.2.2 Tochas de Soldagem

A tocha reta TBi 241 Aut, fabricada pela TBi, com sistema de refrigeração por intermédio de água, capacidade máxima de corrente de 310 A e destinada a bitolas de arame de 0,8 a 1,2 mm, foi aplicada na maioria dos ensaios, Figura 3.3.



Figura 3.3. Tocha TBi 241Aut

### 3.2.3 Acessórios

A câmera FLIR SC 7000, Figura 3.4A, permite a filmagem térmica com resolução de 640 x 512 pixels, com uma sensibilidade de 20 mK e foi empregada em ensaios para a avaliação da variação de temperatura em corpos de prova.

A Figura 3.4B apresenta a câmera de alta velocidade IDT Y4-S1, a qual tem resolução de 1024 x 1024 pixels e capacidade de captura de 6.000 fps.

Já nas Figuras 3.4C e 3.4D são apresentados, respectivamente, o robô UP6, fabricado pelo Motoman e com seis graus de liberdade, e o TARTÍLOPE V4, com quatro graus de liberdade. Estes sistemas de deslocamento de tocha foram empregados em ensaios da presente tese, com o intuito dos resultados servirem como base para a definição dos requisitos do sistema a ser construído.

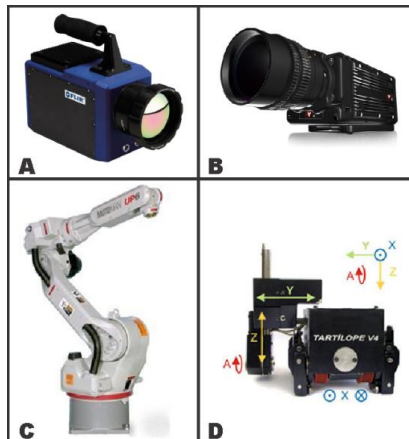


Figura 3.4. Em (A) câmera térmica FLIR SC 7000, em (B) câmera de alta velocidade IDT Y4-S1, em (C) robô Motoman UP6 e em (D) TARTÍLOPE V4

### 3.2.4 Instrumentação

Para aquisição e tratamento de dados foram utilizados os softwares FLIR ALTAIR, filmagem térmica, IDT Motion Studio, filmagem de alta velocidade, e o SAP, Sistema Portátil de Aquisição de Dados, da IMC Soldagem, para captura de dados de soldagem, Figura 3.5.



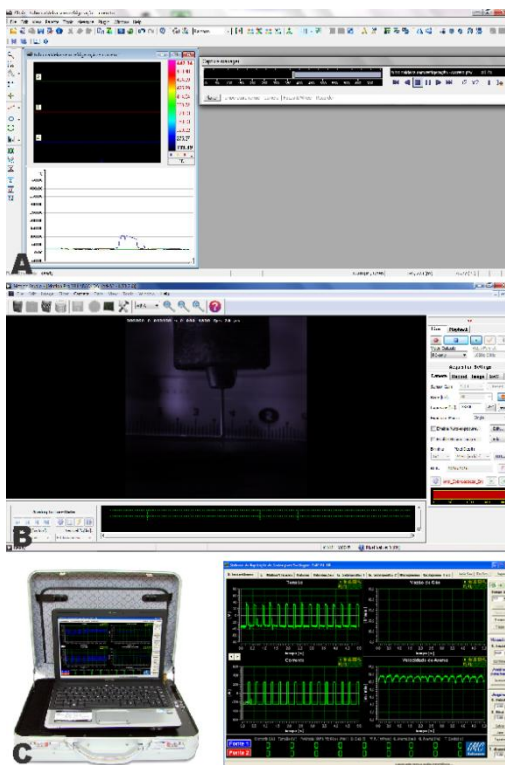


Figura 3.5. Em (A) FLIR ALTAIR, em (B) IDT Motion Studio e em (C) SAP

### 3.2.5 Descrição das Bancadas Principais

No decorrer do projeto, foram utilizadas duas bancadas distintas, tal situação decorre do fato de que no início do projeto, havia disponível apenas o manipulador TARTÍLOPE V4, para os ensaios de soldagem. Posteriormente, tomando como base os resultados atingidos com o referido equipamento, foi projetado e construído o TARTÍLOPE VX, o qual foi empregado em uma nova bancada para a continuidade dos ensaios.

Os primeiros experimentos, de trajetória e de revestimento foram realizados na bancada de soldagem implementada com o TARTÍLOPE V4, Figura 3.6, a qual possibilitava a instalação de painéis com até 3 m. Os principais equipamentos da referida bancada são: em (1) fonte chaveada de soldagem microprocessada IMC de 450 A com alimentador

automático de arame e interface de programação, em (2) o manipulador cartesiano de quatro graus de liberdade, TARTÍLOPE V4, com uma tocha de soldagem MIG/MAG fixada em sua extremidade, em (3) o suporte de fixação com o corpo de prova e sistema de refrigeração com água e em (4) o gabinete eletroeletrônico de acionamento e controle de movimento da tocha com a interface gráfica de programação do manipulador.

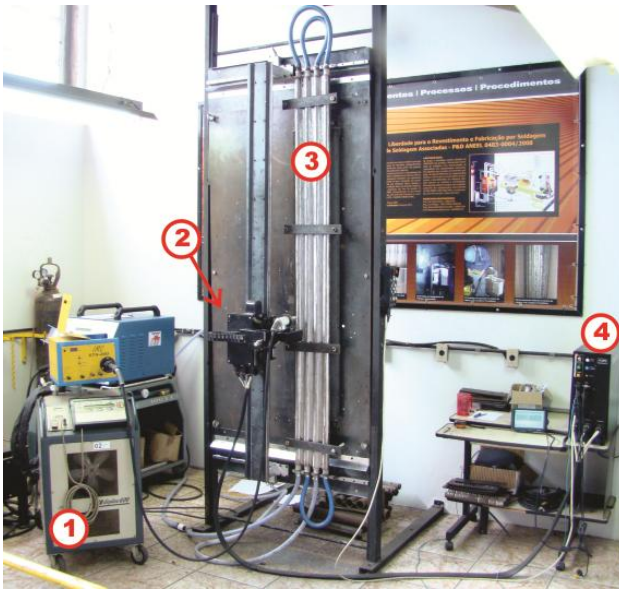


Figura 3.6. Bancada inicial para revestimento robotizado de painel tubular. Em (1) Fonte de soldagem, (2) Robô CNC, (3) Tubos de paredes de caldeira e (4) Gabinete de controle com IHM

A segunda bancada, Figura 3.7, possibilita o revestimento de painéis tubulares com até 6 m de comprimento. Ela é constituída por uma fonte de soldagem DigiPlus A7 (2) [85], com seu respectivo sistema de refrigeração da tocha (3) e cabeçote alimentador de arame (4). Em (1) tem-se o sistema de controle compacto desenvolvido para o projeto e em (6) o manipulador TARTÍLOPE VX com uma tocha de soldagem reta para o processo MIG/MAG. Por fim, o item (5) apresenta o painel tubular constituído por três membranas e quatro tubos novos e interligados por mangueiras para viabilizar a refrigeração da parede durante a soldagem.

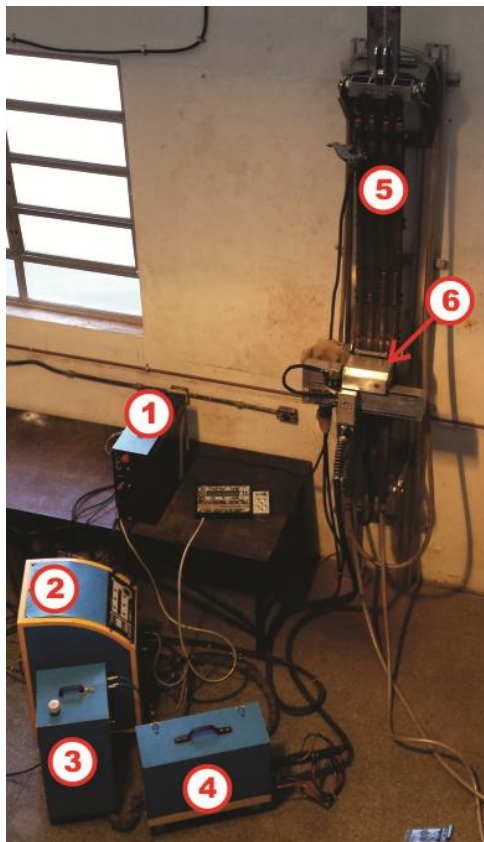


Figura 3.7. Bancada final para revestimento robotizado de painel tubular. Em (1) Gabinete de controle, (2) Fonte de soldagem, (3) Unidade de refrigeração, (4) Alimentador de arame, (5) Tubos de paredes de caldeira e em (6) Robô

Nos ensaios foram utilizados como corpos de provas painéis formados por três membranas e quatro tubos novos, com as características definidas no item 2.3 e dimensões de:  $a=5,0$  mm;  $b=6,0$  mm;  $c=56,0$  mm;  $d=38,0$  mm.

Antes do revestimento faz-se necessário remover a camada de óxido, e uma camada protetora por intermédio do esmerilhamento da superfície a ser revestida. Caso a superfície do tubo não seja devidamente preparada para o revestimento, há instabilidades na soldagem. Logo, é fundamental a referida limpeza para evitar possíveis defeitos e garantir a fusão do material de base com o material de adição.

### 3.3. Materiais

#### 3.3.1 Material de Aporte e Substrato

Para os ensaios preliminares foram utilizadas chapas de aço carbono 1020 como substrato, com dimensões 150,0 mm x 101,0 mm x 6,3 mm. Já no revestimento final, foram empregados tubos construídos com o aço 16Mo<sub>3</sub>, composição química conforme Tabela 2.2. Estes materiais apresentam características de soldabilidade similares, o que viabiliza a transferência dos resultados preliminares para o revestimento final.

A liga metálica empregada para o revestimento foi selecionada com base nas aplicações vislumbradas, e também de acordo com a possibilidade de aquisição rápida. Assim, foram conduzidos testes com o aço inoxidável austenítico 309L. A Tabela 3.1 traz sua composição química nominal.

Tabela 3.1. Composição química, em percentual, do aço 309L

C	Si	Mn	Cr	Ni	F
0,03	0,3 – 0,65	1 – 2,5	23 - 25	10 - 14	65,7 (bal.)

#### 3.3.2 Gases

Os ensaios envolveram os gases Ar, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, em uma mistura ternária com 95% de Ar, 3% de CO<sub>2</sub> e 2% de N<sub>2</sub>.

### 3.4. Ensaaios

A partir das informações levantadas na literatura e dos aspectos inovadores que deveriam ser investigados, foi realizado o planejamento experimental para os ensaios de soldagem, preparação e avaliação das soldas e determinação de características dos revestimentos, assim como verificação do comportamento do sistema robótico.

#### 3.4.1 Ensaaios de Soldagem

No início do trabalho, foram realizados ensaios de soldagem exploratórios automáticos, em diversas posições. Estes testes objetivaram verificar a influência da posição de soldagem, da velocidade de oscilação da tocha, de distintas sequências de execução dos cordões e o comportamento do sistema, isolando-se variações impostas pelo soldador.

Quando pertinente, foram realizadas aquisição e tratamento de dados, para a verificação da temperatura dos corpos de prova, velocidade de transferência e parâmetros de soldagem.

### 3.4.2 Determinação de Características Geométricas e Diluição

Para análise geométrica das soldas em chapas, as mesmas foram seccionadas transversalmente e longitudinalmente, ao que se seguiu preparação metalográfica com ataques químicos adequados. O método de dimensionamento adotado baseou-se em analisar largura ( $L$ ), reforço ( $R$ ) e penetração ( $P$ ), conforme Figura 3.8. Estas mesmas características foram analisadas no revestimento de tubos, de acordo com a Figura 3.9.

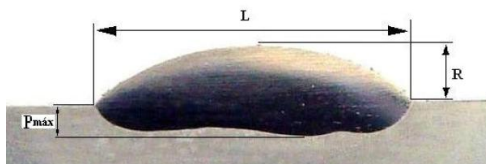


Figura 3.8. Dimensões geométricas dos cordões de solda abordadas no presente trabalho

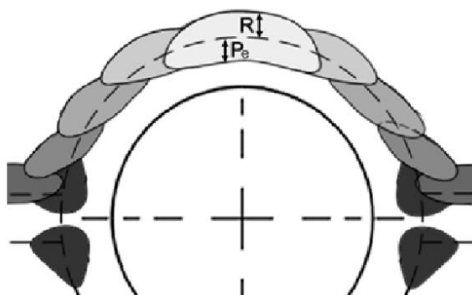


Figura 3.9. Especificações dimensionais do revestimento [33]

A seção transversal de cada cordão é fotografada e, então, transposta a um software dedicado (Image Tool), como visto na Figura 3.10. Neste software, é possível a delimitação e cálculo das áreas do metal de solda, da porção do metal de solda advinda da fusão do metal de base e, conseqüentemente a diluição.

Os critérios de avaliação do revestimento utilizados foram baseados na diretriz do EPRI, que definem os limites, Tabela 3.2, e os defeitos que reprovam a soldagem [2]. Esta diretriz afirma também que

tubos com espessura menor que 2,5 mm não devem ser revestidos, apenas substituídos. Nos ensaios efetuados não houve problemas relacionados com isto posto que todos os tubos eram novos e com espessura maior do que 2,5 mm.

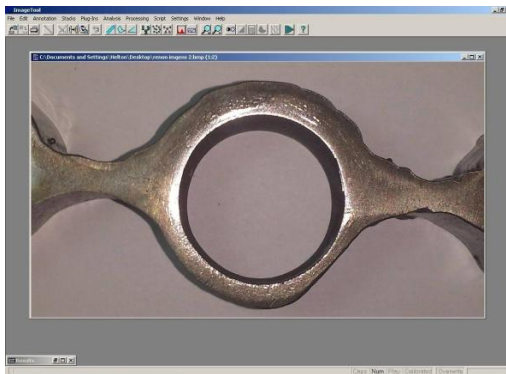


Figura 3.10. Exemplo de uso do software de tratamento de imagens para cálculo da diluição da solda

Tabela 3.2. Critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda [2].

Parâmetro	Descrição	Faixa tolerável
Pe (mm)	Penetração	$0,35 < P < 0,56$
R (mm)	Reforço	$R < 3,18$ (1/8")
D (%)	Diluição	$10,0 < D < 15,0$

A ocorrência de mordeduras e eventuais respingos de solda foram verificados por intermédio de inspeção visual. As trincas, os poros e a falta de fusão e de penetração devem ser evitados, pois são fortes concentradores de tensão. Os respingos de solda excessivos e a perfuração do tubo devido ao excesso de energia na soldagem, também são fatores que reprovam o revestimento [2, 33].

### 3.4.3 Análise da Composição Química na Seção Transversal do Cordão de Solda

Alguns dos ensaios realizados objetivaram a determinação da influência dos modos e parâmetros de soldagem sobre a composição química e/ou sua homogeneidade no metal de solda. Para isto, as amostras foram cortadas transversalmente, preparadas e levadas ao MEV para análise semi-quantitativa da composição química.

#### 4. ENSAIOS PRELIMINARES

Para o revestimento dos tubos que constituem as paredes das caldeiras de usinas termelétricas foi escolhido o processo MIG/MAG. Tal seleção ocorreu pelo fato deste processo apresentar elevada taxa de fusão, portabilidade da tocha e elevada produtividade, principalmente pela redução dos tempos de parada em virtude da alimentação contínua do arame. Todos estes fatores contribuem para uma relativa facilidade na automatização da tarefa.

Do mesmo modo que em outros meios industriais, no cenário de revestimento de painéis é interessante elevada produtividade. Assim, é necessário trabalhar com elevados patamares de corrente de soldagem, acima da corrente de transição, proporcionando altas taxas de transferência metálica.

De acordo com a literatura, correntes acima da transição caracterizam uma transferência metálica do tipo goticular e são indicadas para a soldagem na posição plana, com o objetivo de alcançar alta penetração e enchimento de chanfros [58, 63]. Contudo, a aplicação em questão no presente trabalho é oposta ao indicado na literatura, uma vez que no revestimento é interessante baixa penetração. Com isto, a diluição do material de adição é reduzida e as propriedades químicas do revestimento menos afetadas.

A posição de soldagem também difere, posto que na maioria dos casos os tubos estão instalados na posição vertical. Caso o revestimento seja realizado em tubos novos a tarefa pode ser realizada em oficina. Com isto, há possibilidade de definir a posição de soldagem mais adequada.

O presente capítulo apresenta os ensaios preliminares da soldagem MIG/MAG de forma automatizada em distintas situações. São apresentadas as comparações entre a posição plana e vertical, influência da velocidade de oscilação da tocha sobre as características geométricas e químicas dos cordões, meios para viabilizar o revestimento de superfícies com o modo de transferência goticular, bem como um estudo a respeito do emprego do processo MIG/MAG CA no revestimento. Os ensaios foram realizados em chapas planas e serviram como base para a elaboração dos procedimentos de soldagem nos tubos, bem como para a definição dos requisitos do sistema robótico a ser desenvolvido.

#### 4.1. Comparação entre Soldagem na Posição Plana e na Posição Vertical

No revestimento de paredes tubulares podem ocorrer diferentes situações de posição de soldagem. A principal delas é a posição vertical, uma vez que a maioria dos tubos instalados nas caldeiras encontra-se nesta condição. Entretanto, quando há possibilidade do revestimento ser realizado em oficina, antes da instalação na caldeira, a soldagem pode ser realizada em outra posição.

Com o objetivo de comparar as posições plana e vertical de soldagem, foram elaborados ensaios, sobre chapa, os quais tiveram como base um procedimento padrão, Tabela 4.1, que proporcionava a soldagem nas duas posições supracitadas. Este procedimento é produto de uma série de ensaios que buscaram uma situação onde fosse possível a soldagem tanto na posição plana, quanto na vertical com os mesmos parâmetros. Além da alteração da posição de soldagem foi modificada também a velocidade de oscilação da tocha, sendo adotadas as frequências de 1,5, 2,5 e 3,5 Hz. Estes ensaios foram realizados em uma bancada com flexibilidade para operar em diferentes posições, Figura 4.1. A fonte empregada foi uma Digitec 450 [69], o manipulador um TARTÍLOPE V4 e o gás de proteção uma mistura ternária com 95% de Ar, 3% de CO<sub>2</sub> e 2% de N<sub>2</sub>.



Figura 4.1. Bancada para ensaios comparativos. Em (a) configuração para posição plana e em (b) para posição vertical



Tabela 4.1. Parâmetros da soldagem

Parâmetros	Unidade	Valor
Arame	-	ER309L
Diâmetro	mm	1,0
Velocidade de arame	m/min	10
Corrente	A	200
Vazão do Gás	l/min	15
Velocidade de soldagem	cm/min	40
Amplitude	mm	10
Tipo de oscilação	-	Triangular
DBCP	mm	15

Os seis cordões analisados são apresentados na Figura 4.2, e os ensaios na posição plana com 1,5, 2,5 e 3,5 Hz representados por a, c e e, respectivamente, mostram que com o aumento da frequência de oscilação da tocha se reduz a incidência de mordeduras nos cordões. Isto proporciona maior uniformidade e qualidade na soldagem.

Os cordões realizados na posição vertical com 1,5, 2,5 e 3,5 Hz, b, d e f, respectivamente, apresentam mudanças significativas quanto a geometria ao se comparar com o revestimento realizado na mesma frequência de oscilação de tocha na posição plana. Tem-se também alterações na sustentação da poça metálica para as distintas frequências. Em b e d destacam-se regiões onde ocorreu o escorrimento da poça, resultado em falha no cordão de solda. Já em f, maior frequência de oscilação, houve sustentação da poça metálica ao longo do cordão.

Com base no aspecto visual, tem-se que com o aumento da frequência de oscilações, os cordões de solda apresentam acabamento mais uniforme, e no caso da soldagem na posição vertical descendente, emprego de frequência abaixo de 3,5 Hz inviabiliza a execução do revestimento de forma contínua e robusta.

As macrografias dos corpos de prova são apresentadas na Figura 4.3, as características geométricas e diluição dos cordões na Tabela 4.2 e a composição na superfície das amostras, analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), na Tabela 4.3. Em virtude de defeitos causados por escorrimento durante a soldagem, os quais já eliminam o revestimento, as amostras (a) e (b) da Figura 4.3, relativas à frequência de 1,5 Hz, não foram encaminhadas para a análise química.

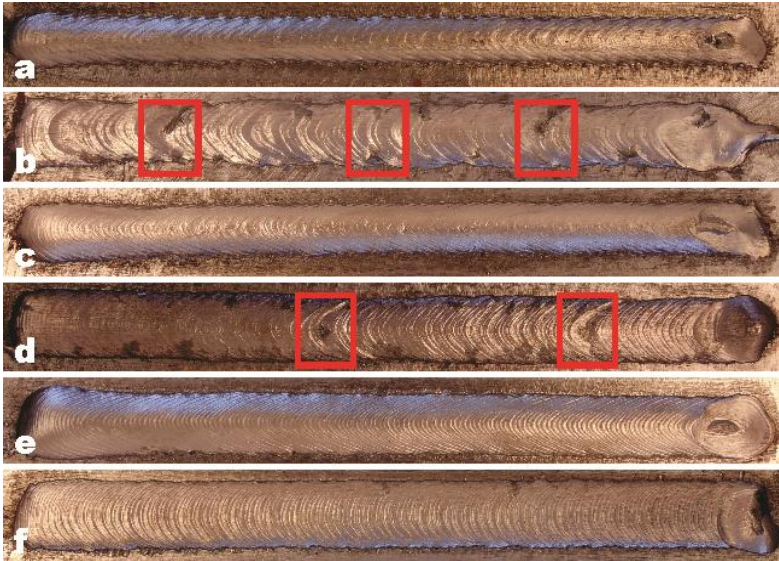


Figura 4.2. Superfície dos cordões. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz

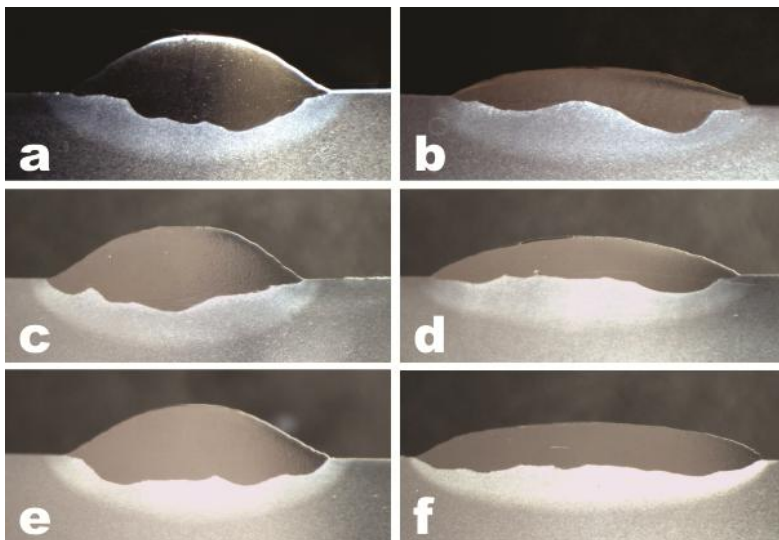


Figura 4.3. Macrografias comparativas. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz

Tabela 4.2. Análise da diluição e das características geométricas

Posição	Frequência (Hz)	Diluição (%)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
Plana	1,5 (amostra a)	38,2	2,5	12,0	1,9
	2,5 (amostra c)	35,5	2,4	12,1	1,6
	3,5 (amostra e)	34,8	2,3	12,2	1,4
Vertical	1,5 (amostra b)	32,1	1,3	13,4	1,4
	2,5 (amostra d)	29,4	1,8	14,9	0,9
	3,5 (amostra f)	27,4	1,6	16,2	0,8

Tabela 4.3. Composição química na superfície dos revestimentos

Amostra	Composição (%)				
	Cr	Mn	Fe	Ni	Si
c	15,15	1,79	74,24	8,12	0,71
d	17,42	2,16	70,27	9,40	0,75
e	17,13	2,01	70,71	9,29	0,86
f	19,84	2,08	66,77	10,84	0,76

Com relação à diluição nota-se que os cordões realizados na posição vertical apresentam menor percentual. Verificando os resultados dentro de cada uma das posições tem-se que com o aumento da frequência de oscilação da tocha há redução sistemática na diluição.

Quanto às características geométricas dos cordões, os resultados na posição vertical possuem menor reforço, maior largura e menor penetração. Todas estas características são desejáveis em um revestimento, pois é possível o preenchimento de uma área com menor quantidade de material e menor número de cordões.

Com o aumento da frequência de oscilação da tocha os cordões possuem maior largura e menor penetração. Uma das hipóteses é que a elevação da velocidade transversal da tocha ( $V_t$ ) interfere no vetor de velocidade da gota ( $V_g$ ), o qual é a relação entre a velocidade de transferência da gota ( $V_{tr}$ ) e a  $V_t$ , Figura 4.4, e definida pela eq 4.1.

$$V_g = \sqrt{V_{tr}^2 + V_t^2} \quad (\text{eq 4.1})$$

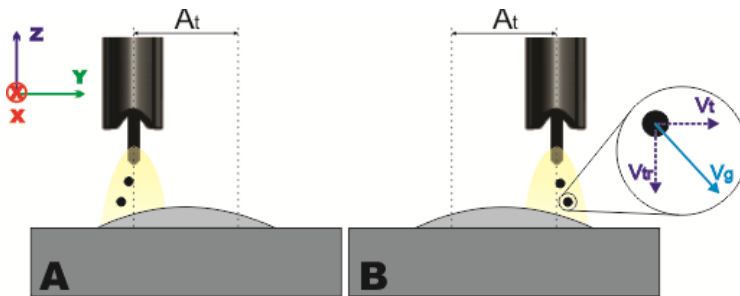


Figura 4.4. Velocidade transversal da gota

Para verificar a influência de  $V_t$  na velocidade da gota é fundamental verificar também a velocidade de transferência da gota. Para tanto, foram efetuadas filmagem de alta velocidade, 5000 quadros/s, com o intuito de relacionar tais variáveis.

A bancada utilizada é apresentada na Figura 4.5, com destaque para a fonte de soldagem (1), computador com software de filmagem (2), câmera de alta velocidade (3), sistema de deslocamento de tocha (4), laser para filmagem (5) e chapa de aço (6).

Os ensaios foram divididos em três, tendo como base os parâmetros da Tabela 4.1 e em cada etapa foi alterada apenas a frequência de oscilação da tocha, as quais foram de 1,5, 2,5 e 3,5 Hz. Para analisar os resultados, uma determinada gota foi marcada em vermelho e foram medidos o tempo entre o destacamento e a chegada à poça, bem como o deslocamento, em mm, no sentido longitudinal e transversal, por intermédio de um *grid* adicionado nas imagens e com espaçamento de 1 mm. Os resultados das filmagens são apresentados nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

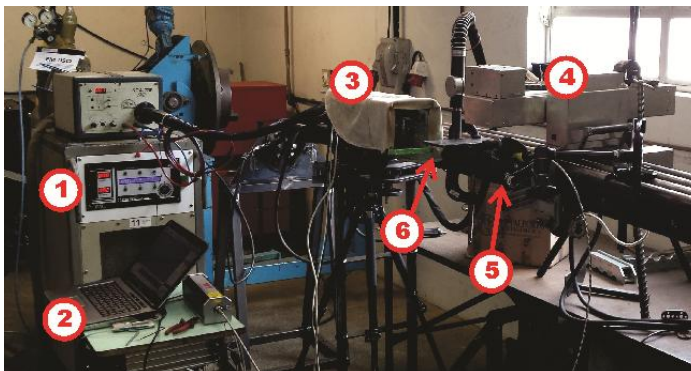


Figura 4.5. Bancada para filmagem da velocidade da gota

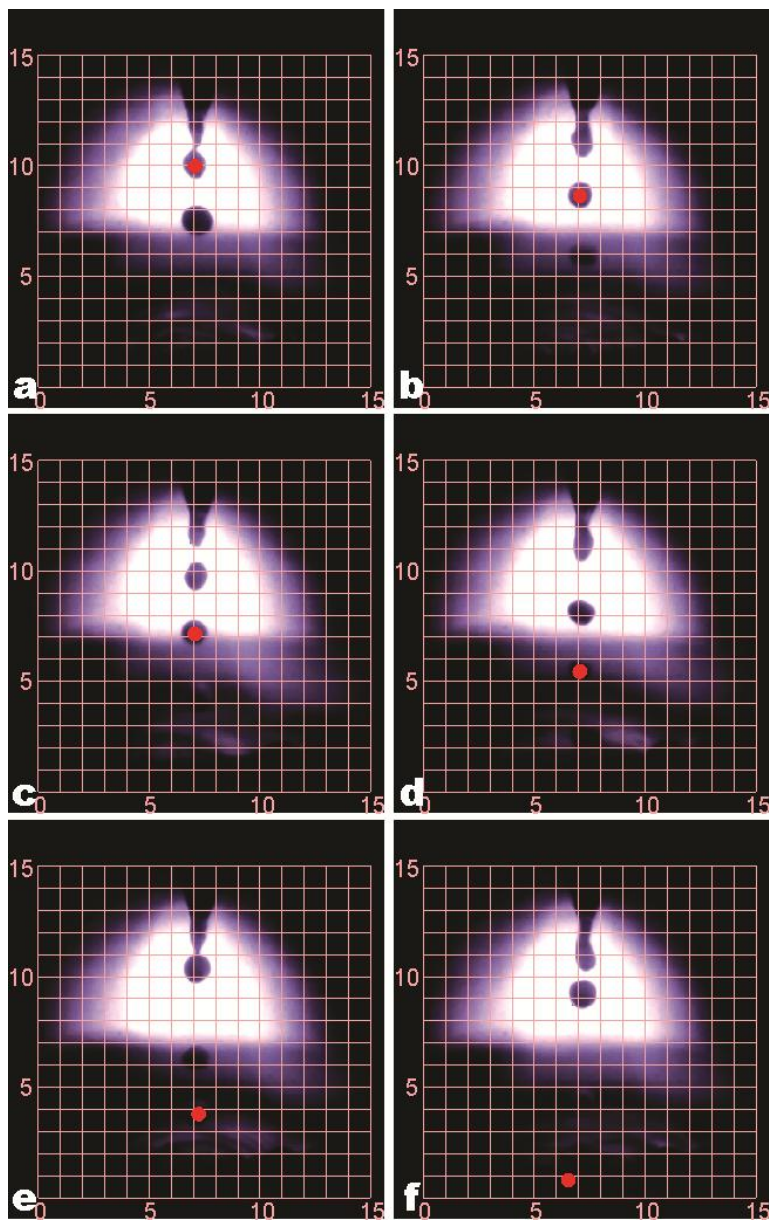


Figura 4.6. Trajetória da gota para frequência de oscilação de 1,5 Hz

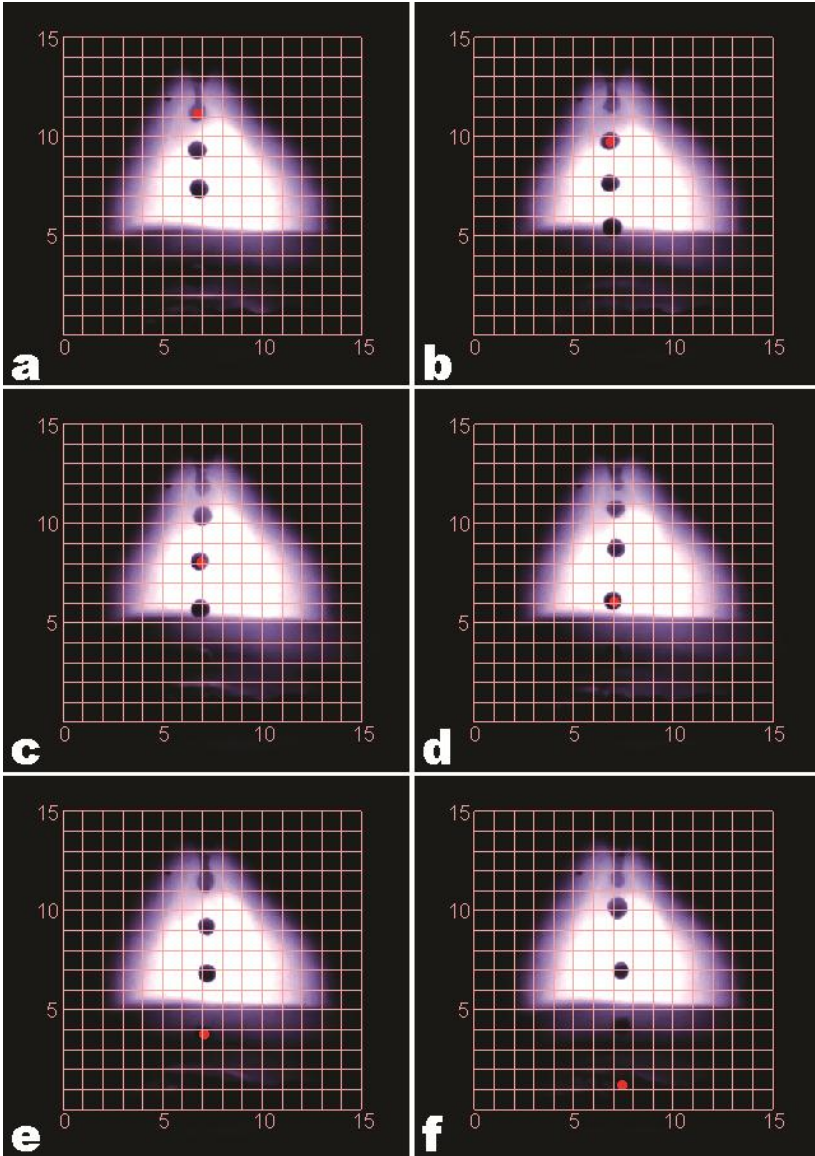


Figura 4.7. Trajetória da gota para frequência de oscilação de 2,5 Hz



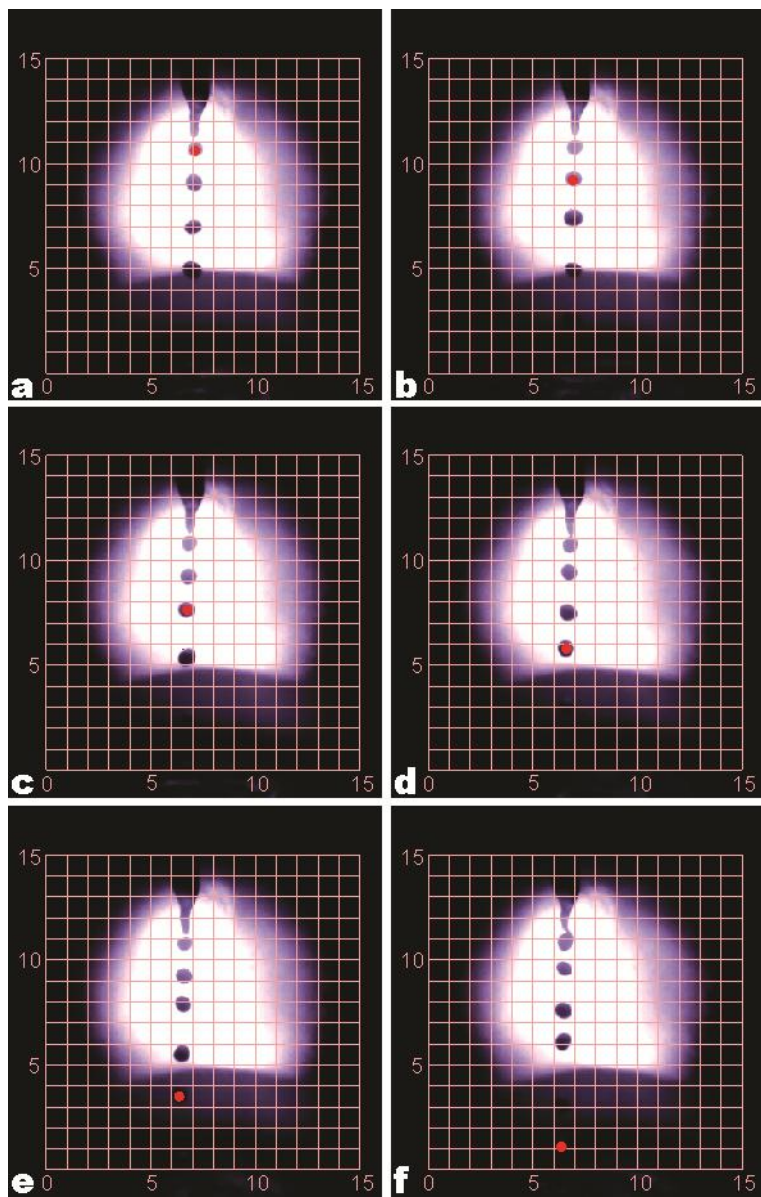


Figura 4.8. Trajetória da gota para frequência de oscilação de 3,5 Hz

Nos ensaios o tempo entre o destacamento da gota e sua chegada à poça metálica foi de 5 ms. Ocorreram apenas algumas variações nas distâncias deste trajeto, sendo que a gota percorreu 9,5, 10,0 e 9,5 mm, respectivamente nas frequências de 1,5, 2,5 e 3,5 Hz, fato decorrente de pequena variação no reforço do cordão.

Já no sentido transversal a gota deslocou 0,5, 0,8 e 1,0 mm, respectivamente nas frequências de 1,5, 2,5 e 3,5 Hz. Com base nestes valores foram calculadas as velocidades de transferência, transversal, mesma velocidade transversal da tocha e determinada a partir das características de oscilação, e da gota, Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Análise da velocidade da gota

Frequência (Hz)	Velocidade de transferência (cm/s)	Velocidade transversal (cm/s)	Velocidade da gota (cm/s)
1,5	190	10	190,26
2,5	200	16	200,64
3,5	190	20	191,05

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 indicam que a velocidade transversal da tocha contribui para o aumento da largura dos cordões, mas não interfere de forma acentuada na velocidade final da gota. Assim, a hipótese de que o aumento da largura do cordão é decorrente somente da velocidade transversal da gota não é pertinente.

Outra explicação é que com o aumento da frequência de oscilação é reduzida a distância percorrida longitudinalmente pela tocha durante um período, dado que a velocidade de soldagem se manteve. Isto faz com que o arco elétrico fique mais concentrado sobre a poça metálica, gerando maior pressão sobre a mesma e, conseqüentemente, contribuindo para que ela se espalhe mais e ocasione cordões mais largos.

Já com relação ao reforço os resultados não seguem uma determinada sequência quando o mesmo é observado isoladamente. Todavia, avaliando seu resultado em conjunto com os dados obtidos na largura, penetração e diluição, tem-se uma lógica. Dado que todos os cordões seguiram o mesmo procedimento, foi depositada a mesma quantidade de material por área de deslocamento. Como os cordões apresentam larguras e penetrações distintas o valor do reforço vai oscilar de acordo com as alterações nestas duas variáveis, ou seja, um cordão



que apresente maior penetração tende a possuir menor reforço, caso seja comparado com um de mesma largura.

Similarmente ao que acontece com o reforço, a análise química das amostras apresenta valores que são diretamente influenciados pelas características geométricas dos cordões. Comparando-se ensaios com a mesma frequência de oscilação de tocha, nas duas diferentes posições de soldagem, nota-se que na posição vertical existe maior percentual de cromo na superfície do revestimento, mesmo apresentando um reforço menor do que o cordão na posição plana. Entretanto, a penetração e a diluição na posição vertical são significativamente menores do que na posição plana, fato que colabora para que o percentual de cromo na superfície se eleve.

Os resultados da análise química auxiliam na quantificação da qualidade do revestimento. Contudo, não podem ser analisados isoladamente, uma vez que apresentam erros de medição inerentes ao equipamento e também ao local da análise. As características de um cordão de solda variam ao longo do seu comprimento, logo é fundamental que além da composição química seja verificada as características geométricas do cordão em todo o seu comprimento.

#### **4.2. Influência da Frequência de Oscilação da Tocha nas Características Geométricas e Químicas do Revestimento**

A partir dos resultados obtidos no item anterior, deu-se início ao estudo da influência da frequência de oscilação da tocha sobre o revestimento. Como a posição vertical apresentou características mais indicadas para uma tarefa de revestimento, foi adotada como padrão para os testes [70].

A Figura 4.9 mostra a bancada utilizada para realizar os ensaios, com destaque em (A) para o robô UP-6 da Motoman [71] e a fonte Digitec 450 da IMC Soldagem. Em (B) a imagem durante a soldagem. A escolha pelo robô UP-6 para efetuar os ensaios se deve ao fato do TARTÍLOPE V4 não possuir a dinâmica necessária para as velocidades de oscilação de tocha pretendidas.

Com o intuito de minimizar possíveis influências nos resultados, todos os ensaios foram realizados em corpos de prova com as mesmas características geométricas, Figura 4.10, os quais são de chapas de aço ABNT 1020 de 6,30 mm de espessura. Teve-se o cuidado de realizar a soldagem dos cordões em uma mesma distância das extremidades do corpo de prova e sempre com a chapa de aço na temperatura ambiente.

Desta forma, eliminou-se a influência térmica, que ocasionaria maior penetração, e o calor gerado pela soldagem foi distribuído da mesma forma em todas as situações.

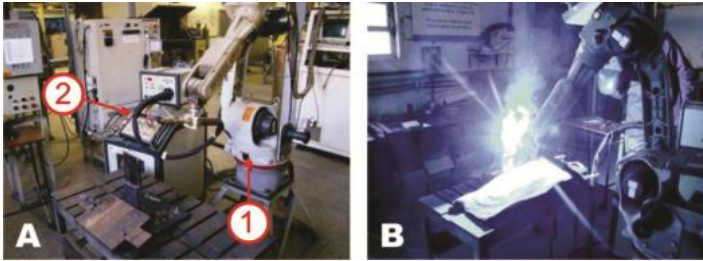


Figura 4.9. Bancada de ensaios. Em (A) robô (1) e fonte de soldagem (2) e em (B) realização do ensaio

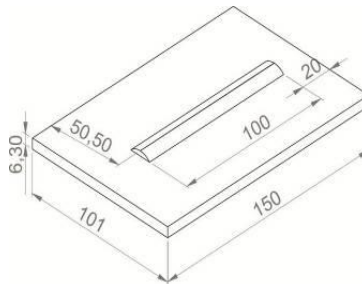


Figura 4.10. Dimensões, em milímetros, dos corpos de provas utilizados e dos cordões de solda

Com os parâmetros da Tabela 4.1 foi possível obter os cordões apresentados na Figura 4.11 variando somente a frequência de oscilação da tocha. Tomou-se o cuidado para que a DBCP fosse sempre a mesma, pois sua variação causaria diferença na penetração do material depositado.

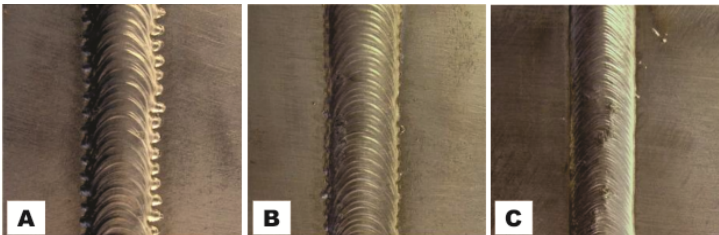


Figura 4.11. Imagens da superfície dos cordões com diferentes frequências de oscilação. Em (A) 2 Hz, em (B) 3 Hz e em (C) 4 Hz

Em uma análise preliminar, é perceptível que para frequências menores de oscilação aparecem defeitos conhecidos como mordeduras. Estes são decorrentes da associação de uma baixa oscilação da tocha em relação à velocidade de soldagem aplicada, o que gera falta de fusão nas extremidades do cordão. Logo, para frequências maiores de oscilação é possível realizar o revestimento com velocidades mais altas. Eventuais defeitos como trincas ou poros não foram evidenciados nos cordões.

Nesta primeira parte a avaliação foi verificada apenas o aspecto superficial dos cordões e conclui-se que os ensaios com frequência de 4 Hz apresentaram melhor qualidade. Em seguida foram analisadas as macrografias, sendo que, geralmente, é observada apenas a macrografia da seção transversal do cordão, Figura 4.12 região A. Contudo, além do corte transversal, efetuou-se dois cortes longitudinais, um na extremidade e outro no meio do cordão de solda, Figura 4.12 região B e C respectivamente. Por estes cortes é possível analisar as características geométricas em uma extensão maior do cordão, e avaliar de forma mais completa a diluição, penetração e reforço. As setas indicam a região onde foram realizados o lixamento e polimento das amostras, para consequente obtenção das imagens digitalizadas das macrografias.

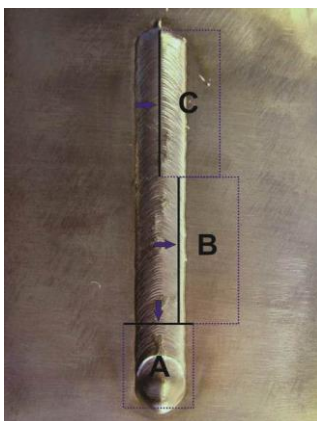


Figura 4.12. Regiões das análises macrográficas

Ao analisar isoladamente a Figura 4.13 percebe-se que a amostra de 2 Hz apresentou o menor valor de penetração, 0,60 mm, o que a torna inicialmente uma opção satisfatória para o revestimento. Já a amostra de 4 Hz teve um ponto máximo de penetração de 0,73 mm. Com a verificação somente deste fator a conclusão seria de que o processo de 2 Hz foi superior ao de 4 Hz, porém isto é precipitado e errôneo.

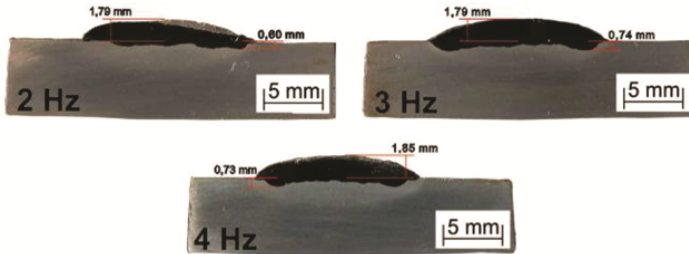


Figura 4.13. Macrografia das amostras na região A juntamente com as medidas de reforço e penetração

Quando se considera as macrografias das seções longitudinais, Figura 4.14 e Figura 4.15, nota-se que quanto maior a frequência de oscilação maior é a uniformidade no perfil do metal depositado. A variação de penetração encontrada na amostra de 2 e 3 Hz, principalmente na região B, não é desejável em um revestimento, pois indica não uniformidade da soldagem. Ao se verificar somente a seção transversal do cordão, erros podem ser cometidos, pois é possível que seja considerada como base a parte em que a penetração foi maior, ocasionando um resultado que não condiz com o perfil geométrico de penetração ao longo de todo o cordão.

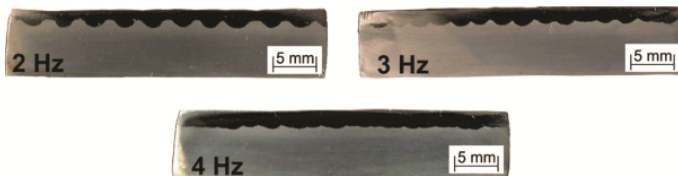


Figura 4.14. Macrografia das amostras na região B

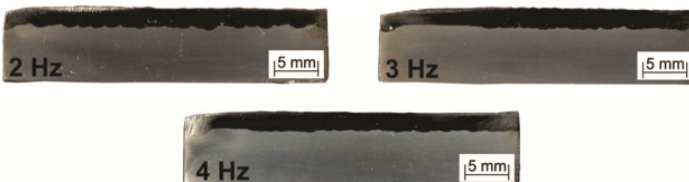


Figura 4.15. Macrografia das amostras na região C

As características da diluição também se alteram significativamente em cada uma das três regiões analisadas, Tabela 4.5. Nas regiões A e B há redução da diluição com o aumento da velocidade de oscilação da tocha, enquanto que na região C ocorre aumento da

diluição. Entretanto, de uma maneira geral, pode-se perceber através do valor médio da diluição nas três regiões, que a elevação da velocidade transversal da tocha de soldagem ocasiona redução na diluição total do revestimento.

Tabela 4.5. Análise de diluição para as amostras

Frequência (Hz)	Diluição (%)			Valor Médio
	A	B	C	
2	25,2	17,3	27,3	23,3
3	24,5	15,0	29,2	22,9
4	19,5	9,4	31,4	20,1

Na tentativa de realizar uma comparação mais aprofundada entre os dois extremos de frequência foi analisada a composição química em determinadas regiões das amostras de 2 e 4 Hz no corte (B), conforme mostra a Figura 4.16. Para a amostra de 2 Hz tomou-se cinco regiões de análise, sendo duas delas na região de menor penetração (B1 e B2) e as outras três na região com maior penetração (A1, A2 e A3). Destaca-se que a região intermediária do “vale” (A2) fica exatamente na mesma profundidade que a região da interface do “pico” (B2). Por fim, para a amostra de 4 Hz fez-se apenas três análises (C1, C2 e C3), pois praticamente não há variação no perfil de penetração.

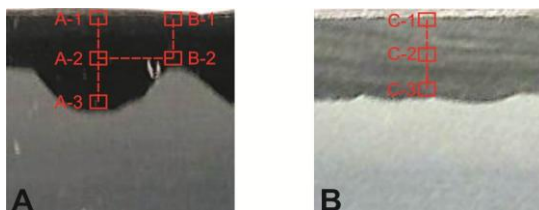


Figura 4.16. Regiões onde foram feitas as análises químicas. Em (A) amostra de 2 Hz e em (B) amostra de 4 Hz

Os resultados são apresentados na Tabela 4.6 para a amostra de 2 Hz e na Tabela 4.7 para a de 4 Hz. Existe um percentual de erro nas análises que é inerente ao processo do MEV. O componente químico que servirá de base para o estudo a ser feito é o cromo, pois o mesmo está relacionado com a passividade dos aços inoxidáveis. Quanto menor o teor de cromo mais suscetível é o metal a ataques químicos. Para teores acima de 10% de cromo o aço possui resistência à corrosão e na faixa de 20% adquire fluência [72].

A análise química da Figura 4.16A revela que não existe uma regularidade na composição do cordão de solda, sendo que a região (A-3) possui apenas 16,24 % de cromo, teor abaixo do encontrado nas outras regiões. De fato, quanto maior a penetração menor será o teor de cromo alcançado, sendo que este perfil do cordão depositado, em forma de onda, realça mais esta diminuição. Logo, caso aconteça uma degradação do metal revestido, quando a região em questão for alcançada, a proteção não será a mesma e a corrosão se dará de forma mais rápida. Somado a isto, o material abaixo de (A-2) é desnecessário, pois à medida que as regiões acima dele forem degradadas a área abaixo de (B-2) ficará sem o material de solda, ocorrendo corrosão em determinados pontos do tubo.

Com relação à Figura 4.16B é perceptível que o teor de cromo está maior do que na amostra de 2 Hz e há uma regularidade na composição química do cordão de solda. Tal característica é benéfica, pois se sabe que até a região (C-3) o cromo mantém-se semelhante à região (C-1) e com alta porcentagem, na faixa de 20%.

Tabela 4.6. Composição química para as regiões especificadas para a amostra de 2 Hz

Região	Composição (%)			
	Cr	Mn	Fe	Ni
A-1	18,64	2,11	68,27	10,99
A-2	18,08	1,85	69,17	10,9
A-3	16,24	2,16	72,23	9,38
B-1	18,98	1,88	67,85	11,29
B-2	18,12	1,93	69,93	10,03
Erro (+/-)	0,28	0,19	0,69	0,49

Tabela 4.7. Composição química para as regiões especificadas para a amostra de 4 Hz

Região	Composição (%)			
	Cr	Mn	Fe	Ni
C-1	20,24	1,92	66,25	11,59
C-2	20,22	1,86	66,31	11,61
C-3	19,85	1,81	67,09	11,25
Erro (+/-)	0,31	0,35	0,66	0,51

Com base nos dados apresentados conclui-se que um depósito com maior frequência de oscilação proporciona maior uniformidade e a composição química do cordão de solda é mais constante, bem como os teores de cromo são maiores em todas as regiões analisadas.

#### 4.3. Método para a Definição das Variáveis de Deslocamento da Tocha de Soldagem

Na automação da soldagem, ao se programar um manipulador para a execução de uma trajetória, o operador tem liberdade para regular três variáveis básicas: velocidade de soldagem, amplitude e frequência de oscilação. Em virtude da possibilidade de serem reguladas independentemente, podem ocorrer disparidades entre os valores das variáveis, as quais afetam a qualidade da soldagem. No caso da frequência de oscilação da tocha e da velocidade de soldagem, a falta de correlação entre eles gera inconstâncias geométricas e químicas, conforme apresentadas no item anterior.

Para reduzir estes problemas foi adotada uma nova proposta para a regulação das variáveis de deslocamento de tocha. Nesta abordagem, o presente trabalho considera a variável chamada comprimento de oscilação ( $\lambda$ ), a qual é definida como a distância percorrida pela tocha no eixo X durante um período de oscilação, no eixo Y, Figura 4.17.

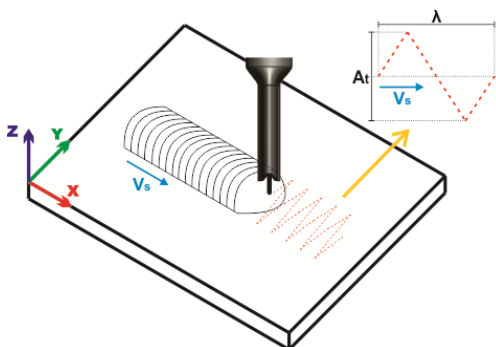


Figura 4.17. Trajetória de oscilação

Na determinação do comprimento de oscilação é necessário estabelecer a relação entre a velocidade de soldagem ( $V_s$ ) e a frequência de oscilação ( $f$ ). Nesta equação,  $V_s$  é dividida por 6 para adequação das unidades, pois é expressada em cm/min e aqui é necessário tratá-la em mm/s, eq 4.2.

$$\lambda = \frac{V_s}{6f_t} \quad (\text{eq 4.2})$$

Nas amostras com 2, 3 e 4 Hz de frequência de oscilação apresentadas na Figura 4.14, teve-se comprimentos de oscilação de 3,33, 2,22 e 1,67 mm, respectivamente. Nota-se que para valores de  $\lambda$  mais elevados o cordão possui um perfil longitudinal de penetração ondulatório e com variação da composição química.

Com base nos dados do item 5.2 é aconselhável que para se obter um revestimento onde os cordões apresentem uniformidade geométrica e química seja definido um valor mínimo de  $\lambda$ , determinando assim uma correlação entre frequência de oscilação da tocha e velocidade de soldagem. Dado que a amostra de 3 Hz da Figura 4.14 possui  $\lambda$  de 2,22 mm apresenta pouca alteração no perfil de penetração, definiu-se que é aconselhável realizar os revestimentos com valores de comprimento de oscilação menores do que 2,25 mm. Assim, a característica ondulatória do perfil longitudinal do cordão é significativamente reduzida. A Figura 4.18 ilustra um gráfico que relaciona a frequência de oscilação que deve ser regulada para diferentes velocidades de soldagem em razão do valor de comprimento de oscilação desejado.

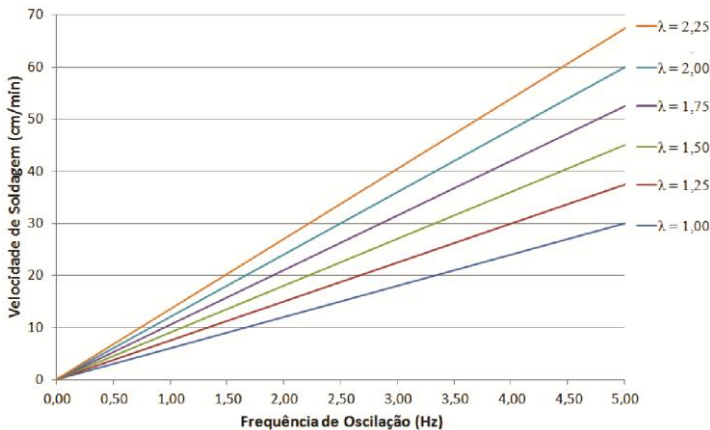


Figura 4.18. Comprimentos de oscilação em relação à velocidade de soldagem e frequência

Com relação à amplitude do movimento, em geral os sistemas automáticos já possuem uma programação que limita a relação da oscilação da tocha para uma determinada amplitude. Esta limitação é relacionada com a capacidade dinâmica das juntas envolvidas na



movimentação, pois para um mesmo valor de oscilação de tocha quanto maior a amplitude, maior será a velocidade.

#### **4.4. Estudo Termográfico da Influência da Frequência de Oscilação da Tocha**

Em decorrência dos resultados obtidos nos itens 4.1 e 4.2, buscou-se analisar a influência da frequência de oscilação da tocha na temperatura do cordão. A quantidade de calor imposta à peça em uma operação de soldagem é denominada de Energia de Soldagem (ES) e tradicionalmente é calculado pela equação a seguir. Onde  $I_m$  é a corrente média e  $U_m$  a tensão média da solda, e  $V_s$  a velocidade de soldagem [60].

$$ES = \frac{I_m \times U_m}{V_s} \quad (\text{eq 4.3})$$

Além das variáveis comumente consideradas na determinação da energia de soldagem, acredita-se, em virtude dos resultados apresentados na seção 5.2, que a velocidade de oscilação da tocha interfira no modo como o calor é transferido à peça. Para avaliar tal influência foi adotado o procedimento padrão da Tabela 4.1, com três valores distintos de frequência de oscilação da tocha: 1,5, 2,5 e 3,5 Hz.

A análise foi realizada por intermédio de ensaios com filmagem termográfica, tornando possível verificar o comportamento térmico de todo o corpo de prova durante a soldagem [75, 76]. O corpo de prova, similar ao apresentado na Figura 4.10, foi fixado na posição vertical, sendo a soldagem efetuada em um lado da chapa, enquanto que a filmagem foi realizada pelo lado oposto com a câmera térmica FLIR SC 7000 [77] e as análises feitas com o programa FLIR ALTAIR [78].

A partir da captura das imagens foram traçadas linhas verticais e horizontais sobre os cordões com o intuito de verificar a temperatura ao longo dos mesmos, Figura 4.19. As linhas verticais foram posicionadas no sentido longitudinal do cordão e em três posições: extremidade esquerda, central e extremidade direita. Assim, é possível gerar um perfil térmico da temperatura no transcorrer de toda a soldagem. Já as linhas horizontais foram traçadas no sentido transversal dos cordões de solda com o objetivo de verificar a temperatura entre as extremidades laterais do cordão.

Na imagem térmica, Figura 4.19, nota-se que o cordão efetuado com 1,5 Hz, A e B, apresenta uma significativa região com temperatura na ordem de 300 °C. Com o aumento da frequência de oscilação da tocha para 2,5 Hz, C e D, há uma redução nas áreas com a referida temperatura. Por fim, no ensaio com 3,5 Hz de frequência, E e F, praticamente não são encontrados pontos com temperatura de 300 °C.

Posteriormente, foram analisados os gráficos de temperatura das linhas verticais, Figura 4.20, onde em A tem-se 1,5, em B 2,5 e em C 3,5 Hz. Em todas as situações a linha central do cordão é a que apresenta as maiores temperaturas. Isto era esperado, posto que o arco elétrico encontra-se por mais tempo nesta região do que nas extremidades. Com relação à diferença de temperatura entre os corpos de prova, o aumento de 1 Hz na frequência de oscilação gerou uma redução aproximada de 20 °C na temperatura máxima atingida pela chapa. Este mesmo resultado é observado na medição de temperatura das linhas horizontais, Figura 4.21.

Por fim, a Figura 4.22 apresenta a ocorrência de pixels em cada temperatura. Com o aumento da frequência de oscilação há diminuição dos pontos com temperatura acima de 250 °C e aumento de pontos com temperaturas abaixo deste valor.

Pode-se concluir que a velocidade de oscilação da tocha interfere diretamente na forma como o calor é transmitido para o material de base. Com frequências mais altas a distribuição do calor é mais homogênea, o que implica em uma poça metálica com temperatura mais baixa. Uma explicação é o fato que para velocidades transversais mais altas o arco elétrico fica menos tempo sobre uma determinada região, assim, o aquecimento desta é menor.

Como consequência tem-se um revestimento com menor penetração e diluição, além de prover maior uniformidade ao longo do cordão. Os resultados da análise térmica vão de encontro com os resultados obtidos na seção 5.2, os quais indicam que frequências de oscilação elevadas são mais adequadas para o revestimento.

Cabe destacar, que embora a literatura cite as dificuldades de sustentação da poça metálica na posição vertical, quando se solda com transferência goticular, o aumento da velocidade transversal contribui para o sucesso deste tipo de soldagem. Nestes casos, o calor não fica concentrado em uma região o que reduz a possibilidade de escorrimento do metal líquido, conforme observado em b e d da Figura 4.2.

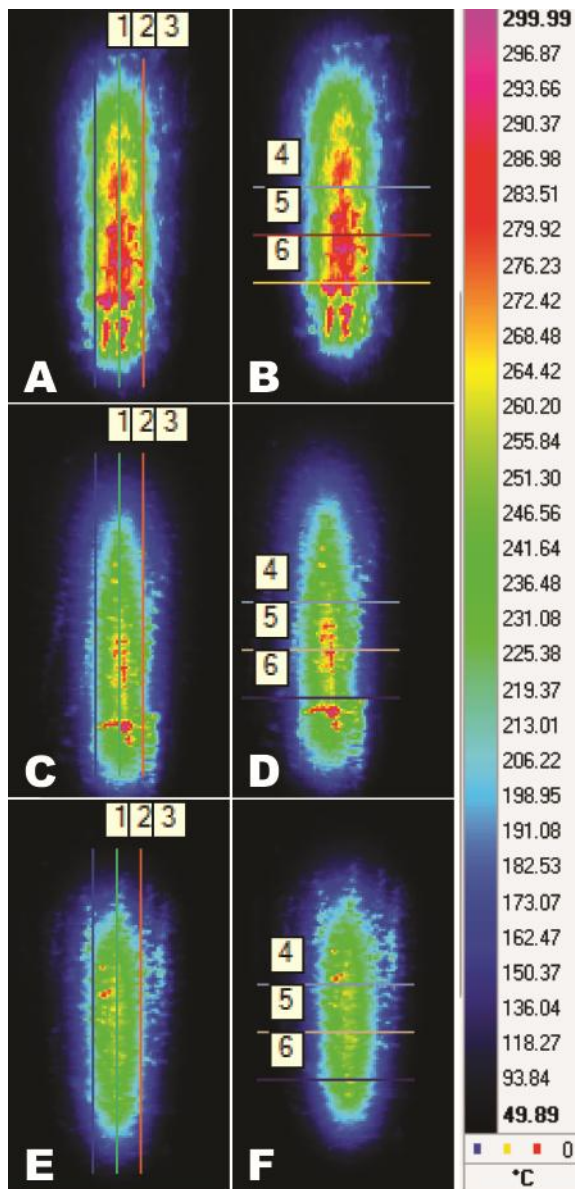


Figura 4.19. Linhas de medição de temperatura. Em (A), (C) e (E) medição no sentido vertical respectivamente com 1,5, 2,5 e 3,5 Hz de frequência de oscilação. Em (B), (D) e (F) medição no sentido horizontal com 1,5, 2,5 e 3,5 Hz de frequência de oscilação

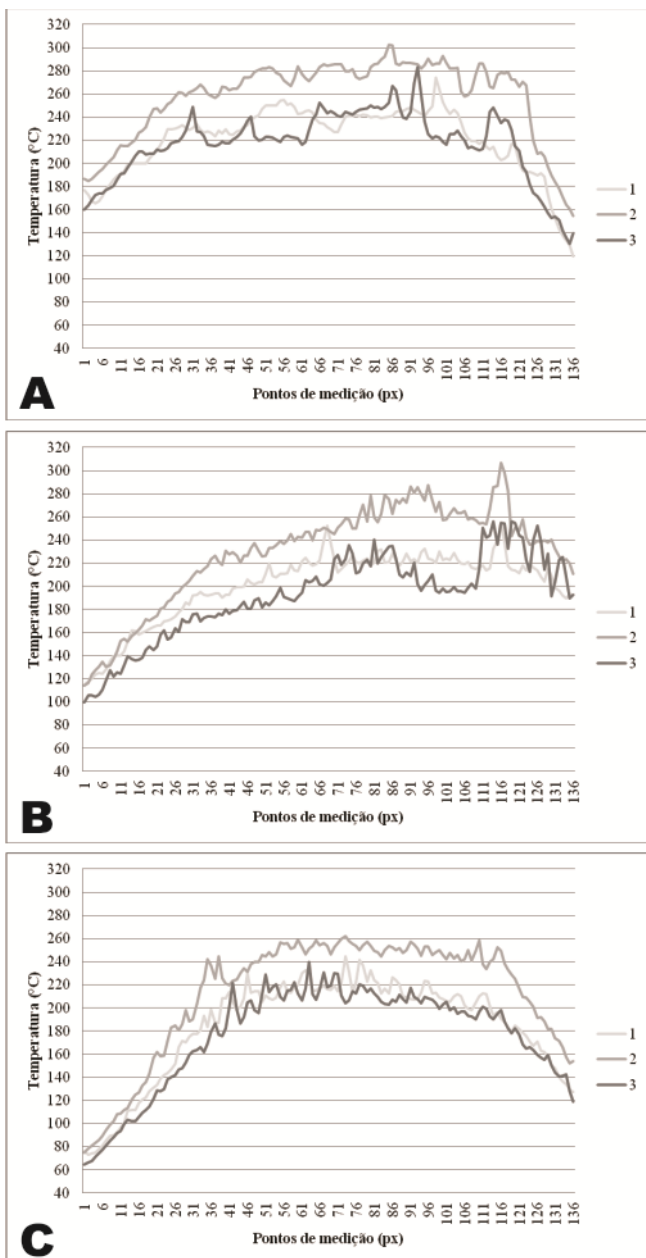


Figura 4.20. Medição de temperatura no sentido vertical. Em (A) 1,5 Hz, em (B) 2,5 Hz e em (C) 3,5 Hz de frequência de oscilação

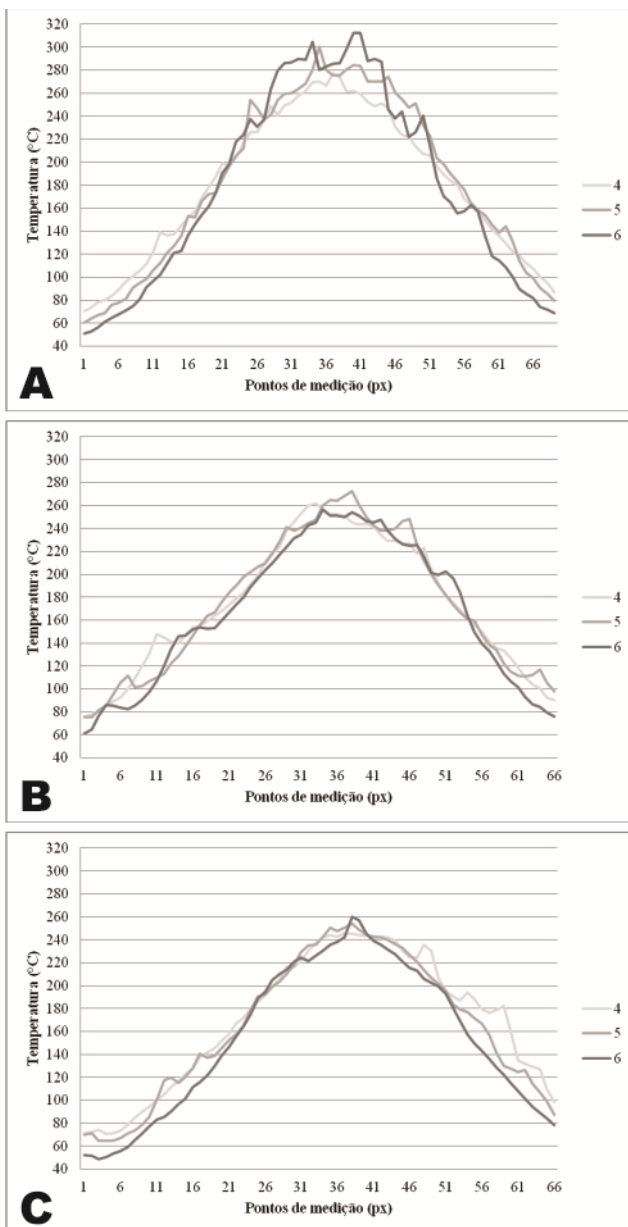


Figura 4.21. Medição de temperatura no sentido horizontal. Em (A) 1,5 Hz, em (B) 2,5 Hz e em (C) 3,5 Hz de frequência de oscilação

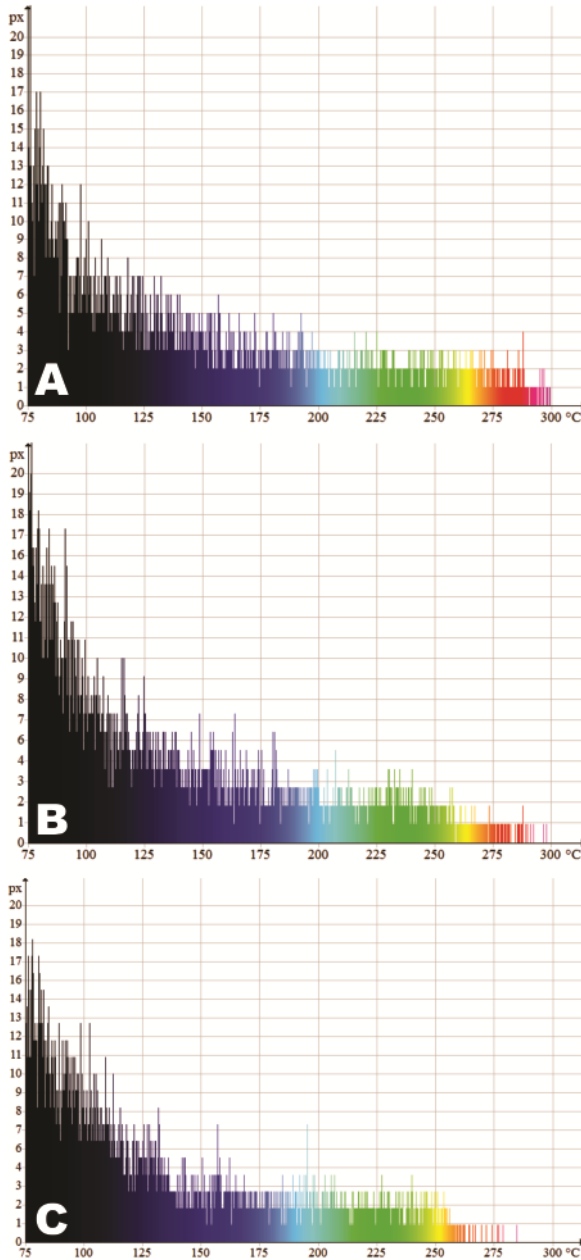


Figura 4.22. Ocorrência de pontos de temperatura. Em (A) 1,5 Hz, em (B) 2,5 Hz e em (C) 3,5 Hz de frequência de oscilação

#### 4.5. Análise da Largura dos Cordões na Soldagem com MIG/MAG CC e MIG/MAG CA

Para o revestimento de uma superfície é utilizada a oscilação da tocha de soldagem com o intuito de obter cordões mais largos. Contudo, a largura final do cordão é maior do que a amplitude da oscilação e esta variação está relacionada com as características inerentes de cada processo de soldagem.

O entendimento da variação na largura dos cordões é importante para posterior definição da estratégia de revestimento dos tubos das caldeiras. Com base nestes dados pode-se definir a quantidade de cordões necessários para o revestimento, considerando a largura e a sobreposição entre eles. O objetivo dos ensaios realizados sobre chapa, na posição vertical descendente e descritos a seguir, é verificar a largura de cordão obtida para distintas amplitudes de oscilação, tanto para o revestimento com o MIG/MAG CA, quanto para o MIG/MAG CC.

Para os testes com o MIG/MAG CA foram adotados os dados apresentados na Tabela 4.8, sendo que o gás empregado é composto por 95% de Ar, 3% de CO<sub>2</sub> e 2% de N<sub>2</sub>. A forma de onda resultante é representada na Figura 4.23 e possui um percentual de polaridade negativa de 20%, quando analisada a relação entre as áreas de período positivo e período negativo. Já para os ensaios com o MIG/MAG CC foram empregados os parâmetros da Tabela 5.1.

Tabela 4.8. Parâmetros da soldagem MIG CA

Parâmetros	Unidade	Valor
Arame	-	ER309L
Diâmetro	mm	1,0
Velocidade de arame	m/min	10
I <sub>b</sub>	A	40
t <sub>b</sub>	ms	2,0
I <sub>n</sub>	A	-130
t <sub>n</sub>	ms	2,2
I <sub>p</sub>	A	328
t <sub>p</sub>	ms	3,2
Velocidade de soldagem	cm/min	32
Tipo de oscilação	-	Triangular
DBCP	mm	15

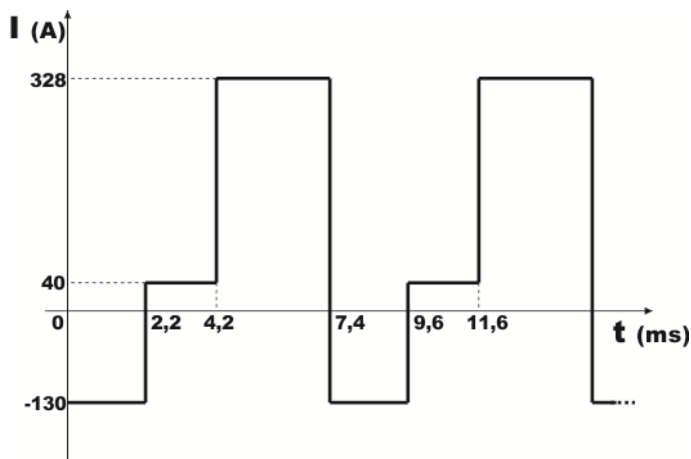


Figura 4.23. Forma de onda da corrente de soldagem no MIG CA

A partir dos parâmetros de soldagem já apresentados, os cordões foram realizados com as mesmas frequências de oscilação de 3 Hz e quatro amplitudes distintas, sendo 14, 13, 12 e 11 mm.

A Figura 4.24 traz os cordões, onde A, B, C e D são referentes ao MIG/MAG CA e com amplitudes de 14, 13, 12 e 11 mm respectivamente. Já em E, F, G e H a soldagem utilizou o MIG/MAG CC com amplitudes de 14, 13, 12 e 11 mm.

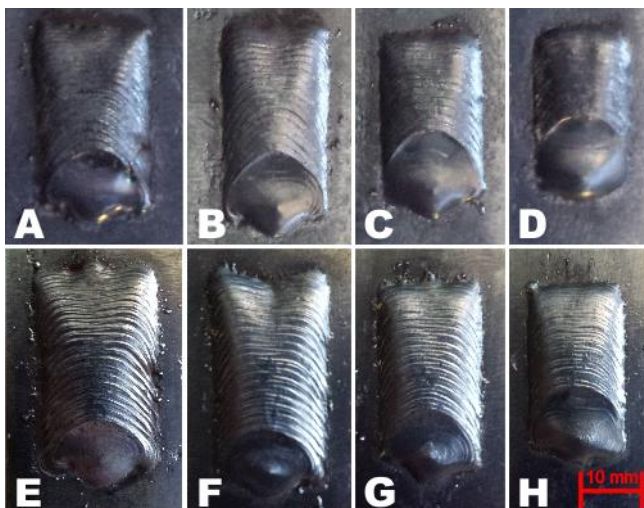


Figura 4.24. Cordões no MIG CA e MIG CC



Os resultados, Tabela 4.9, mostram que para o MIG/MAG CC o aumento médio da largura do cordão em relação à largura da amplitude foi de 4,85 mm, enquanto no MIG/MAG CA foi de 4,57 mm. Mesmo fundindo menos material por área, em virtude da diferença das velocidades de soldagem, o MIG/MAG CC apresentou cordões mais largos, ou seja, apresenta maior molhabilidade.

Isto já era esperado uma vez que a polaridade tem efeito marcante nas características geométricas do cordão. É notável a diferença de geometria e tamanho da zona fundida de um cordão de solda realizado com CC+ para um realizado nas mesmas condições no CC-. A polaridade positiva resulta em um cordão com mais penetração e molhabilidade, que o cordão realizado nas mesmas condições com polaridade negativa [79].

Mesmo havendo apenas 20% de polaridade negativa, isto já interfere significativamente nas características geométricas dos cordões. No CC+ a gota é destacada em uma condição superaquecida e quando projetada para poça contribui para o aumento de fusão. Já no CC- o arco fica ancorado mais acima, envolvendo uma porção maior do arame aproveitando mais a energia para fusão do mesmo [79, 80]. Deste modo, supõe-se que a gota tenha uma quantidade menor de calor, fato que contribui para a menor molhabilidade do MIG/MAG CA.

Tabela 4.9. Largura dos cordões com MIG CA e MIG CC

Processo	Cordão	Largura da Amplitude (mm)	Largura do Cordão (mm)
MIG CA	A	14	18,4
	B	13	17,4
	C	12	16,6
	D	11	15,9
MIG CC	E	14	18,6
	F	13	17,7
	G	12	16,9
	H	11	16,2

Embora os cordões no MIG/MAG CA tenham apresentando acabamento similar ao MIG/MAG CC, a velocidade máxima de

soldagem atingida, mantendo-se a uniformidade do cordão, foi 20% menor do que no CC. Isto implica em maior tempo para o revestimento de uma área e, conseqüentemente, menor produtividade. Em virtude disto, novos ensaios foram realizados com o MIG/MAG CA com o intuito de atingir uma taxa de deposição por área similar à alcançada com o MIG/MAG CC.

Basicamente os parâmetros foram os mesmos da Tabela 4.8, alterando-se apenas a velocidade de soldagem, conforme Tabela 4.10. A referida tabela apresenta também as relações entre a largura da amplitude e a largura do cordão

Tabela 4.10. Análise da largura dos cordões no processo MIG/MAG CA

Cordão	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Velocidade de Arame (m/min)	Largura da Amplitude (mm)	Largura do Cordão (mm)
A	40	10,0	11	14,2
B	40	10,0	12	15,3
C	40	10,0	14	17,9
D	40	11,0	14	18,2
E	40	12,0	14	18,3

A Figura 4.25 apresenta o aspecto visual dos cordões efetuados empregando o MIG/MAG CA com velocidade de soldagem de 40 cm/min. No ensaio A, o cordão apresentou um aspecto satisfatório e sem falhas, como por exemplo, falta de fusão ou mordeduras. Com o aumento da amplitude de oscilação, amostras B e C, nota-se o aparecimento de regiões com falta de material e descontinuidades que inviabilizam o emprego destes cordões em um revestimento.

Como possível solução, novos ensaios foram feitos com velocidade de alimentação de arame mais elevadas, sendo que em D foi empregado 11 m/min e em E 12 m/min. O intuito foi, mesmo com taxa de deposição mais alta, atingir um cordão sem descontinuidades com a mesma velocidade alcançada no MIG/MAG CC. O problema de preenchimento dos cordões foi reduzido, entretanto, ainda há regiões que apresentam falta de material.

Com o aumento da amplitude de oscilação há também elevação da velocidade da tocha, uma vez que a deslocamento transversal deve ser realizado no mesmo tempo só que em um comprimento maior. Ao mesmo tempo, no MIG/MAG CA tem-se uma poça menor e menos aquecimento, o que gera menor molhabilidade e solidificação mais rápida do material de adição. Somando as características inerentes ao MIG/MAG CA com as altas velocidades de oscilação da tocha, as quais proporcionam menor aquecimento da peça, é gerada uma situação onde o material de adição não consegue preencher todo o cordão de forma homogênea antes da solidificação.

Desta forma, com o MIG/MAG CC, quando comparado com o MIG/MAG CA, é possível atingir maior velocidade de soldagem, com uma mesma velocidade de alimentação de arame, para amplitudes de oscilação acima de 12 mm. Isto reduz o tempo total de revestimento de uma determinada área, bem como proporciona menor adição de material por unidade de área.

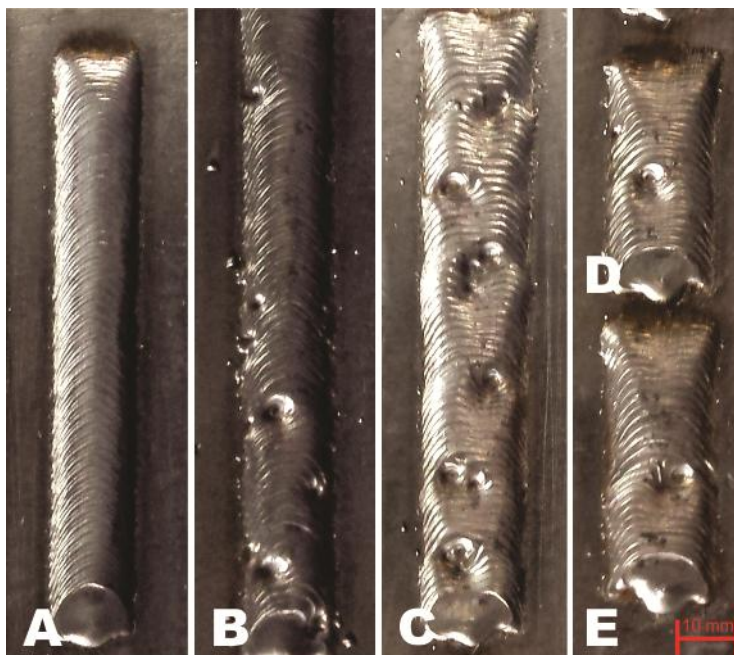


Figura 4.25. Cordões no MIG CA com diferentes amplitudes de oscilação

## 5. PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO SISTEMA ROBÓTICO

A tarefa de revestimento de tubos de caldeiras de usinas termelétricas de forma automatizada apresenta uma série de desafios a serem superados. Estes estão relacionados tanto com aspectos de procedimentos de soldagem, como tecnologias para a automatização e controle da execução da tarefa. No presente capítulo, descreve-se o equipamento e sua construção.

Os requisitos estipulados para o sistema robótico foram obtidos a partir das características da superfície a ser revestidas e dos resultados obtidos nos ensaios preliminares de soldagem, os quais nortearam o desenvolvimento do novo equipamento e dos procedimentos para o revestimento dos tubos de caldeiras.

### 5.1. Requisitos do Sistema Robótico

Para a concepção do novo equipamento foi estudada a operação que o mesmo irá realizar e feito uma análise dos resultados já alcançados pela equipe do LABSOLDA na presente área de aplicação, principalmente com os resultados atingindo pelo TARTÍLOPE V4.

O TARTÍLOPE V4, conforme apresentado na Figura 2.3, é um manipulador com quatro graus de liberdade, dos quais três juntas prismáticas e uma rotacional. O referido equipamento foi desenvolvido no âmbito de uma dissertação [24], e tem como principais aplicações à soldagem orbital de união de dutos e o revestimento de tubos de parede de caldeiras de usinas termelétricas. Todavia, com o avanço das pesquisas em procedimentos de soldagem, o TARTÍLOPE V4, mesmo apresentando um funcionamento adequado e confiável, apresentou limitações em seu curso e velocidades de deslocamento, quando aplicado no revestimento de painéis tubulares, a saber:

- Junta prismática Y: curso máximo de 120 mm e velocidade de deslocamento de 6,0 m/min;
- Junta prismática Z: curso máximo de 40 mm e velocidade de deslocamento de 6,0 m/min;
- Junta rotacional A: curso máximo de 180° e velocidade de deslocamento de 30°/s.

Tais limitações de velocidade são decorrentes da tecnologia de acionamento empregada, já com relação aos cursos das juntas a

limitação é decorrente da necessidade do equipamento ser compacto para a soldagem orbital. Assim, alterações nestas características causariam impactos nas dimensões do equipamento, gerando dificuldades para a soldagem orbital. Neste contexto, optou-se por manter o TARTÍLOPE V4 com suas características e, com base nos resultados alcançados com o mesmo, desenvolver um novo manipulador destinado especificamente para o revestimento de tubos de caldeiras de usinas termelétricas, o qual foi denominado TARTÍLOPE VX, cujo modelo proposto é apresentado na Figura 5.1 e a função de suas juntas apresentadas abaixo.

- Junta prismática X: realiza o deslocamento no sentido da soldagem com a velocidade especificada;
- Junta prismática Y: responsável pela oscilação da tocha;
- Junta prismática Z: oscilação da tocha e ajuste da DBCP;
- Junta rotacional A: deslocamento angular em torno da junta prismática X, com o objetivo de definir o ângulo entre a tocha de soldagem e a superfície da peça a ser soldada, bem como realizar oscilação pendular.

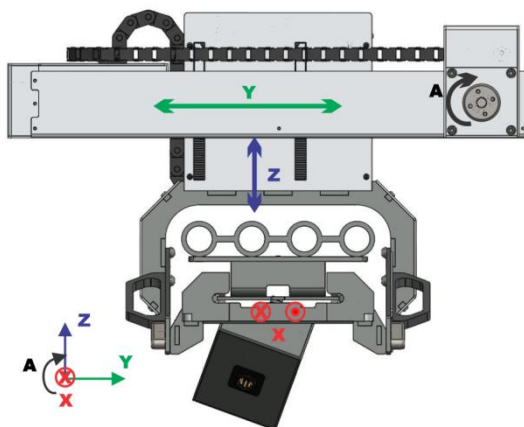


Figura 5.1. Modelo do sistema proposto

O processo de revestimento de tubos foi observado de uma forma global, envolvendo os pesquisadores do LABSOLDA e funcionários da TRACTEBEL Energia. Com isto, buscou-se o maior número possível de informações, a fim de elaborar uma lista de requisitos para orientar a escolha dos componentes do sistema. Os principais itens da referida lista são apresentados a seguir.

- Interpolação entre quatro eixos de deslocamento: A interpolação de quatro eixos de movimento se faz necessária devido à forma cilíndrica dos tubos que constituem as paredes da caldeira. Sendo assim, durante a realização de um cordão de solda tem-se a execução de trajetórias no espaço XYZ e ainda a possibilidade de alteração do ângulo de ataque da tocha;

- Curso da junta prismática X: é a junta responsável pelo deslocamento no sentido longitudinal do cordão. É interessante que seu curso seja o maior possível, pois viabiliza a execução de cordões de solda por longa distância. Com a possibilidade de se realizar a soldagem por um longo comprimento tem-se uma redução dos tempos mortos para o reposicionamento do robô. Embora paredes de caldeiras tenham até 40 m de altura, o revestimento será realizado em tubos novos em oficina, onde as paredes apresentam entre 3 e 6 m. Logo, é fundamental que a referida junta seja constituída por um trilho com possibilidade de ser fabricado em distintos comprimentos;

- Velocidade de deslocamento junta prismática X: comumente as velocidades envolvidas em operações de soldagem, com o processo MIG/MAG, ficam abaixo de 1,0 m/min. Analisando somente o aspecto da soldagem, tal valor de velocidade de deslocamento supriria as necessidades para o revestimento dos tubos. Contudo, é importante que seja considerado também o tempo gasto para o reposicionamento do robô para a realização de um novo cordão, uma vez que a soldagem será apenas na vertical descendente. Tomando como base o comprimento de 6,0 m da junta prismática X na situação de revestimento de tubos novos em oficina, para uma velocidade de deslocamento de 1,0 m/min o robô levaria 6 min para o reposicionamento. Este tempo é elevado e reduz significativamente a produtividade. Assim, considera-se que o tempo máximo aceitável para o reposicionamento do robô seja de 30 s. Logo, é necessário que a velocidade de deslocamento da junta prismática X seja de 12,0 m/min;

- Curso da junta prismática Y: a referida junta tem a função de efetuar a oscilação da tocha durante a soldagem, bem como posicioná-la para a execução do cordão. Desta forma, esta junta deve ter um curso mínimo que possibilite o revestimento de um painel padrão composto por quatro tubos e três membranas. Com isto, o tempo total gasto na operação é reduzido, pois se diminui a quantidade de reposicionamento do trilho (junta prismática X) do equipamento. Com base nesta condição e considerando os ângulos de ataque da tocha nas extremidades do painel, o curso mínimo é de 360 mm. Para se ter uma margem de segurança no deslocamento foi definido um curso mínimo de 410 mm.

- Velocidade da junta prismática Y: para definir o requisito de velocidade da junta Y é preciso analisar as características pertinentes ao processo MIG/MAG. Assim, a amplitude considerada foi de 14 mm. Este valor foi definido tendo como base os resultados alcançados nos ensaios preliminares. Como a frequência de oscilação foi de 6 Hz, o período de oscilação foi de 0,167 s.

Tem-se que em cada período de oscilação ( $T_t$ ) a junta percorre um comprimento de duas vezes a amplitude ( $A_t$ ). Logo a velocidade de junta Y ( $V_y$ ) é definida por eq 5.1.

$$V_y = \frac{2A_t}{T_t} \quad (\text{eq 5.1})$$

Assim, a partir de eq 5.1 é apresentada a seguir a velocidade desejada da junta Y na soldagem com o processo MIG/MAG. Em eq 5.3 é definido o requisito de velocidade para a junta prismática Y.

$$V_y = \frac{2 \times 14}{0,167} \quad (\text{eq 5.2})$$

$$V_y = 167,7 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cong 10,00 \frac{\text{m}}{\text{min}} \quad (\text{eq 5.3})$$

- Curso da junta prismática Z: esta junta tem a função de regular a DBCP nas distintas posições de soldagem. A Figura 5.2 apresenta as situações limites de deslocamento da junta prismática Z. Na posição A a junta encontra-se na posição mais afastada e em B na mais recolhida. Considerando estas duas situações o curso mínimo requerido pela junta Z é de 55 mm. Contudo, para fins de projeto, foi definido um curso de 90 mm.

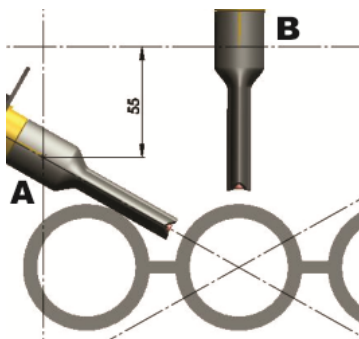


Figura 5.2. Curso da junta prismática Z

- Velocidade da junta prismática Z: em virtude da curvatura da superfície a ser revestida, existe a proposta de execução de oscilação tridimensional. Tal oscilação visa um movimento simultâneo da tocha de soldagem nos eixos Y e Z. Com isto tem-se a perspectiva de deixar a DBCP constante para que a estabilidade do arco elétrico seja mantida. Para possibilitar a oscilação tridimensional, as características dinâmicas da junta prismática Z devem ser similares às da junta prismática Y. Assim, o requisito de velocidade da junta prismática Z é de 10,00 m/min.

- Velocidade da junta rotacional A: com a possibilidade de aplicar oscilação pendular da tocha durante o revestimento, foi definida uma velocidade mínima de rotação para a junta A, a qual é de 60 °/s.

- Suavidade de movimento: vibrações no arco elétrico geram instabilidade no procedimento de soldagem e conseqüentemente podem causar problemas nos cordões realizados. Neste aspecto, principalmente o software de controle de movimento deverá apresentar curvas de acelerações e desacelerações que propiciem a menor quantidade possível de vibrações na tocha. O tempo de tais rampas considerará os valores máximos de frequência de oscilação (6 Hz). Desta forma, as mesmas deverão apresentar um tempo máximo de 20 ms.

- Estrutura: a mecânica do equipamento deve apresentar rigidez para suportar as altas frequências de oscilação que serão empregadas durante a soldagem com o processo MIG/MAG. O equipamento tem que tolerar eventuais respingos de solda, bem como altas temperaturas, as quais são geradas a partir do arco elétrico.

- Compacticidade: o equipamento deve ser compacto, com um peso máximo de 25 kg. As dimensões do manipulador devem estar dentro de 450 mm x 450 mm x 350 mm (comprimento x largura x altura), visando facilitar seu manuseio, considerando os ambientes confinados e de difícil acesso do interior das caldeiras, onde o mesmo também pode ser empregado. Estas limitações de peso e dimensões não consideram o trilho que constitui a junta prismática X.

- Solicitação de carga: a solicitação de carga decorrente da interação do equipamento com o meio de trabalho pode ser considerada nula. Isto porque não há contato entre a tocha de soldagem e a região onde se efetua o revestimento. A solicitação de carga das juntas Z, Y e A está relacionada somente com o peso da tocha de soldagem, ficando entre 0,5 e 1,5 kg. A junta que possui maior solicitação de carga é a junta prismática X. Esta deve deslocar todo o equipamento, o qual terá peso de aproximadamente 25 kg.



- Software de controle de movimento: dentre as características desejadas para o software de controle de movimento tem-se:
  - Controlar posição de até 4 eixos;
  - Atuar nas variáveis de movimento em tempo real: velocidade de soldagem (eixo X), amplitude de oscilação (eixo Y e Z), frequência de oscilação (eixo Y e Z), linha de simetria da oscilação (eixo Y e Z) e posição e velocidade angular (eixo A);
  - Integração com a fonte de soldagem: sinal de comando para disparo da fonte de soldagem e disparo do movimento por comando externo;
  - Joystick robusto para correções em tempo real;
  - Sistema de controle com tecnologia própria visando o pleno domínio para alterações e atualizações;
  - Módulo de interface com usuário robusto e intuitivo com o objetivo de redução do tempo de parametrização e facilidade de operação do equipamento.

## 5.2. Concepção do Sistema Robótico

Sistemas posicionadores de máquinas automatizadas são compostos, em geral, por quatro subsistemas, Figura 5.3, e que operam de modo integrado: subsistema de comando/controle, subsistema de acionamento, subsistema mecânico e subsistema de medição [99].

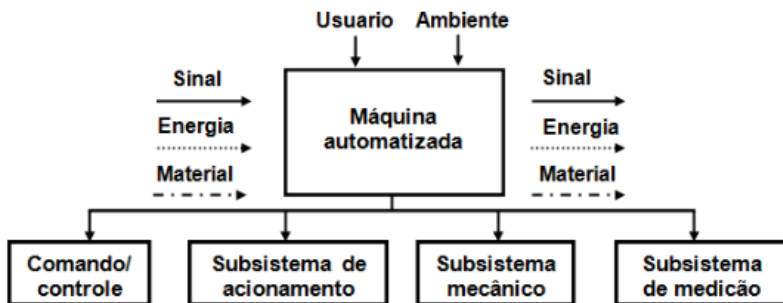


Figura 5.3. Subsistemas que compõem uma máquina automatizada

Nesta divisão, o subsistema de comando/controle envia sinais elétricos a um subsistema de acionamento, o qual, por meio das grandezas do subsistema mecânico, converte o movimento rotativo em translativo. Tais movimentos são medidos e/ou monitorados pelo

subsistema de medição, que realimenta esta informação ao subsistema de comando/controle.

Com base nos requisitos apresentados e na divisão em subsistemas, foram analisadas concepções distintas de projetos, as quais empregam diferentes tecnologias de software de controle (subsistema de comando/controle), acionamento (subsistema de acionamento), transmissão de movimento (subsistema mecânico) e sensores (subsistema de medição). Tal análise é fundamental no desenvolvimento do projeto, pois erros cometidos nas etapas de dimensionamento e escolhas de componentes são as que acarretam maiores custos e tempo para reparo caso tenha-se problemas no produto final.

O primeiro aspecto a ter as possibilidades levantadas foi o software de controle de movimento. Analisou-se principalmente se os mesmos preenchiam, ou teriam a possibilidade de preencher, o requisito de interpolação entre quatro eixos de movimento. Falhas na interpolação podem causar danos na peça. Este é ponto crucial para não se empregar um CLP, dado que o mesmo não possibilita a interpolação entre os eixos.

Quanto ao motor a ser utilizado, mesmo com o requisito de suavidade de movimento, o motor de passo foi considerado. Isto porque, com o avanço dos drivers de acionamento deste tipo de motor, já se consegue características aceitáveis para os equipamentos destinados a soldagem. Como outras alternativas têm-se o Servo Motor CC, com e sem escovas, e o Servo Motor CA. Consequentemente, as opções de servo drivers analisadas estão relacionadas com o tipo de motor.

Com relação à transmissão de movimento, é importante que a mesma apresente os requisitos de resolução e suavidade. O sistema deve suportar temperaturas de operação de até 80°C em virtude da proximidade do arco elétrico. Adicionalmente, deve tolerar gases e o pó proveniente dos resíduos gerados na queima do carvão. Em contrapartida, a tolerância a eventuais respingos de solda não é fundamental, pois o sistema de transmissão deverá estar protegido por anteparos adicionais.

No contexto dos sensores de fins-de-curso, não é apresentado nenhum requisito sobre qual tecnologia deva ser aplicada, logo se pesquisou quatro distintas, com intuito definir a mais adequada.

Desta forma, tendo como base os requisitos de protejo apresentados anteriormente, elaborou-se uma matriz com as possíveis soluções de serem aplicadas no projeto em questão, Tabela 5.1. Com a construção de tal tabela partiu-se para a avaliação de cada requisito, os quais são descritos a seguir.

Tabela 5.1. Matriz morfológica

<b>Busca de Soluções para o Sistema Robótico</b>				
<b>Parâmetros</b>	<b>Conjunto 1</b>	<b>Conjunto 2</b>	<b>Conjunto 3</b>	<b>Conjunto 4</b>
Controlador	Mach 3	Software TARTÍLO PE V2	Novo Software	DeskCNC
Motor	Servo Motor CC com escovas	Motor de Passo	Servo Motor CA	Servo Motor CC sem escovas
Driver	R2010	STR-8	MINAS A4	GRANITE ARGON
Transmissão de movimento	Pinhão – Cremalheira	Fuso de Esfera	Polia - Correia	Coroa – Sem fim
Sensores (homes e fins-de-curso)	Indutivo	Magnético	Mecânico	Capacitivo

#### 4.2.1 Controlador

Em um sistema de controle encontram-se uma vasta gama de parâmetros que devem ser analisados na escolha da melhor opção. A partir dos requisitos do projeto, as três possibilidades apresentadas anteriormente foram avaliadas.

Controladores comerciais geralmente não possibilitam a construção de rotinas específicas destinadas à tarefa de soldagem. Este fato, na maioria dos casos, inviabiliza que softwares comerciais sejam empregados para o controle de sistemas dedicados à automação da soldagem, tornando inviável o emprego do Mach 3 ou do DeskCNC.

Com relação ao software do TARTÍLOPE V2, devido à forma com que foi desenvolvido, sua programação ficou extensa e de difícil legibilidade. Tal fato, torna complexo a implementação de novas rotinas.

Embora seja um sistema confiável, possui limitações na geração de suas trajetórias de movimentação, principalmente com relação à velocidade máxima de deslocamento. Além disto, o sistema opera em malha aberta, o que não garante a realização correta do movimento.

Por fim, o sistema está totalmente centralizado em um PC104, sem que haja uma separação entre as funções de interface com o

usuário, geração das trajetórias e controle do movimento. Isto gera um software sem estruturação adequada, dificultando a diferenciação das funcionalidades e com isto a edição de novos algoritmos. Em virtude destas constatações, foi considerado inviável o emprego do sistema de controle do TARTÍLOPE V2 como base para o sistema de controle do novo manipulador robótico.

A última possibilidade analisada foi o desenvolvimento de hardware e software novos que atendessem os requisitos do projeto. Em tal alternativa passaria a ser possível a construção de um software estruturado e com viabilidade de expansão em virtude dos avanços em tecnologias de soldagem. Por esta questão de adequação aos requisitos deste novo projeto, esta alternativa foi selecionada para ser aplicada no controle do sistema robótico proposto.

Este estudo de viabilidade considerou características necessárias para a realização da tarefa e atribui notas de zero a dez para cada uma das possíveis soluções, Tabela 5.2, sendo que aquela com somatório de notas mais alto é a alternativa mais adequada.

Tabela 5.2. Matriz de avaliação do controlador

<b>Avaliação do Parâmetro Controlador</b>				
<b>Características</b>	<b>Mach 3</b>	<b>Software TARTÍLOPE V2</b>	<b>Novo Software</b>	<b>DeskCNC</b>
Controle de quatro eixos	10	6	10	10
Tempo de desenvolvimento	9	6	6	8
Correção da trajetória	6	9	9	3
Flexibilidade para inserção de novas funções	7	9	10	4
Interface para soldagem	8	10	10	3
<b>Total</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>28</b>

### 4.2.2 Acionamento

Como já foi dito, a expectativa é operar com procedimentos de soldagem com elevada produtividade. Em consequência disto, é fundamental que o sistema robótico tenha maiores velocidade de soldagem e também maior rigidez mecânica.

Neste contexto, com o objetivo de obter-se a melhor opção de acionamento, buscou-se elementos que sigam ao máximo algumas exigências solicitadas para ter-se um sistema de avanço com qualidade, a saber:

- Constância de velocidade: gera um movimento sem vibrações na tocha, o que contribui para a qualidade do cordão;

- Baixa inércia e alta dinâmica sem overshoot: são ideais para alcançar maiores velocidade de deslocamento, possibilitando elevada frequência de oscilação e redução do tempo de reposicionamento;

- Alta capacidade de sobre carga: garante que mesmo havendo certa adição de carga, independente da origem, durante a realização de um cordão de solda, o sistema finalizará o mesmo. Isto é fundamental, uma vez que o retrabalho em um cordão danificado é demorado.

Dentre as alternativas apresentadas para o acionamento, a primeira a ser analisada, de acordo com as notas recebidas na Tabela 5.3, foi a executada com motor de passo. Este tipo de motor é utilizado nos equipamentos do LABSOLDA e atende os requisitos dinâmicos do projeto relacionados às juntas X e A. Logo, foi selecionada para estas duas juntas, mesmo apresentado as piores características, contudo seu custo é o mais baixo. Entretanto, quando analisadas as juntas Y e Z, responsáveis pela oscilação da tocha, o mesmo foi considerado inadequado por não atingir as velocidades desejadas.

A segunda tecnologia avaliada foi a de servo motor CC com escovas. Este motor também atende as especificações dinâmicas desejadas para o projeto. Contudo, esta tecnologia não foi selecionada em virtude da necessidade de manutenção das escovas do motor.

Por fim, foram analisados os acinamentos com servo motor CC sem escovas e servo motor CA, os quais atendem os requisitos dinâmicos, operam em malha fechada e apresentam menor índice de manutenção. Em virtude da experiência previa com servo motor CA, esta foi a opção selecionada para o acionamento das juntas Y e Z.

Tabela 5.3. Matriz de avaliação do acionamento

<b>Avaliação do Parâmetro Acionamento</b>				
<b>Características</b>	<b>Servo Motor CC com escovas</b>	<b>Motor de Passo</b>	<b>Servo Motor CA</b>	<b>Servo Motor CC sem escovas</b>
Baixa inércia	7	6	9	9
Capacidade de sobrecarga	8	7	10	9
Alta dinâmica sem overshoot	8	7	9	10
Constância de velocidade	9	8	10	10
Resolução de posicionamento	9	7	10	10
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>35</b>	<b>48</b>	<b>48</b>

### 4.2.3 Transmissão de Movimento

Com o intuito de definir os componentes da estrutura mecânica, foram elaboradas alternativas para a transmissão do movimento. Aqui se levou em consideração os requisitos de: resolução de posicionamento, tolerância a agentes externos e solicitação de cargas. Em virtude das juntas do sistema robótico possuírem característica distintas foram separadas em dois grupos para um estudo preliminar.

O primeiro grupo é constituído pelas juntas prismáticas Y e Z. Sendo que as alternativas consideradas foram: cremalheira-pinhão e fuso de esferas recirculantes. Os sistemas desenvolvidos anteriormente pelo LABSOLDA empregam sistema de transmissão com uma cremalheira acoplada em uma guia linear e um pinhão na saída do eixo do motor, Figura 5.4A. Adicionalmente, tem-se um patins fixo na estrutura do manipulador, o qual dá suporte para a guia linear. Entretanto, nota-se que a rigidez do patins não é suficiente para suportar os momentos

gerados durante o deslocamento da junta prismática. Neste contexto, tal alternativa foi descartada para o uso no projeto.

A outra possibilidade analisada foi a transmissão por intermédio de um fuso de esfera. Esta alternativa viabiliza o emprego de duas guias lineares com dois patins, fato que proporcionará maior rigidez mecânica ao sistema. Adicionalmente, nesta concepção as guias são fixadas à estrutura do manipulador e os patins se deslocam paralelamente ao fuso de esferas recirculantes, Figura 5.4B. Assim, há maior robustez mecânica e elevação da repetitividade na execução das trajetórias programadas. Tais fatos determinaram a seleção desta tecnologia de transmissão de movimento para o projeto.

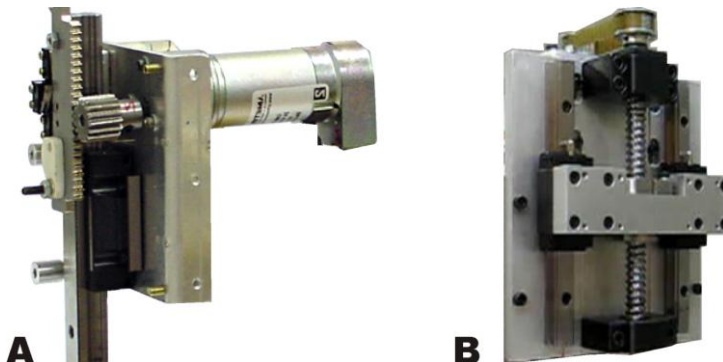


Figura 5.4. Em (A) transmissão de movimento por intermédio de pinhão cremalheira e em (B) por fuso de esferas recirculantes

O segundo grupo de juntas é formado pela junta rotacional A, a qual é responsável pela definição do ângulo de ataque da tocha de soldagem. Como alternativas de tecnologias para a transmissão de movimento nesta junta foram estudadas coroa/sem-fim e polia-correia.

O sistema de transmissão com coroa/sem-fim vem sendo usado constantemente nos projeto de sistemas robótico do LABSOLDA. Todavia, neste sistema o motor responsável pelo acionamento da junta deve ficar próximo à mesma, conforme destacado na Figura 5.5A. Além disto, ocorrem problemas de alinhamentos entre a coroa e o sem fim, o que ocasiona aparecimento de folgas.

Contudo, com o emprego da transmissão por polia-correia, o momento de torção sobre o manipulador é reduzido e os problemas de alinhamento eliminados, Figura 5.4B. Desta forma, a alternativa selecionada para a transmissão de movimento na junta rotacional A foi a

que emprega polia-correia. A avaliação de cada sistema de transmissão, considerando distintas características, é apresentada na Tabela 5.4.

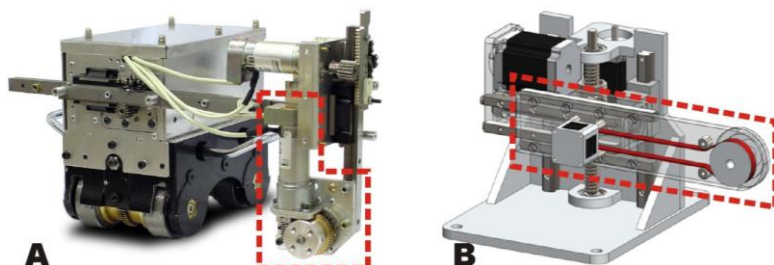


Figura 5.5. Junta rotacional A. Em (A) transmissão por coroa/sem-fim e em (B) polia-correia

Tabela 5.4. Matriz de avaliação da transmissão de movimento

<b>Avaliação do Parâmetro Transmissão de Movimento</b>				
<b>Características</b>	<b>Pinhão – Cremalheira</b>	<b>Fuso de Esfera</b>	<b>Polia - Correia</b>	<b>Coroa – Sem fim</b>
Rigidez	8	9	9	8
Resolução	7	10	9	8
Atrito	7	9	9	7
Vibrações	8	9	10	7
Massa translativa	7	8	9	9
Total	37	45	46	39

#### 4.2.4 Sensores

Os sensores constituem o circuito lógico de intertravamento, o qual atua para evitar colisões do robô. Deste modo, caso alguma das juntas seja programada para realizar uma trajetória fora de seu espaço de trabalho os sensores de fim-de-curso serão acionados. Como consequência o sistema será desligado e é indicado um sinal de erro.

Como possíveis soluções de sensores, foram analisadas três tecnologias distintas, a saber: sensor mecânico, sensor indutivo e sensor magnético. Em virtude do ambiente de trabalho e das interferências geradas pelos processos de soldagem a serem empregados, as tecnologias de sensores indutivos e magnéticos foram descartadas.



Logo, a alternativa escolhida foi o sensor mecânico. A Tabela 5.5 traz a avaliação de cada um dos sensores.

Tabela 5.5. Matriz de avaliação do sensoriamento

<b>Avaliação do Parâmetro Sensoriamento</b>				
<b>Características</b>	<b>Indutivo</b>	<b>Magnético</b>	<b>Mecânico</b>	<b>Capacitivo</b>
Robustez	8	9	9	8
Adequação à soldagem	7	6	9	7
Incerteza	8	8	8	8
Total	23	23	26	23

### 5.3. Esquema Funcional

Para nortear o desenvolvimento do projeto, foi elaborado um esquema funcional, Figura 5.6, que ilustra a integração entre as partes do sistema robótico. A referida figura apresenta os cinco elementos principais envolvidos na operação de revestimento, sendo: operador, painel elétrico de comando, controle remoto, fonte de soldagem e o manipulador robótico.

O operador tem dois modos para utilizar o equipamento, estes estão descritos pelas setas azuis. No primeiro método de interação é possível programar todas as variáveis, sendo efetuada por intermédio de uma IHM com interface gráfica dedicada à operação de soldagem.

Já no segundo, tem-se a disposição um controle que permite alterar alguns parâmetros de deslocamento (velocidade de soldagem, amplitude e frequência de oscilação). Todavia, o principal objetivo deste controle remoto é acompanhar o soldador durante a operação de revestimento possibilitando uma eventual correção manual de trajetória.

Toda a parte de controle de movimento e de acionamento de periféricos fica concentrada em um controlador, o qual envia e recebe informações da IHM, dos drivers de acionamento dos motores e das placas auxiliares para sinais de Entrada/Saída. Todas estas comunicações, entre as partes de controle do sistema robótico, são representadas por setas em amarelo.

As linhas em vermelho ilustram a interação do painel elétrico de comando com a fonte de soldagem, bem como da fonte de soldagem

com a tocha propriamente dita. Em virtude desta comunicação será viável que a fonte de soldagem seja disparada de modo automático.

Por fim, as setas em verde representam os sinais relacionados com os servo motores e sensores fim-de-curso. Na comunicação com as placas auxiliares de sinais de E/S tem-se sinais provenientes dos sensores de fim-de-curso, os quais atuam com o objetivo de evitar colisões e danos na estrutura mecânica do robô. Já no contexto da comunicação de acionamento tem-se os sinais enviados pelos servo drivers aos servo motores. Os sinais são transmitidos na forma de trem de pulsos, sendo assim, aumentando-se sua frequência eleva-se a rotação do motor e vice-versa. Adicionalmente, existem os sinais de realimentação enviados pelo encoder para os servo drivers, pelo meio dos quais é fechada a malha de controle do sistema. Aqui o servo driver compara o sinal que envia com a resposta que recebe, aumentando ou diminuindo a corrente para o motor conforme as diferentes solicitações de carga exigidas no decorrer do deslocamento. Também controla o erro de seguimento para que se o mesmo ultrapassar o valor previamente programado seja disparado um sinal de emergência.

De forma geral, o funcionamento básico do sistema pode ser descrito da seguinte forma: ao ser ligado o circuito lógico de intertravamento verifica todos os sensores de fim-de-curso, bem como os servo drivers. Caso haja algum problema é disparado o sinal de parada de emergência. Estando o sistema estável, o operador pode iniciar a programação do robô. Após programar todas as variáveis de deslocamento de tocha, as instruções são enviadas ao controlador e para iniciar a tarefa de revestimento o sistema fica no aguardo de um sinal de início, o qual deve ser dado pelo operador. Com a habilitação para o início do revestimento o controlador dispara a fonte de soldagem e inicia a execução da trajetória. Durante a realização da soldagem o operador pode corrigir a trajetória via controle remoto e caso verifique alguma inconformidade, pode acionar um botão de parada de emergência que desliga o robô e a fonte de soldagem. Paralelamente, se houver o acionamento de algum sensor fim-de-curso o robô e a fonte de soldagem são desligados. O desligamento de ambos os equipamentos é importante para que a possibilidade de danos ao material de base seja reduzida. Caso nenhum problema ocorra, ao final da execução da trajetória o controlador desliga a fonte de soldagem, bem como reposiciona o robô para a realização de um novo cordão de solda.

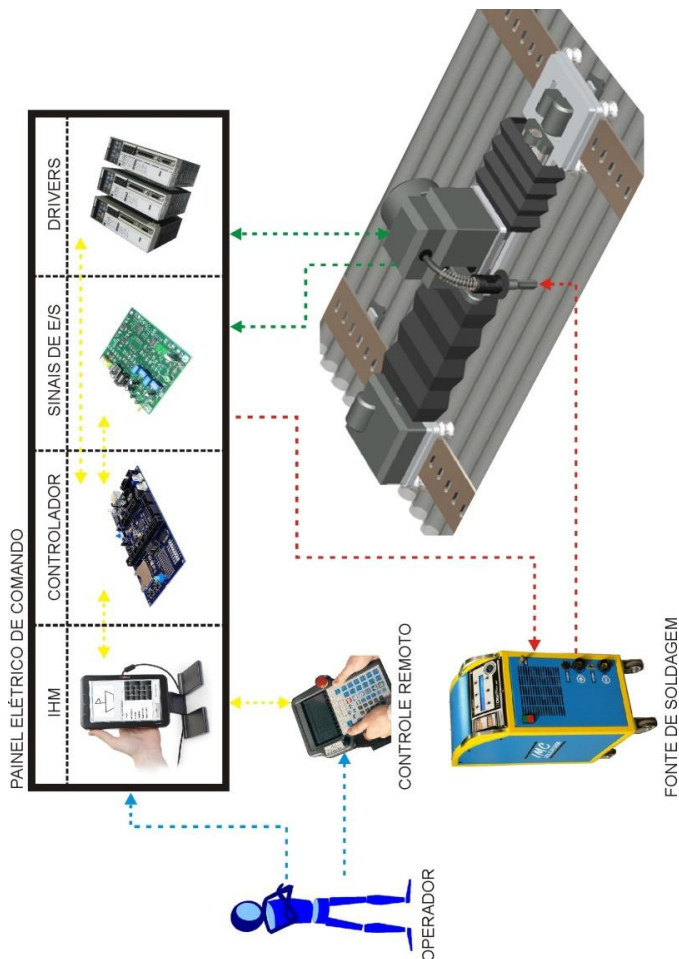


Figura 5.6. Esquema funcional do sistema robótico para o revestimento de tubos de caldeiras de usinas termelétricas

## 5.4. Detalhamento do Projeto do Robô

### 5.4.1. Desenvolvimento Mecânico do Manipulador para Revestimento de Tubos de Caldeiras – TARTÍLOPE VX

O LABSOLDA já desenvolveu e aplicou um sistema, TARTÍLOPE V4, destinado ao revestimento de tubos de caldeiras de usinas termelétricas [24, 29, 81, 82]. Entretanto, em decorrência dos avanços atingidos em novos procedimentos de soldagem com elevadas

velocidades de deslocamento da tocha, o TARTÍLPE V4 não supri os requisitos dinâmicos para o emprego dos procedimentos. Isto porque os procedimentos de soldagem estão em constante redescobrimto, exigindo dos sistemas automáticos uma constante evolução, principalmente no que concerne às suas trajetórias e respectivas dinâmicas. Logo, novos procedimentos possuem exigências dos sistemas automáticos de soldagem que anteriormente não eram necessárias. Assim, na busca pelo melhor procedimento para uma aplicação, surge à necessidade da conjugação das citadas exigências com as propriedades dos sistemas de automatização a serem utilizados.

Em virtude disto e com base nos requisitos apresentados anteriormente foi desenvolvido, neste trabalho, o TARTÍLOPE VX. Este sistema atende aos requisitos de velocidade e acelerações, bem como as outras exigências da tarefa de revestimento de tubos de caldeira. Isto faz com que o equipamento seja mais robusto, pois não é necessário que atenda especificações de outras tarefas de soldagem.

A primeira junta do sistema é a X, a qual é responsável pelo deslocamento no sentido longitudinal de soldagem. Esta é constituída por um motor de passo, NEMA 23, e um sistema de redução com coroa e sem fim, atingindo velocidade máxima de 13 m/min. Seu curso é dependente do comprimento do trilho, o qual para a aplicação em questão será de 3 ou 6 m. Para o deslocamento mais adequado no trilho, possui rolamentos laterais e inferiores para a redução do atrito, Figura 5.7.

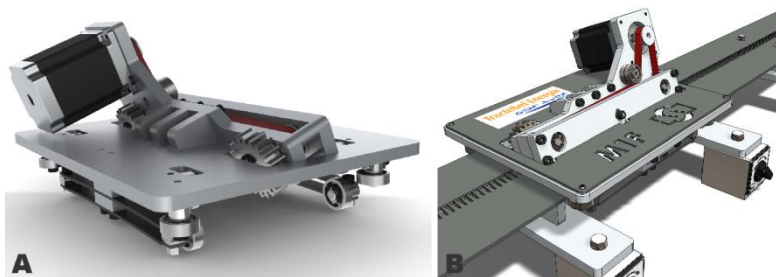


Figura 5.7. Junta Prismática X

A Figura 5.8 trás o módulo destinado ao deslocamento da junta prismática Z, responsável pelo ajuste da DBCP e com participação na oscilação quando o ângulo de ataque da tocha for diferente de  $0^\circ$ . Neste módulo é empregado um servo motor CA [83], guias prismáticas e um fuso de esfera para a transmissão do movimento. Esta junta apresenta com curso de 100 mm e velocidade de 15 m/min.

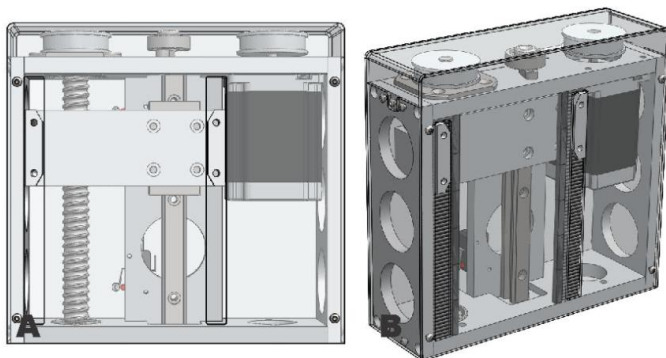


Figura 5.8. Junta Prismática Z

A junta prismática Y, Figura 5.9, tem a finalidade de fazer o movimento de oscilação transversal da tocha com o intuito de aumentar a largura dos cordões. Esta é formada por um fuso de esferas, guias prismáticas e sistemas de correia e polia sincronizadora para a transmissão do movimento. O sistema de acionamento é constituído por um servo motor CA, o qual apresenta um torque constante de 1,3 Nm e pico de 3,8 Nm para velocidades de 0 a 3000 rpm [83]. Em virtude desta junta ser a que necessita de maiores velocidades e acelerações, bem como será a mais exigida durante a soldagem, considerou-se adequado trabalhar com um sistema de malha fechada de controle, por isto a escolha pelo servo motor CA. O curso da referida junta é de 420 mm e a velocidade máxima é de 15 m/min.

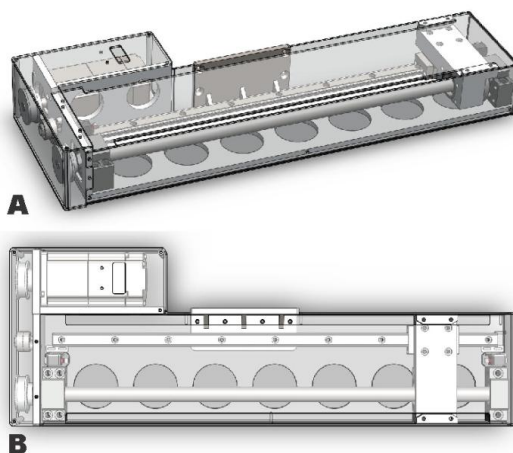


Figura 5.9. Junta Prismática Y

A quarta junta da cadeia cinemática, junta rotacional A, é destinada ao ajuste do ângulo de ataque da tocha e também pode ser empregada na execução da oscilação pendular, sendo rotacional em torno do eixo X. Seu acionamento é dado por um motor de passo e a transmissão de movimento é por intermédio de um conjunto de polia e correia sincronizadora. Apresenta curso de  $360^\circ$  e velocidade de 37,5 rpm, Figura 5.10.

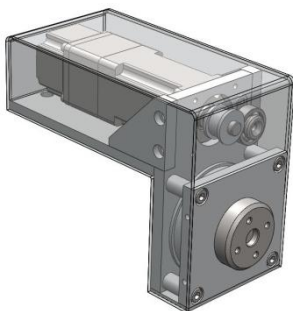


Figura 5.10. Junta Rotacional A

A Figura 5.11 apresenta o componente que acopla as juntas Z, Y e A a junta X do sistema robótico. Este é fixado por intermédio de quatro parafusos laterais e pode ser facilmente retirado para o transporte. Possui os conectores para a ligação dos cabos provenientes do gabinete de controle e também uma alça para auxiliar o manuseio pelo operador do equipamento. Sua instalação é ilustrada na Figura 5.12.



Figura 5.11. Componente de acoplamento

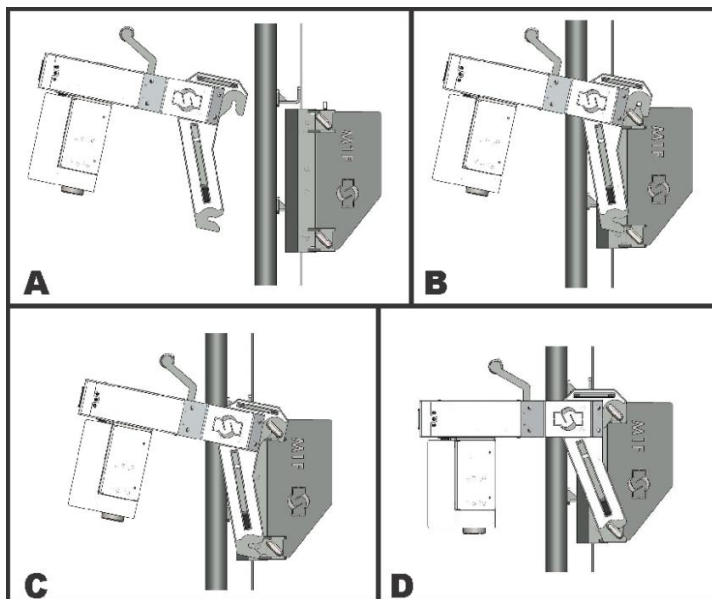


Figura 5.12. Montagem do sistema

A versão final da montagem do TARTÍLOPE VX, juntamente com o trilho e um painel de caldeira formado por quatro tubos e três membranas, é apresentada na Figura 5.13.

Por fim, a Figura 5.14 traz uma vista explodida do TARTÍLOPE VX e as partes que o compõem, a saber: (1) junta prismática Z, (2) junta rotacional A, (3) tocha reta de soldagem para o processo MIG/MAG, (4) junta prismática Y, (5) componente de acoplamento, (6) painel com tubos novos, (7) trilho flexível e (8) junta prismática X.

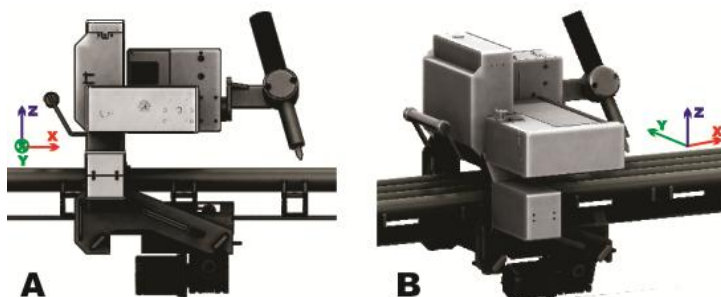


Figura 5.13. Em (A) vista lateral do TARTÍLOPE VX sobre o painel tubular e em (B) perspectiva isométrica

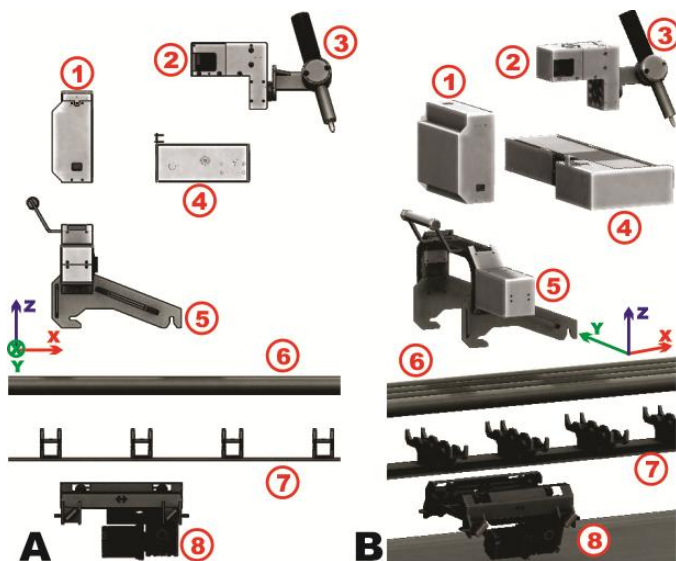


Figura 5.14. Projeto do TARTÍLOPE VX explodido. Em (A) vista lateral e em (B) perspectiva isométrica

## 5.4.2. Desenvolvimento do Sistema de Controle

### 4.4.2.1 Versão Preliminar com Controlador CNC

A elaboração do sistema de controle levou em consideração as diferentes problemáticas dos processos de soldagem, bem como visou proporcionar segurança a fim de evitar danos ou retrabalhos às peças que estão sendo soldadas.

As principais providências para solucionar o problema supracitado foram:

- Blindagem dos cabos: reduz os efeitos de campos elétricos sobre os sinais;
- Fiação com par trançado: atenua problemas com campos magnéticos principalmente em sinais diferenciais;
- Isolamento de sinais por intermédio de opto acopladores;
- Filtro de linha com o intuito de eliminar ruídos provenientes da rede elétrica.

Para orientar o desenvolvimento do sistema de controle foi elaborado um diagrama de blocos funcional, Figura 5.15, onde aparecem as principais funções e as inter-relações entre elas.



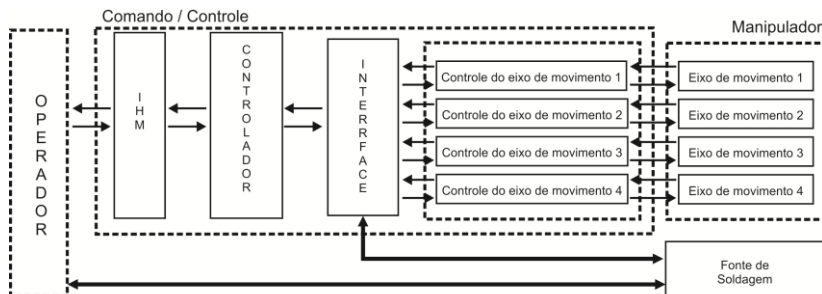


Figura 5.15. Diagrama de blocos funcional do sistema robótico

Uma primeira versão do sistema de controle para o TARTÍLOPE VX foi montada tendo como base o controlador CNC Mach 3.

A interface disponibilizada pela Mach3 é uma IHM funcional genérica e destinada às operações de fresamento ou torneamento. Para a operação de soldagem é aplicada uma tela desenvolvida especificamente para este processo de fabricação. A Figura 5.16a apresenta a tela inicial da IHM, onde o operador seleciona se deseja programar uma nova trajetória ou carregar um arquivo salvo anteriormente. Caso opte por programar uma nova trajetória, o sistema é direcionado para a tela de seleção da forma de deslocamento, Figura 5.16b, onde escolhe por uma trajetória linear, com oscilação trapezoidal ou triangular. Dentro destas opções é possível selecionar uma trajetória contínua, onde o manipulador inicia o deslocamento a partir da posição em que se encontra, ou então programar uma sequência de pontos. Adicionalmente, há a opção de posicionar o robô [24].

Com o objetivo de fornecer uma visão ampla sobre o primeiro hardware implementado foi elaborado o diagrama de blocos instrumental da Figura 5.17. Em linhas grossas é apresentado o sentido dos sinais de potência referentes às tensões de alimentação e em linhas finas o fluxo dos sinais de comando entre blocos e equipamentos periféricos.

A concepção adotada foi de apenas fixar no robô os motores e freios dos eixos e seus respectivos sensores de *home* e fim de curso com o intuito de minimizar a massa do manipulador. Com exceção das interfaces entre o operador e o manipulador (IHMs) o restante do hardware foi inserido em um painel eletroeletrônico metálico com dimensões de 600x950x250 mm (largura x altura x profundidade).

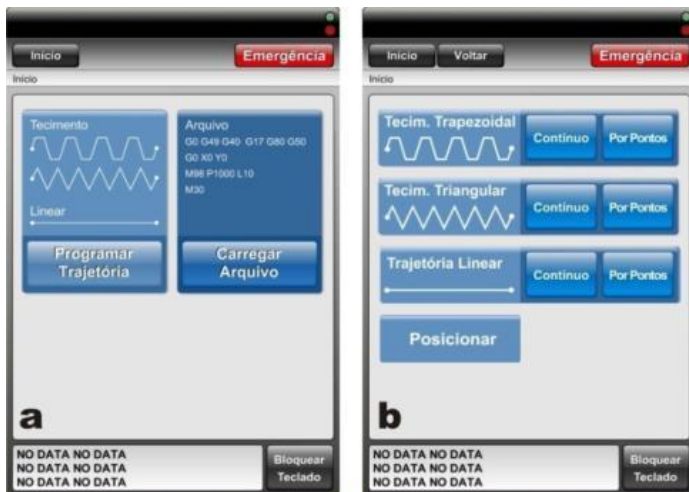


Figura 5.16. Em (a) tela inicial de programação do manipulador e em (b) tela de seleção da forma de trajetória

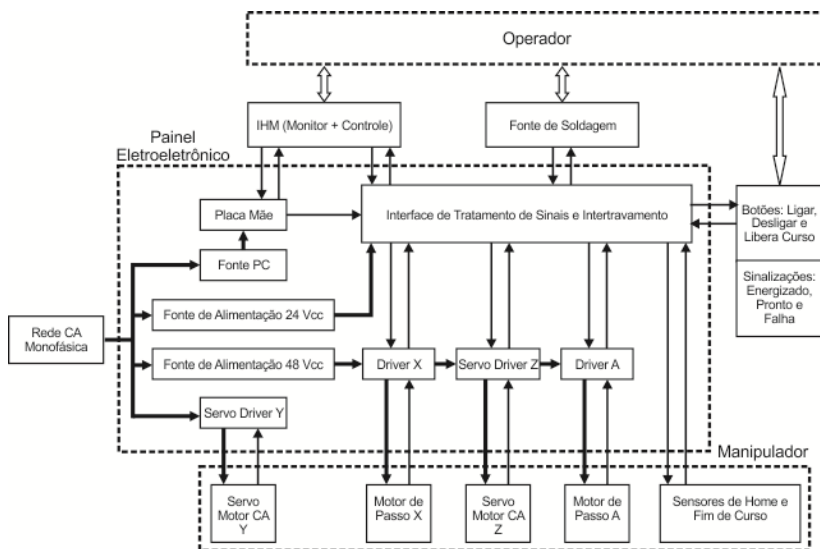


Figura 5.17. Diagrama de blocos instrumental do sistema robótico dedicado ao revestimento de paredes de caldeiras

O painel eletroeletrônico descrito foi montado e posto em funcionamento, Figura 5.18. Em 1 tem-se as fontes de alimentação relacionadas com a parte de potência do sistema. O item 2 apresenta os

*drivers* responsáveis pelo acionamentos dos motores. Em 3 a fonte de alimentação para a parte de controle e lógica. É necessário também à adequação e isolamento de alguns sinais (sensores, controle externo, comando dos *drivers*), para tanto foi desenvolvida uma placa para o tratamento de sinais e intertravamento, item 4. Por fim, em 5 é apresentada a placa mãe responsável por rodar o Mach 3.

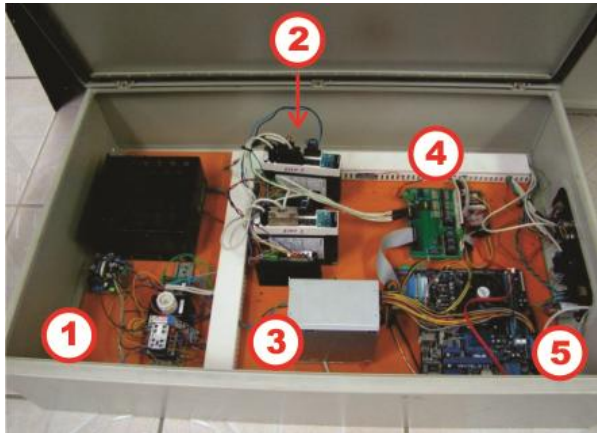


Figura 5.18. Painel eletroeletrônico com tecnologia CNC

Cabe destacar que, em virtude dos empecilhos de se aplicar o Mach 3 na automação da soldagem, o presente painel foi elaborado apenas para iniciar alguns ensaios com o TARTÍLOPE VX.

#### 4.4.2.2 Versão com Controlador Dedicado

Para minimizar os problemas gerados pelo uso do Mach 3, foi desenvolvido um hardware e software específicos para as necessidades do sistema robótico. Neste novo sistema, é empregado um processador ARM, o que tornou fundamental o projeto de uma nova eletroeletrônica para o manipulador, a qual tem seu diagrama de blocos instrumental ilustrado na Figura 5.19. Em linhas grossas é apresentado o sentido dos sinais de potência referentes às tensões elétricas de alimentação e em linhas finas o fluxo dos sinais de comando entre blocos e equipamentos periféricos.

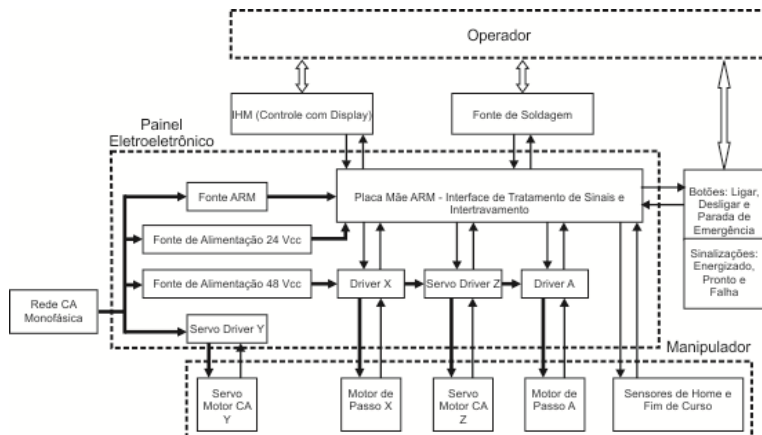


Figura 5.19. Novo diagrama de blocos instrumental

Com a nova estrutura do hardware elaborado para o TARTÍLOPE VX foi necessário o desenvolvimento de um software de controle de movimento dedicado ao equipamento. Este foi dividido em módulos com funções específicas:

- Interface Homem-Máquina: é o dispositivo onde o operador escolhe e configura o tipo de trajetória a ser realizada pelo manipulador. Esta interface permite programar e corrigir desde uma simples trajetória de soldagem até uma trajetória com oscilação composta de vários passes e trechos;

- Geração de comandos: realiza inicialmente a leitura das informações proveniente da interface do usuário e dos módulos de entrada digital e analógico. A seguir processa estas informações e gera os sinais de comando para os *drivers* de acionamento dos motores de cada eixo do manipulador e também os sinais de disparo e de sincronismo para a fonte de soldagem;

- Módulo de Entrada/Saída: é uma interface por onde ocorre a comunicação de sinais elétricos entre os equipamentos periféricos e o módulo de geração dos comandos de movimento. O disparo da fonte de soldagem e o reconhecimento de arco aberto pelo manipulador são exemplos de uso dos sinais digitais de entrada e de saída deste módulo.

#### 4.4.2.2.1 Hardware do Controlador

As demandas em relação ao hardware foram levantadas de modo a satisfazer a aplicação, tendo os seguintes requisitos gerais:

- Gerar comandos de movimento do tipo digital;
- Definir e corrigir as variáveis de movimento;
- Integração com fonte de soldagem;
- Permitir comunicação via USB e serial, para integração com outros dispositivos;
- Microcontrolador com alta taxa de processamento, e com arquitetura de pleno domínio que permita alterações e atualizações no processo de geração dos comandos de movimento.

A concepção funcional do sistema de controle do manipulador, Figura 5.20, apresenta o projeto de um protótipo de uma placa eletrônica para validar os requisitos.

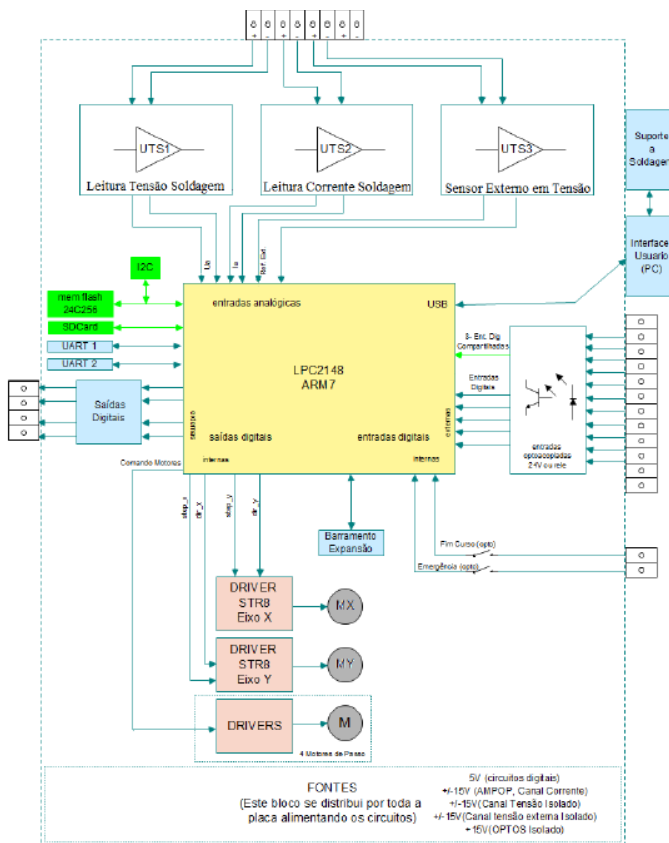


Figura 5.20. Concepção funcional do sistema de controle do manipulador

A seguir foi realizado o projeto e a construção de um novo painel eletroeletrônico para TARTÍLOPE VX, Figura 5.21. Houve uma redução significativa nas dimensões, uma vez que o painel com tecnologia CNC é de 600x950x250 mm enquanto que o painel com tecnologia ARM é de 510x440x185 mm.



Figura 5.21. Painel eletroeletrônico com tecnologia ARM: (A) vista frontal, (B) vista traseira, (C) vista lateral direita e (D) vista lateral esquerda

#### 4.4.2.2 Software do Controlador

Para nortear o desenvolvimento da programação dedicada, foi elaborado um fluxograma básico com as rotinas envolvidas na determinação de trajetórias do manipulador, Figura 5.22. Observando o fluxograma, tem-se uma tela inicial que apresenta duas alternativas, sendo uma para a criação de trajetórias e outra para abrir arquivos salvos. Caso a opção escolhida seja a de carregar um programa, o operador é direcionado para a tela final da IHM, denominada de soldagem. Entretanto, se o objetivo for criar uma nova trajetória de soldagem para um fim específico, ao ser selecionada a opção programar a IHM seguirá para a tela de seleção de trajetória.

Nesta tela o operador possui três alternativas. Na primeira pode definir uma nova trajetória, na segunda carregar uma trajetória e terceira configurar o manipulador. Posteriormente, é determinado o objetivo da tarefa, revestimento ou soldagem de união.

A tela de ajuste dos parâmetros de deslocamento, fornece as opções pertinentes a velocidade de soldagem e as características da trajetória. Com a determinação das referidas variáveis, o sistema vai para a tela de soldagem.

A tela de soldagem é a tela final de programação do robô. Nesta, o operador tem a possibilidade de executar o deslocamento. Ao término da soldagem, o usuário aciona um botão de início, tal ação faz com que o sistema retorne à tela principal da interface. A partir deste momento, o usuário pode iniciar a programação de uma nova trajetória de soldagem.

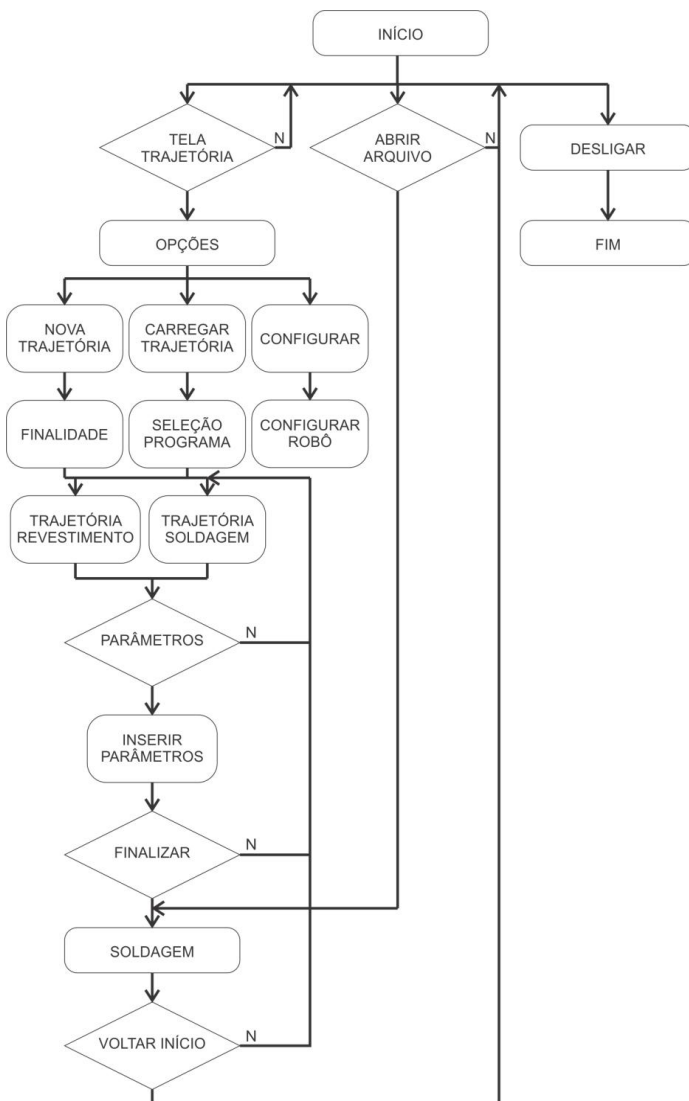


Figura 5.22. Fluxograma do software de controle

Devido a grande quantidade de tarefas simultâneas que devem ser realizadas pelo equipamento, houve a necessidade de dividir o software em diversas camadas, facilitando a documentação, a compreensão e o desenvolvimento. Para isto, foi elaborada a abstração a objetos dos componentes, com uma hierarquia definida, vista na Figura 5.23.

No nível mais baixo está o controle dos motores, da fonte de soldagem e o armazenamento dos parâmetros de movimentação.

No software, cada objeto Motor é definido individualmente e contém diversos parâmetros e rotinas de controle. Dentre os parâmetros, pode-se citar a aceleração e a relação de transmissão. As rotinas controlam o motor, isto é, fazem a temporização de passo e direção, o posicionamento, o ajuste da velocidade e a compensação da velocidade devido à aceleração para realizar a movimentação no tempo correto.

O objeto Fonte de Soldagem detém as saídas de disparo, sincronismo e seleção de programa da fonte de soldagem real, podendo selecionar rapidamente diferentes configurações de parâmetros de soldagem.

Os parâmetros de movimentação são definidos em dois grupos, um referente à totalidade do cordão, chamada de passe, e um contendo às particularidades do movimento em segmentos, chamada de trecho. No passe são armazenados os dados mais gerais do cordão, como quais sistemas extras serão ativados, por exemplo, o disparo da fonte de soldagem. Por sua vez, um trecho armazena os dados referentes à trajetória que será realizada, como amplitude, frequência e a distância a ser percorrida.

O objeto Tartilope utiliza os Motores para realizar a trajetória conforme os parâmetros de movimentação, podendo, ser linear, trapezoidal ou triangular, e tecer em um plano com ângulo ajustável. Além disto, o Tartilope é responsável pelo posicionamento e inicialização do processo, pelo controle da fonte de soldagem, pela chamada dos novos parâmetros de movimentação e por permitir a correção da trajetória de soldagem.

O sistema de Aquisição de Dados faz a leitura das entradas analógicas, a filtragem dos sinais com filtro digital e pode salvar dados em um cartão de memória, por exemplo, a tensão e corrente instantâneas e médias e, ainda, a posição e velocidade do manipulador simultaneamente.

O Controlador Inteligente é responsável pelas intervenções que usualmente seriam realizadas pelo operador, como os cálculos e o posicionamento em relação ao tubo.



As Interfaces são os diversos canais de comunicação disponíveis para interfaceamento, como as entradas digitais para os botões, a comunicação serial e a USB, que tem acesso a todos os recursos disponíveis no sistema.

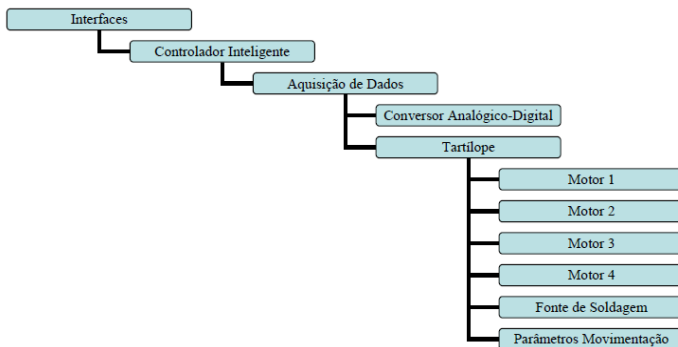


Figura 5.23. Bloco diagrama da hierarquia de objetos do software de controle

Dentro do software de controle do TARTÍLOPE VX foi incluída uma programação dedicada ao revestimento de tubos de caldeiras, a qual é dividida em partes. A primeira é referente à entrada do conjunto de parâmetros dimensionais relacionados à parede a ser revestida, que são: espessura do tubo, diâmetro do tubo, distância entre tubos e espessura da membrana.

A segunda trata da entrada dos parâmetros de oscilação e velocidade de soldagem para as três partes da parede: membrana, junção membrana-tubo e tubo. Em seguida, na terceira parte, são calculadas, pelo software, as trajetórias de deslocamento do manipulador e da tocha de soldagem. As trajetórias são enviadas para o software de controle e acionamento do manipulador via comunicação USB, que comanda o equipamento para realizar a soldagem.

Além de todas as funcionalidades aplicadas ao software de controle, é fundamental a preocupação com a operacionalidade do sistema, a qual envolve aspectos de usabilidade, ergonomia, simplicidade e versatilidade. Assim, o software da IHM foi projetado para ser de fácil operação, sendo que o desenvolvimento do mesmo considerou uma lista de requisitos:

- interface intuitiva;
- capacidade de gerar trajetórias de soldagem com e sem oscilação;

- possibilidade de alteração de parâmetros configurados inicialmente durante o processo de soldagem;
- salvar, carregar e editar arquivos com os parâmetros programados;
- programação de trajetórias com diversos passes de solda;
- programação de passes com vários trechos;
- programação de trajetórias de revestimento para tubo de caldeira.

### 5.5. Ensaios de Validação do TARTÍLOPE VX

Com a intenção de verificar a robustez e eventuais discordâncias entre os valores de variáveis programados e as executadas pelo manipulador, TARTÍLOPE VX, em situação de execução de revestimento sobre painéis na posição vertical, foi conduzido um ensaio dinâmico a vazio, sem soldagem, Figura 5.24. Os parâmetros de movimentação usados foram similares aos aplicados nos procedimentos de revestimento automático. Deste modo, foi possível verificar o real comportamento do equipamento em sua região de operação.

Para tanto, foi utilizado um resistor linear e um aplicativo específico para a medição do deslocamento das três juntas prismáticas (X, Y e Z). Este sistema também foi empregado para aferir outros manipuladores nos ensaios desta tese. Com a bancada montada, o resistor linear foi instalado em cada junta e os testes dinâmicos ocorreram de forma isolada. Cada aquisição durou 10 s e teve um intervalo de captura entre pontos de 1 ms. Os gráficos, a seguir, consideraram pontos dentro de um tempo de 5 s contido nas aquisições.

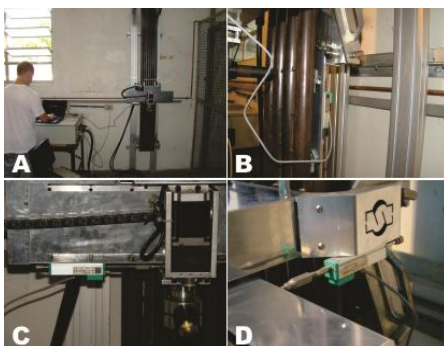


Figura 5.24. Medição das juntas do TARTÍLOPE VX: (A) bancada de ensaios, (B) medição da junta X, (C) medição da junta Y e em (D) medição da junta Z

A primeira junta a ser aferida foi a X, Figura 5.24B, com velocidade ajustada de 35 cm/min. Neste teste, o valor médio de velocidade foi de 35,10 cm/mim, sendo que o pico máximo foi de 35,25 cm/mim e o mínimo de 34,95 cm/mim. O comportamento ao longo do tempo é apresentado na Figura 5.25.

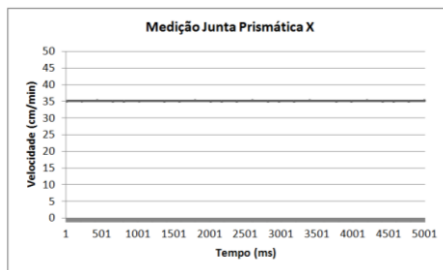


Figura 5.25. Velocidade na junta prismática X

Posteriormente foi avaliado o comportamento dinâmico da junta prismática Y, Figura 5.24C. Esta é a responsável pela oscilação transversal da tocha de soldagem durante a execução do revestimento dos painéis e, portanto, é a que necessita de maior dinâmica para cumprir os requisitos de amplitude e frequência de oscilação.

Foram realizados dois ensaios considerando os tipos de oscilação mais comuns. No primeiro deles foi testado uma oscilação triangular com uma amplitude de 5 mm e frequência de oscilação de 3 Hz. O sistema de medição foi zerado no ponto de 4 mm, o que determinaria um deslocamento máximo até 6,5 mm e mínimo até 1,5 mm.

A medição dos pontos máximo e mínimo apresentou valores de 6,55 e 1,55 mm, respectivamente, e o ponto médio do deslocamento ficou em 4,10 mm. Na Figura 5.26 é possível verificar que foram efetuados quinze ciclos de oscilação no intervalo de 5 s, o que é condizente com o valor de frequência regulada.

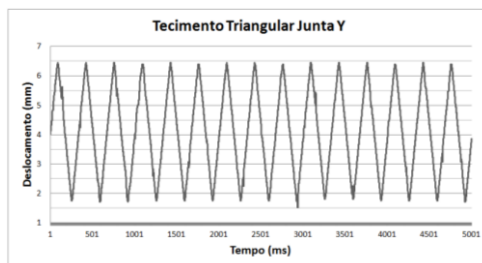


Figura 5.26. Oscilação triangular na junta prismática Y

No segundo ensaio foi observada a oscilação trapezoidal. Definiu-se como variáveis de deslocamento uma amplitude de 5 mm, frequência de oscilação de 2 Hz e tempo de parada de 0,15 s. O sistema de medição foi zerado no ponto de 3 mm, logo o deslocamento deveria ocorrer entre 5,5 mm e 0,5 mm. Contudo, os pontos capturados variaram entre 5,60 e 0,45 mm, sendo que o valor médio do deslocamento ficou em 3,10 mm. Com relação à frequência de oscilação, a junta deveria ter realizado 10 ciclos no intervalo de tempo analisado, entretanto, o sistema efetuou 9,85 ciclos, caracterizando um desvio de 1,5%, Figura 5.27.

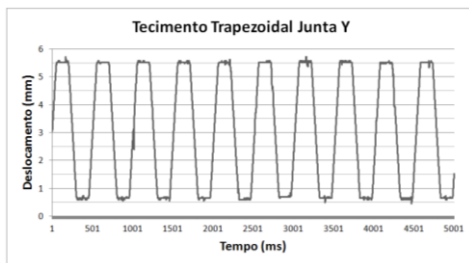


Figura 5.27. Oscilação trapezoidal na junta prismática Y

Por último, foi efetuado o ensaio com oscilação triangular na junta prismática Z, Figura 5.24D. As variáveis ajustadas foram amplitude de 4 mm e frequência de oscilação de 2 Hz. O sistema foi zerado na posição de 25 mm, estabelecendo que o deslocamento deveria ocorrer entre 27 e 23 mm. Todavia, a variação dos pontos ocorreu de 27,3 e 22,9 mm, com valor médio de 25,1 mm. A Figura 5.28 mostra que foram executados dez ciclos de oscilação e 5 s, sendo coerente com a frequência regulada.

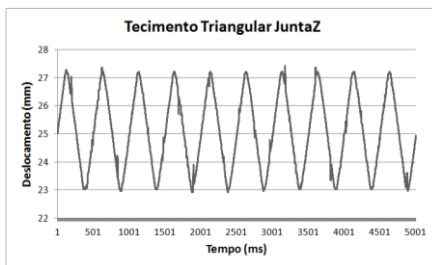


Figura 5.28. Oscilação triangular na junta prismática Z

A análise dos resultados mostra que embora haja a existência de alguns erros, os mesmos são pequenos em relação às variáveis envolvidas no deslocamento da tocha de soldagem. Há também a ocorrência de picos nos deslocamentos, principalmente nas regiões em que ocorre alteração no sentido de giro do motor. Isto era esperado em virtude das grandes acelerações e desacelerações existentes nestes momentos.

De forma geral, considera-se que os ensaios demonstraram confiabilidade e repetitividade nos deslocamentos do TARTÍLOPE VX. Logo, o conjunto da estrutura mecânica e do sistema de controle foram considerados aptos para a realização do revestimento de painéis tubulares.

## 5.6. Sistema Complementares

### 5.6.1. Sistema de Fixação do Trilho aos Tubos

O trilho empregado no TARTÍLOPE VX é flexível, o que possibilita que o manipulador acompanhe as deformações do painel, causadas pelo empenamento devido à soldagem, e mantenha a DBCP constante, reduzindo as chances de descontinuidades na solda. Este é instalado na parte oposta ao revestimento do painel, por intermédio da soldagem de pinos que são utilizados como apoio para o sistema de fixação do trilho, Figura 5.29.

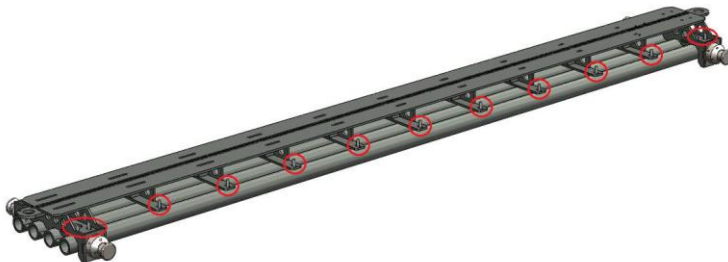


Figura 5.29. Posicionamento do trilho em relação ao tubo com destaque para os pinos de apoio

A pistola utilizada para a soldagem de pinos conta com um bocal que atua como uma blindagem para o gás, e também como proteção contra respingos e a luminosidade gerada pelo arco. A superfície externa deste é apoiada na base onde será realizada a solda, assim, é possível alinhar corretamente antes do início da operação. Porém, quando

utilizado para a solda em tubos o bocal não permite o correto apoio da pistola, Figura 5.30, fazendo com que os pinos sejam soldados fora da posição desejada.

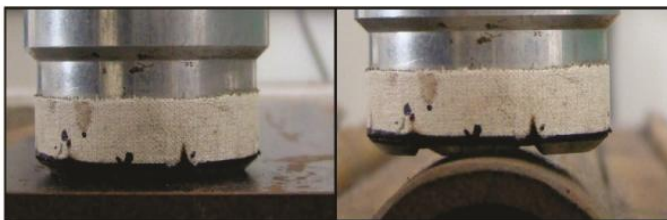


Figura 5.30. Apoio do bocal da pistola em superfície plana e dificuldade sobre o tubo

Para solucionar o problema e permitir a aplicação do processo em tubos, foi desenvolvida uma adequação para que as soldas no tubo ficassem centradas. Deste modo, optou-se por projetar um novo bocal, com uma superfície que acompanha a curvatura do tubo, Figura 5.31.

Também foi importante garantir que a distância entre os pinos soldados fosse sempre a mesma. Logo, foi projetado um gabarito que contém os espaçamentos corretos para a soldagem dos pinos e furos onde é encaixado o bocal da pistola, Figura 5.32.

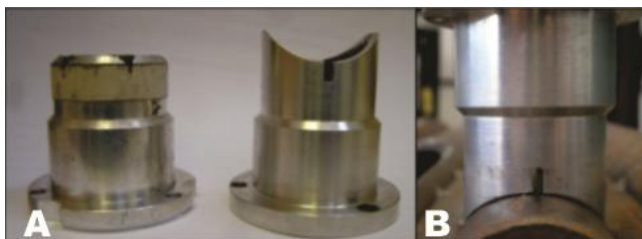


Figura 5.31. Em (A) comparação entre o bocal original plano e o novo bocal e em (B) encaixe do novo bocal à peça



Figura 5.32. Gabarito utilizado para soldagem dos pinos

### 5.6.2. Sistema de Alinhamento de Tubos

No revestimento de painéis tubulares, um fator que contribui para o sucesso da operação é o alinhamento entre os tubos e membrana no momento da montagem dos referidos painéis. Em muitos casos, a união entre as partes é realizada sem o devido cuidado e ocorrem significativas variações no posicionamento das membranas em relação aos tubos, Figura 5.33. Isto faz com que a geometria da região a ser revestida se altere a cada momento, fato que interfere nos parâmetros de soldagem ou de deslocamento de tocha.

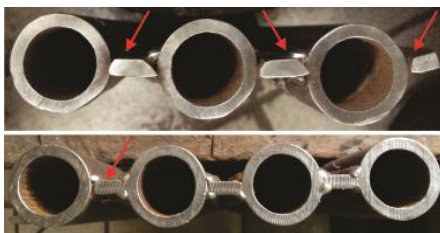


Figura 5.33. Desalinhamento entre membranas e tubos

Dado que o revestimento dos tubos de caldeira será executado de forma automática, é importante que o posicionamento entre os tubos e as membranas seja sempre o mesmo. Deste modo, a trajetória programada no robô será similar para diferentes painéis tubulares. Isto faz com que eventuais defeitos no revestimento, ocasionados por desalinhamentos, sejam minimizados.

Para tanto, foi projeto e construído um gabarito destinado à montagem de painéis, Figura 5.34. Este posiciona tubos e membranas de modo padrão, garantindo sempre o mesmo alinhamento entre as partes. Assim, o revestimento pode ser realizado com os mesmos parâmetros, o que proporciona maior índice de repetitividade.

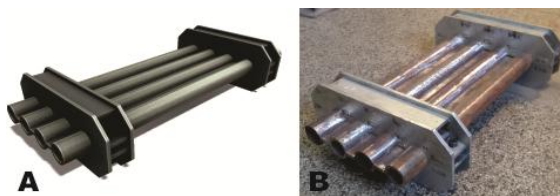


Figura 5.34. Em (A) projeto do sistema de alinhamento de tubos e em (B) seção de parede pronta para a soldagem de união entre tubo e membrana

### 5.6.3. Sistema de Refrigeração para as Paredes Tubulares

Sabe-se que a operação de revestimento requer a deposição de material por longos períodos de tempo, resultando na aplicação contínua de calor ao painel. Este aquecimento do material de base acarreta alguns problemas como o aumento da penetração, elevando a diluição, o que contamina o material depositado e gera menor resistência ao desgaste. O aquecimento excessivo gera também deformações na parede, Figura 2.11, e ovalização nos tubos.

Com o intuito de minimizar tais problemas, passou-se a refrigerar os painéis utilizando seus próprios tubos para circulação de água. O sistema elaborado e seus componentes podem ser visualizados na Figura 5.35. Isto foi conseguido interligando-os em forma de uma serpentina, como ilustrado no esquema, Figura 5.35a. A água provém de uma torneira, ligada ao tubo esquerdo por uma mangueira de cristal de PVC. O tubo da direita é ligado ao tanque de armazenamento de água quente por outra mangueira de mesmo material. Para ligação dos tubos entre si, foram necessários conectores de meia polegada, Figura 5.35b. Estes unem as mangueiras a tampas de nylon, Figura 5.35c, que, por sua vez, são responsáveis pela vedação do circuito nas paredes dos tubos. Nas conexões entre os tubos foram usadas mangueiras com certa rigidez para evitar o dobramento e, conseqüente, interrupção no fluxo de água, Figura 5.35d.

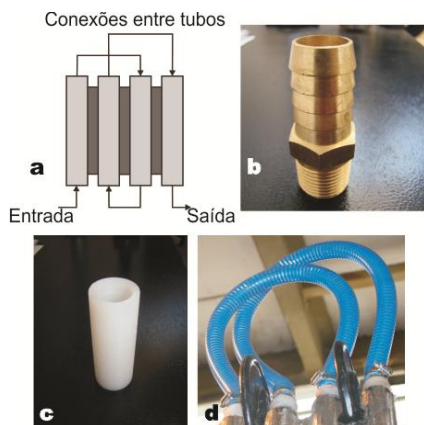


Figura 5.35. Sistema de refrigeração dos painéis: a) desenho esquemático do circuito de água dentro dos painéis; b) espigão; c) tampa de nylon; d) mangueiras rígidas



Por intermédio da filmagem térmica foi possível avaliar se o sistema de refrigeração implementado apresentava resultados satisfatórios. A Figura 5.36 traz a imagem termográfica do tubo logo após o término do cordão de solda. Na Figura 5.36a, onde não há refrigeração, têm-se áreas com temperaturas de até 95 °C e uma grande região com temperatura na ordem de 80 °C. Já na Figura 5.36b, tubo com refrigeração, a temperatura máxima está na faixa de 55 °C e a maior parte do tubo encontra-se na ordem de 40 °C.

Com a análise da Figura 5.36 fica claro que o sistema de refrigeração é eficiente e retira calor da peça rapidamente. A partir da mesma energia aplicada sobre a peça os tubos com refrigeração possuem temperaturas na ordem de 50% das encontradas nos tubos sem refrigeração. Isto contribui para a redução na deformação dos painéis e também proporciona menores níveis de diluição do material de adição.

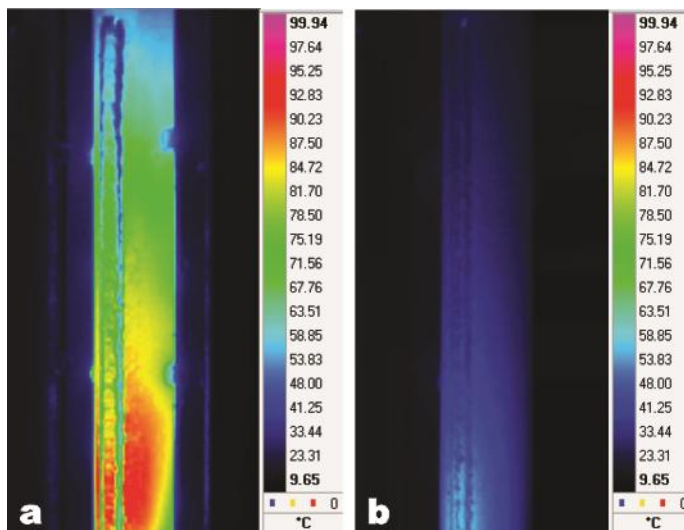


Figura 5.36. Termografia ao término da soldagem. Em (a) sem refrigeração e em (b) com refrigeração

## 5.7. Desenvolvimento de Trajetória Tridimensional de Soldagem

Neste item são apresentadas as metodologias utilizadas para desenvolver e implementar, ainda no manipulador cartesiano TARTÍLOPE V4, o algoritmo de geração de trajetórias para o

revestimento de tubos de caldeiras com orientação vertical. Posteriormente, foi elaborado um algoritmo próprio para o TARTÍLOPE VX.

As paredes das caldeiras são formadas pelas superfícies: membrana, membrana-tubo e tubo. Cada uma destas apresentam geometrias diferentes e necessitam de trajetórias específicas para serem revestidas. Assim, o procedimento para revestir as paredes é também dividido em três etapas sequenciais.

No presente trabalho foram adotadas duas estratégias distintas para o revestimento. Na primeira a soldagem iniciou pela membrana, seguindo para a junção membrana-tubo e, por fim, o tubo, com o emprego do TARTÍLOPE V4. Na segunda estratégia, primeiramente são revestidas as laterais dos tubos, depois o topo e por fim a membrana, utilizando o TARTÍLOPE VX. O objetivo foi verificar a influência dos métodos nas características de distorção do tubo e em questões de penetração e diluição.

#### **5.7.1. Revestimento Membrana, Junção Tubo-Membrana e Tubo com o TARTÍLOPE V4**

Nesta situação para o revestimento da membrana, é necessário apenas à oscilação transversal do eixo Y, devido à condição de paralelismo entre a superfície da membrana e o plano XY do robô. Inicialmente, o operador posiciona a tocha no ponto P4 e informa ao robô os valores de amplitude e de frequência do perfil triangular de oscilação e a distância  $l$  a ser revestida a partir da cota  $x_0$  da posição inicial.

A seguir, o operador habilita a execução do revestimento das membranas e a tocha é deslocada, de forma automática, do ponto P4 até o ponto P5, conforme mostra a Figura 5.37. Neste ponto, a fonte de soldagem é acionada e o primeiro cordão de solda da membrana com oscilação da tocha é realizado até o ponto P5'. Posteriormente, o robô retorna a tocha, até o ponto P5, e segue ao ponto P6, passando pelo ponto P4. No ponto P6, a fonte de soldagem é novamente acionada e o segundo cordão de solda da outra membrana do tubo é realizado até o ponto P6'. Por fim, o manipulador retorna a tocha, até o ponto P6, e segue para ponto P4. Neste ponto, o robô fica aguardando o operador habilitar a execução da próxima etapa [33].

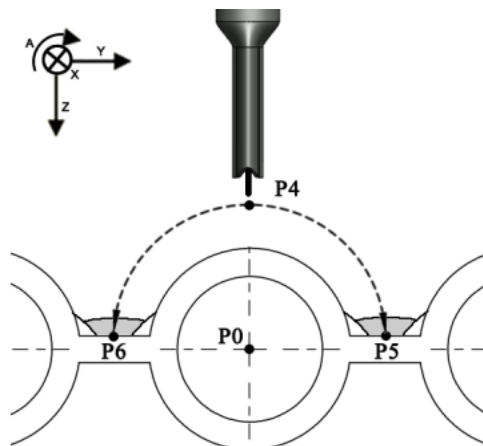


Figura 5.37. Etapa de revestimento da membrana [29]

Os cordões de solda aplicados na membrana utilizam trajetórias com oscilação, as quais são calculadas com base nos parâmetros de movimento informados pelo operador na interface do equipamento, que são: a velocidade de soldagem  $V_s$ , a amplitude  $Amp$  e a frequência de oscilação  $f$ . Além destes parâmetros, da trajetória desejada, é necessário fornecer na programação do manipulador os valores da velocidade resultante da tocha  $V_t$  e da distância a ser percorrida em cada eixo,  $D_x$  e  $D_y$  [33].

A segunda etapa de revestimento é referente à junção membrana-tubo, necessária para ancorar os cordões de solda da terceira etapa, conforme mostra a Figura 5.38. Os dois cordões de solda desta etapa são executados de forma semelhante à primeira etapa, porém com uma pequena amplitude de oscilação da tocha, para evitar o excesso de sobreposição com o cordão da membrana. Esta oscilação da tocha é provida pela oscilação sincronizada dos eixos Y e Z. Para evitar a colisão da tocha com os tubos adjacentes, os dois cordões são executados, respectivamente, com a orientação do eixo angular de  $60^\circ$  e  $-60^\circ$  em relação ao plano  $\pi$ .

Ao habilitar o processo, a tocha, localizada no ponto  $P4$  e com orientação perpendicular ao plano  $\pi$ , é simultaneamente rotacionada no sentido horário e deslocada, de forma automática pelo manipulador, até o ponto  $P1$ , Figura 5.38.

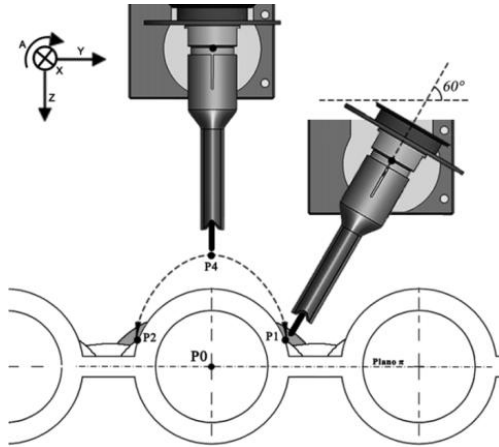


Figura 5.38. Etapa de revestimento da junção membrana-tubo [29]

A localização do ponto  $PI$  depende do reforço do cordão de solda usado para fixar o tubo na membrana. Com a distância,  $l$ , a ser revestida a partir da cota  $x$  da posição inicial, são definidos os pontos  $PI'$  e  $P2'$ , referentes ao ponto final das trajetórias iniciadas nos pontos  $PI$  e  $P2$ .

Durante a execução da oscilação, o manipulador move simultaneamente os eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . As componentes de distância  $D_x$  e velocidade  $V_x$  do eixo  $X$  são definidas de forma similar à trajetória da membrana. Para os eixos  $Y$  e  $Z$ , as distâncias  $D_y$  e  $D_z$  são calculadas com eq 5.4 e 5.5 respectivamente e representam a projeção da amplitude de oscilação nos eixos correspondentes.

$$D_y = Amp * \cos(60) \quad (\text{eq 5.4})$$

$$D_z = Amp * \sin(60) \quad (\text{eq 5.5})$$

As velocidades dos eixos  $Y$  e  $Z$  são calculadas com base nas distâncias  $D_y$  e  $D_z$  e o intervalo de tempo utilizado para o deslocamento, conforme eq 5.6 e 5.7.

$$V_y = \frac{D_y}{P} \quad (\text{eq 5.6})$$

$$V_z = \frac{D_z}{P} \quad (\text{eq 5.7})$$

Com as velocidades ( $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ ), envolvidos nesta trajetória planar de oscilação, é determinada a velocidade da tocha, eq 5.8.

$$V_t = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (\text{eq 5.8})$$

Com a determinação dos parâmetros da trajetória, a fonte de soldagem é acionada no ponto  $P1$  e o cordão de solda é realizado até o ponto  $P1'$ , com comprimento  $l$ , onde a fonte é desligada. A seguir, o manipulador retorna a tocha, até o ponto  $P1$ , e segue ao ponto  $P2$  passando pelo ponto  $P4$ . No ponto  $P2$ , a fonte de soldagem é novamente acionada e o segundo cordão de solda é realizado até o ponto  $P2'$ , também com distância  $l$ . Por fim, o manipulador retorna a tocha, até o ponto  $P2$ , e segue para ponto  $P4$ , onde aguarda o operador habilitar a execução da próxima etapa.

Após executar o revestimento da membrana e da junção dos dois lados do tubo, é realizada a terceira e última etapa, que corresponde ao revestimento do tubo. Nesta etapa final, é necessário definir o arco do tubo, o qual é definido entre os pontos  $P7$  e  $P8$ , Figura 5.39.

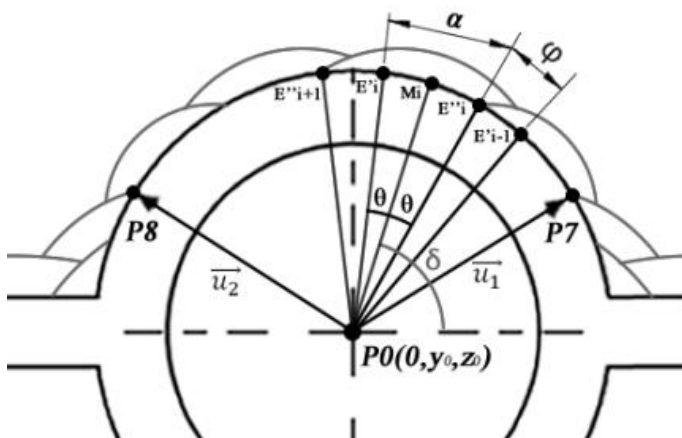


Figura 5.39. Estratégia de revestimento dos tubos [29]

Para determinar a trajetória de cada cordão de solda sobre o tubo é necessário definir três pontos: o ponto central da oscilação da tocha de solda  $M_i$ , e os pontos das extremidades laterais desta oscilação:  $E'_i$  e  $E''_i$ . O ângulo de orientação da tocha  $\delta_i$ , em relação ao plano  $\pi$ , no ponto central da oscilação de cada cordão de solda é determinado por eq 5.9.

$$\delta_i = 90^\circ + \left( \frac{2i - N_c - 1}{2 \cdot N_c} \right) \cdot \beta \quad ; \text{Com } i = 1, 2, \dots, N_c \quad (\text{eq 5.9})$$

Por fim, as coordenadas cartesianas dos pontos extremos,  $E'_i$  e  $E''_i$ , e o ponto central  $M_i$  de oscilação de cada cordão de solda são definidos por eq 5.10. Cada conjunto de pontos ( $E'_i$ ,  $M_i$  e  $E''_i$ ) define o caminho da oscilação da tocha do respectivo cordão de solda pelo movimento simultâneo dos eixos  $A$ ,  $Y$  e  $Z$  do robô. Assim, a trajetória da tocha gerada é concêntrica à circunferência externa do tubo, evitando variações na DBCP.

$$\begin{cases} E'_i(x_0, y_0 + r \cdot \cos(\delta_i + \theta), z_0 + r \cdot \sin(\delta_i + \theta)) \\ M_i(x_0, y_0 + r \cdot \cos(\delta_i), z_0 + r \cdot \sin(\delta_i)) \\ E''_i(x_0, y_0 + r \cdot \cos(\delta_i - \theta), z_0 + r \cdot \sin(\delta_i - \theta)) \end{cases} ; i = 1, 2, \dots, N_c \quad (\text{eq 5.10})$$

Considerando que a aplicação dos cordões de solda, em ambos os lados do tubo, resulte em cordões com geometria similar, é possível dividir os cordões de solda no tubo de forma que a disposição dos mesmos seja simétrica. A ordem de execução dos cordões também é muito importante, para que haja continuidade do revestimento e que minimize o tempo de posicionamento da tocha. Logo, se o número de cordões desejado  $N_c$  for par, o algoritmo divide metade dos cordões para um lado do tubo e a outra metade para o outro lado. Neste caso, o encontro dos cordões superiores ocorre no topo do tubo, como mostra a Figura 5.40a. Para um número ímpar de cordões, o último seria aplicado no topo do tubo para finalizar o revestimento, Figura 5.40b.

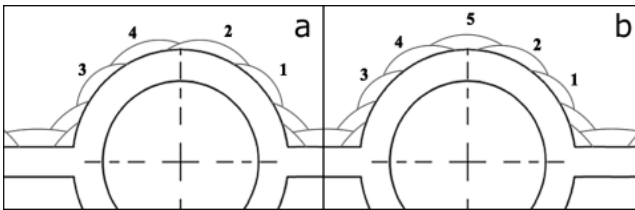


Figura 5.40. Ordem de execução de um número par de cordões de solda no tubo em (a) e ímpar em (b) [29]

### 5.7.2. Revestimento Lateral, Topo e Membrana com o TARTÍLOPE VX

Nesta segunda abordagem do revestimento de painéis buscou-se cordões com a maior largura possível, aplicando grande amplitude de

oscilação transversal e de acordo com o método alternativo e inovador que visa contribuir para a minimização do problema da ovalização, Figura 5.41. Assim, o tempo global de revestimento é reduzido e conseqüentemente há aumento da produtividade. Diferente das seqüências anteriores, este inicia o revestimento pela parte lateral dos tubos, depois a superior e por fim a membrana.

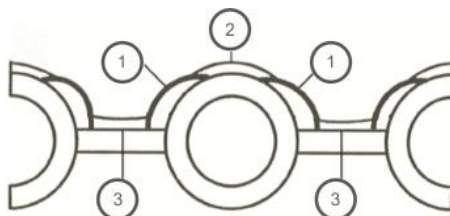


Figura 5.41. Seqüência inovadora de execução dos cordões de solda

Os cordões são posicionados em três regiões do tubo e realizados na seqüência I, II e III, Figura 5.42. Diferentemente dos ensaios anteriores, nesta forma de revestimento a trajetória da tocha de soldagem foi mantida sempre tangente ao tubo. Para isto, nas orientações da tocha de  $+\alpha$  e  $-\alpha$  é necessário que os eixos Y e Z do manipulador oscilem simultaneamente e de forma sincronizada.

As características gerais de execução dos cordões são idênticas, sendo que a diferença básica entre eles é o ângulo de orientação da tocha em cada situação. No cordão I a orientação é de  $+40^\circ$ , no II  $-40^\circ$  e no III  $0^\circ$ .

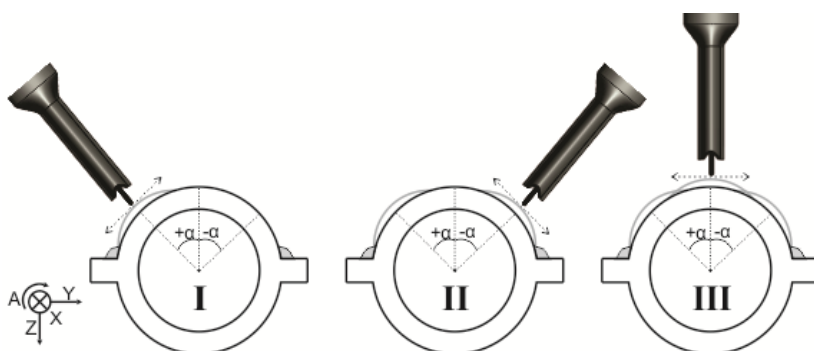


Figura 5.42. Seqüência de cordões para revestimento do tubo

Para o revestimento da membrana, foi elaborada uma estratégia inovadora no revestimento de painéis tubulares. Apenas um cordão de solda com oscilação pendular do eixo angular A do manipulador de soldagem para revestir cada membrana do painel. O valor  $\beta$  da amplitude desta oscilação angular é definido de forma experimental, como mostra a Figura 5.43. A primeira etapa deste procedimento experimental consiste em orientar, via a IHM do manipulador de soldagem, a tocha perpendicularmente à superfície da membrana e posicionar o seu TCP (*Tool Center Point*) no centro da membrana via o comando de avanço de arame. Na segunda etapa, o arame é recuado e o eixo angular do manipulador de soldagem é acionado no sentido A+ até que o arame coincida com a extremidade inferior do cordão de solda da lateral do tubo esquerdo, ponto P1. De forma simétrica à segunda etapa, se obtêm na terceira etapa, o ponto P2. Assim, o valor da amplitude angular  $\beta$ , é dado pela diferença entre os ângulos de orientação da segunda e terceira etapas.

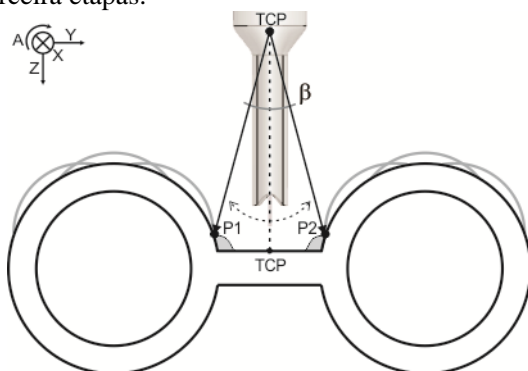


Figura 5.43. Determinação da amplitude angular da oscilação transversal pendular da tocha

A vantagem desta nova técnica de revestimento da membrana é que com a oscilação transversal pendular da tocha é possível revestir cada membrana e suas junções com os tubos adjacentes com apenas um cordão. Além de minimizar o surgimento de falta de fusão na membrana reduz-se a quantidade de cordões e o tempo total gasto no revestimento. Com este novo método é possível que o painel padrão seja revestido com apenas quinze cordões.



## **6. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são descritas as características dos ensaios para avaliar experimentalmente a sistemática concebida. Toda a metodologia, desenvolvida e descrita nos capítulos anteriores é aqui aplicada. São também apresentados, os diversos experimentos realizados e os respectivos resultados obtidos em cada um dos casos.

### **6.1. Resultados Obtidos**

A avaliação dos resultados está dividida em três tópicos. O primeiro deles trata dos resultados iniciais atingidos com o TARTÍLOPE V4. O segundo apresenta revestimentos com o TARTÍLOPE VX empregando a soldagem MIG/MAG com corrente contínua. O terceiro e último tópico, aborda os ensaios com o TARTÍLOPE VX e a utilização do MIG/MAG com corrente alternada. Nos ensaios foi utilizado como material de revestimento o aço inoxidável 309L e todos os cordões foram realizados na posição vertical descendente.

#### **6.1.1. Resultados com o TARTÍLOPE V4**

Após a instalação do equipamento na parede tubular, o sistema foi referenciado e o TARTÍLOPE V4 parametrizado, bem como, definido o zero peça. A posição de soldagem utilizada foi a vertical descendente com a tocha sempre normal e distante 15 mm, DBCP nominal, da superfície da parede da caldeira. Foi empregado, como material de adição o aço inoxidável ER309L de 1,2 mm de diâmetro com uma velocidade de alimentação de 6,1 m/min. O gás empregado foi uma mistura composta de 95% argônio, 3% de dióxido de carbono e 2% de nitrogênio, com vazão de 15 l/min. Os ensaios com o TARTÍLOPE V4 empregaram arame de 1,2 mm de diâmetro em virtude do emprego do MIG/MAG pulsado ao invés do MIG/MAG convencional. Isto foi decorrente desde procedimento ter apresentado melhor sustentação da poça nas condições de soldagem com o TARTÍLOPE V4.

O MIG/MAG pulsado em 73 Hz, pulso de 300 A com 4,5 ms de duração e base de 127 A com 9,2 ms de duração, corrente média de 183 A, foi o processo de soldagem aplicado. O revestimento do painel vertical seguiu a ordem de execução dos cordões de solda iniciando nas membranas, seguindo para as junções e finalizando no tubo. Todos os cordões de 2,3 m de comprimento foram executados com oscilação

transversal triangular de 2,8 Hz e tempo de parada em ambas as extremidades de 0,1 s [33].

Nos cordões de soldagem da membrana, a amplitude de oscilação da tocha foi de 11 mm, velocidade de soldagem de 30 cm/min e comprimento de oscilação de 1,8 mm. Nos cordões de solda da junção membrana-tubo, a amplitude de oscilação da tocha foi de 30,0° com velocidades de soldagem de 35 cm/min e comprimento de oscilação de 2,1 mm.

Para o revestimento de cada tubo foram usados apenas 3 cordões de solda,  $N_c=3$ , com uma superposição  $\phi$  de 12,5°. Com base na medição dos pontos P7 e P8, o ângulo  $\beta$  foi 124,6°. Com estes dados foi determinado o ângulo correspondente à amplitude de oscilação da tocha,  $\alpha=33,2^\circ$ , e os ângulos de orientação da tocha no ponto central da oscilação para cada um dos 3 cordões de solda:  $\delta_1=48,5^\circ$ ,  $\delta_2=131,5^\circ$  e  $\delta_3=90,0^\circ$ . A velocidade de soldagem utilizada para a execução destes cordões de solda do tubo foi de 42 cm/min.

A Figura 6.1a mostra o resultado do revestimento do painel, enquanto que a Figura 6.1b apresenta a macrografia do revestimento de um dos tubos do painel. Para quantificar o revestimento foi extraído da análise desta metalografia os valores quanto ao reforço (R), penetração (Pe) e diluição. O reforço medido está na faixa de  $0,7 < R < 2,2$  mm, a penetração está na faixa de  $0,4 < Pe < 1,0$  mm e a diluição calculada do revestimento foi de 28 %.

Desconsiderando o tempo gasto de instalação e de parametrização do robô, uma hora de operação revestiu aproximadamente  $0,2 \text{ m}^2$  de painel, 5h para  $1 \text{ m}^2$ . As componentes deste tempo foram: 55 minutos de soldagem, 1 minuto de deslocamento rápido da tocha para o início de cada cordão de solda e 4 minutos para a leitura de pontos.

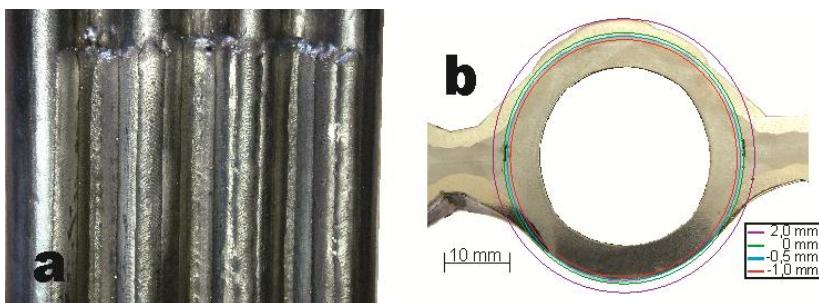


Figura 6.1. Em (a) resultado do revestimento do painel e em (b) a macrografia de um dos tubos [29]

Neste revestimento foi aplicada a sequência tradicional de cordões, e mesmo com o uso do sistema de refrigeração desenvolvido, nota-se que ainda há considerável ovalização dos tubos, sendo a diferença percentual entre o diâmetro máximo e mínimo de 4,9%, Figura 6.2.



Figura 6.2. Ovalização em tubo novo revestido com o uso do TARTÍLOPE V4

### 6.1.2. Resultados com o TARTÍLOPE VX e Soldagem com Corrente Contínua

Para o revestimento dos painéis tubulares com o TARTÍLOPE VX foi aplicado o método apresentado no item 5.7.2, onde são efetuados 15 cordões para o revestimento do painel padrão. A Figura 6.3 apresenta a marcação inicial da mediatriz dos cordões, bem como a sequência de realização dos mesmos. Na referida figura é apresentado em a a marcação da mediatriz dos três cordões. Em b a tocha posicionada para a realização do cordão I com orientação de  $-40^\circ$ , em c cordão II com orientação de  $+40^\circ$  e, por fim, em d o cordão III com orientação de  $0^\circ$ .

O material de adição foi arame de aço inox ER309L de bitola 1 mm e gás de proteção composto de 95% Ar + 3% CO<sub>2</sub> + 2% N<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min, modo de imposição de corrente elétrica contínua na polaridade inversa com corrente de 200 A, velocidade de arame de 10 m/min e posição de soldagem vertical descendente. Com o uso do arame de bitola 1,0 mm é possível estabelecer a transferência goticular com corrente mais baixa do que com o arame de 1,2 mm, o que proporciona maior sustentação à poça metálica na posição vertical. Outra vantagem

da transferência goticular é a menor influência sofrida pelo processo em virtude de variação da DBCP.

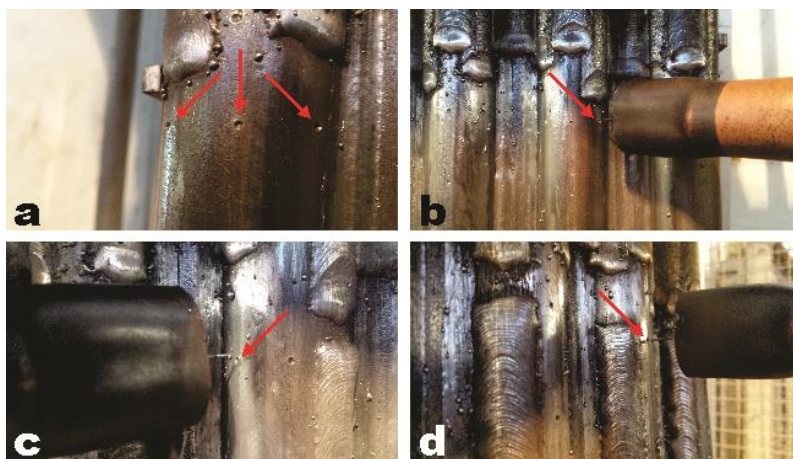


Figura 6.3. Em (a) marcação da mediatriz dos cordões, em (b) primeiro cordão da lateral, em (c) segundo cordão da lateral e (d) cordão de topo

Nas posições apresentadas na Figura 5.42 foi realizada oscilação da tocha de soldagem tangente ao tubo com frequência de 4,5 Hz e amplitude de 12 mm nos cordões I e II e de 14 mm no cordão III. Nas três situações a velocidade de soldagem foi de 40 cm/min e o comprimento de oscilação 1,5 mm. Já o cordão da membrana foi executado com amplitude de oscilação angular da tocha ( $\beta$ ) de  $16^\circ$  e frequência de 2 Hz, de acordo com a Figura 5.43. Tendo como velocidade de soldagem 12,8 cm/min e comprimento de oscilação de 1,1 mm. Com estes parâmetros de soldagem, o tempo gasto para o revestimento de  $1\text{ m}^2$  foi de 4:17 h.

A Figura 6.4a traz a superfície do painel tubular revestido. Já a Figura 6.4b, apresenta a macrografia da seção transversal. Nos tubos do painel, o reforço medido está na faixa de  $0,2 < R < 2,0$  mm, a penetração está na faixa de  $0,2 < P_e < 1,0$  mm e a diluição calculada do revestimento foi de 26,0 %. Na membrana, o reforço máximo foi de 2,9 mm, a penetração máxima foi de 1,2 mm e a diluição calculada foi de 23,6 %.

Com relação ao problema da ovalização dos tubos, nota-se que em decorrência da aplicação da sequência inovadora de cordões de solda da Figura 5.41, o problema foi amenizado. Enquanto na Figura 2.12 a

diferença percentual de diâmetro era de 8,0%, agora a diferença é de 3,2%, conforme Figura 6.5.



Figura 6.4. Em (a) superfície do painel revestido e em (b) detalhe da seção transversal



Figura 6.5. Ovalização em tubo novo revestido com o uso do MIG/MAG corrente contínua

Além da análise geométrica dos cordões, foi realizada a medição da composição química em três regiões do tubo/membrana distribuídos conforme apresentado na Figura 6.6, com um MEV.

Os teores de cromo da Figura 6.4b, considerando os pontos apresentados na Figura 6.6, foram de: 1) 19,31%, 2) 18,54% e 3)

18,60%. Dado que a medição com o MEV possui incerteza de 0,4%, considera-se que os resultados são satisfatórios e de acordo com a faixa indicada para a tarefa de revestimento de tubos de caldeiras.

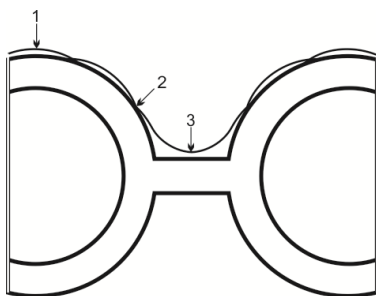


Figura 6.6. Pontos da superfície do revestimento para análise de composição química

### 6.1.3. Resultados com o TARTÍLOPE VX e Soldagem com Corrente Alternada

Mesmo com os resultados apresentados na seção anterior, os quais indicam menores velocidades de soldagem, o MIG/MAG CA foi testado no revestimento de tubos com o intuito de observar os seus resultados.

Similarmente ao efetuado no item anterior, foram utilizados 15 cordões para o revestimento do painel padrão com corrente alternada.

O material de adição foi arame de aço inox ER309L de bitola 1 mm e gás de proteção composto de 95% de Ar, 3% de CO<sub>2</sub> e 2% de N<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min, modo de imposição de corrente elétrica constante alternada com os valores: I<sub>b</sub>= 40 A; t<sub>b</sub>= 2,0 ms; I<sub>n</sub>= -130 A; t<sub>n</sub>= 2,2 ms; I<sub>p</sub>= 328 A; t<sub>p</sub>= 3,2 ms, Tabela 4.8. A velocidade de arame foi de 10,0 m/min e posição de soldagem vertical descendente.

Foi realizada oscilação da tocha de soldagem tangente ao tubo numa frequência de 3,0 Hz com amplitude de 14 mm nos cordões I, II e III, conforme a Figura 5.42. Nos cordões I e II a velocidade de soldagem foi de 32 cm/min, com comprimento de oscilação de 1,8 mm, e no cordão III foi de 30 cm/min e comprimento de oscilação de 1,7 mm. O cordão da membrana foi realizado com uma amplitude de oscilação angular da tocha ( $\beta$ ) de 9°, frequência de 2 Hz, velocidade de soldagem de 13 cm/min e comprimento de oscilação de 1,1 mm. Para o revestimento da membrana foi utilizado corrente contínua, posto que os

resultados atingidos com a corrente alternada apresentaram problemas de falta de fusão e regiões com falta de material.

Como a região mais afetada pela erosão e corrosão é a superfície dos tubos, mesmo o revestimento da membrana apresentando maior diluição não haverá prejuízos à operação como um todo. Com estes parâmetros de soldagem o tempo gasto para o revestimento de  $1 \text{ m}^2$  foi de 4:56 h.

A Figura 6.7a apresenta a superfície do painel tubular revestido. Já a Figura 6.7b mostra a macrografia da secção transversal. Nos tubos do painel, o reforço está na faixa de  $0,9 < R < 2,6 \text{ mm}$ , a penetração está na faixa de  $0,1 < P_e < 0,7 \text{ mm}$  e a diluição calculada do revestimento foi de 20,1 %. Na membrana, o reforço máximo foi de 2,7 mm, a penetração máxima foi de 1,1 mm e a diluição calculada foi de 22,5 %.

Quanto à ovalização, a Figura 6.8 apresenta as medidas atingidas com a nova técnica de oscilação e com o MIG/MAG CA. A diferença percentual entre os diâmetros foi de 0,7%.



Figura 6.7. Em (a) superfície do painel revestido e em (b) detalhe da seção transversal

Os teores de cromo da Figura 6.7b, considerando os pontos apresentados na Figura 6.6, foram de: 1) 20,25%, 2) 18,75% e 3) 21,00%. Os percentuais de cromo no ensaio com o MIG/MAG CA foram maiores do que como MIG/MAG CC, credita-se isto ao fato de que nestes ensaios os cordões apresentaram maior reforço e menor penetração.



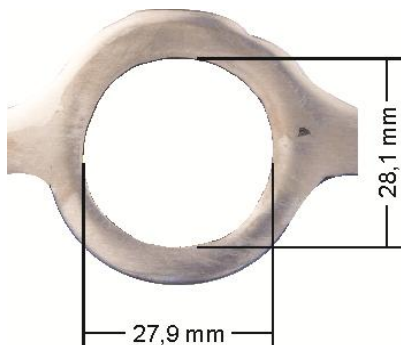


Figura 6.8. Ovalização em tubo novo revestido com o uso do MIG/MAG CA

## 6.2. Aplicação em Campo

Para avaliar e validar o equipamento e procedimento perante as condições as quais estes estarão submetidos quando em operação efetiva, foi conduzida uma aplicação em campo. Esta foi realizada na TRACTEBEL Energia, especificamente na oficina do complexo Jorge Lacerda em Capivari de Baixo, SC.

Foi construída uma bancada para a instalação dos corpos de prova na posição vertical, e foram fixados o painel tubular com sistema de refrigeração e o TARTÍLOPE VX, Figura 6.9.

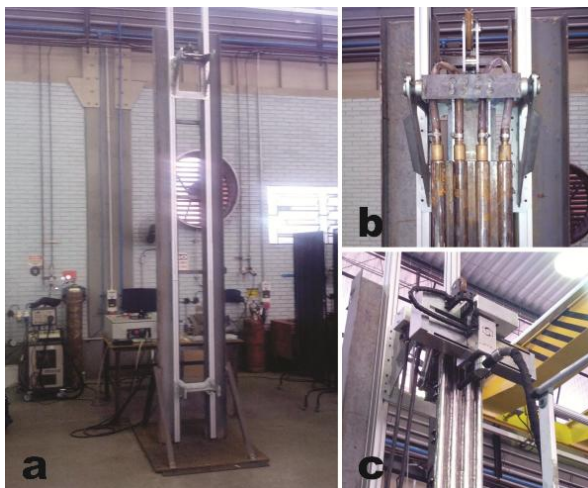


Figura 6.9. Em (a) bancada na posição vertical, em (b) painel com sistema de refrigeração e em (c) TARTÍLOPE VX sobre o painel



Após a montagem de toda estrutura, foram iniciados os ensaios de soldagem. Os parâmetros e a metodologia empregada foram idênticos ao exposto no item 6.1.2 da presente tese. Como era esperado, ao longo da soldagem o painel foi sofrendo empenamento, contudo, em virtude do uso do trilho flexível, isto não gerou problemas na soldagem.

Com a soldagem dos cordões nas laterais dos tubos, partiu-se para os cordões de topo, os quais apresentam maior amplitude de oscilação da tocha. Neste caso, a primeira metade do primeiro cordão apresentou estabilidade na soldagem e acabamento adequado. Entretanto, depois da metade do cordão houve instabilidade na soldagem e defeitos no revestimento.

Como solução, durante a execução dos próximos dois cordões, foi realizado o monitoramento da tensão na fonte, e quando esta diminuiu, manualmente a velocidade do arame foi reduzida. Com isto obteve-se bom acabamento nos dois cordões finais.

Com o término da soldagem, o painel foi retirado da bancada. O mesmo estava empenado, Figura 6.10a, e posteriormente necessitou passar por uma calandra. Contudo, o painel apresentou uma flecha de 20 cm, ou seja, 33% menor do o observado no revestimento manual apresentado na Figura 2.11, caracterizando um ganho em virtude dos métodos e equipamentos empregados. Na Figura 6.10b verifica-se o acabamento superficial do revestimento. Não foi possível realizar estudos macrográficos ou medição do teor de cromo na superfície, pois o painel ficou com a TRACTEBEL Energia e será empregado na substituição de painéis no interior da caldeira 7.

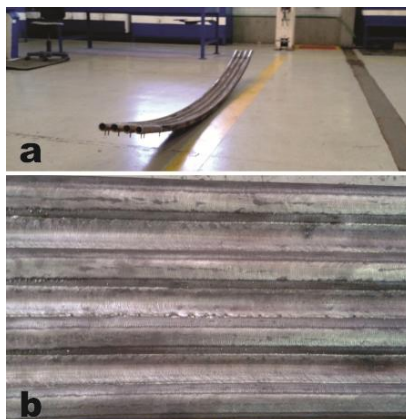


Figura 6.10. Em (a) painel empenado após o revestimento e em (b) detalhe do revestimento

### 6.3. Comparações dos Revestimentos

#### 6.3.1 Geometria do Revestimento

A comparação dos resultados leva em consideração os ensaios com o TARTÍLOPE V4 usando o método tradicional de sequência de cordões, ensaio 1, e os testes com o TARTÍLOPE VX empregando a nova sequência de soldagem e o MIG/MAG com corrente constante, ensaio 2, e com corrente alternada, ensaio 3.

A Figura 6.11 apresenta os reforços máximos e mínimos dos ensaios. Como era esperado, o experimento com corrente alternada apresentou os maiores valores de reforço, indo de acordo com Figura 2.28, que indica que o aumento do percentual de corrente negativa proporciona um cordão com mais reforço. A soldagem com o TARTÍLOPE VX e corrente contínua apresentou os menores índices de reforço, o que é o mais indicado para o revestimento. Estes resultados ficaram dentro da faixa estabelecida pelo EPRI, com reforço menor do que 3,18 mm.

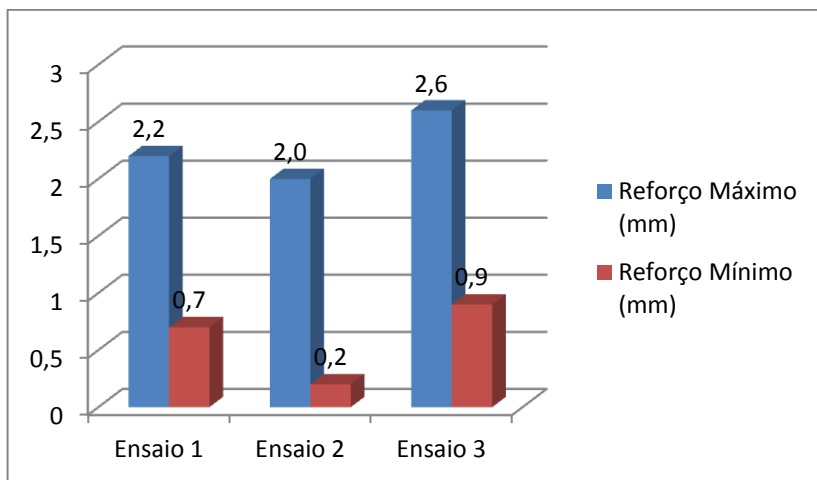


Figura 6.11. Reforços

Com relação à penetração, assim como no caso do reforço, seguiu-se o indicado pela Figura 2.28 e a inclusão de um período com corrente negativa fez com que a penetração fosse reduzida. Desta forma, o experimento com o TARTÍLOPE VX e a corrente alternada

apresentou os índices mais baixos de penetração. Os demais ensaios indicaram valores similares, Figura 6.12. Considerando os limites do EPRI, os valores médios das penetrações estão dentro do intervalo estipulado.

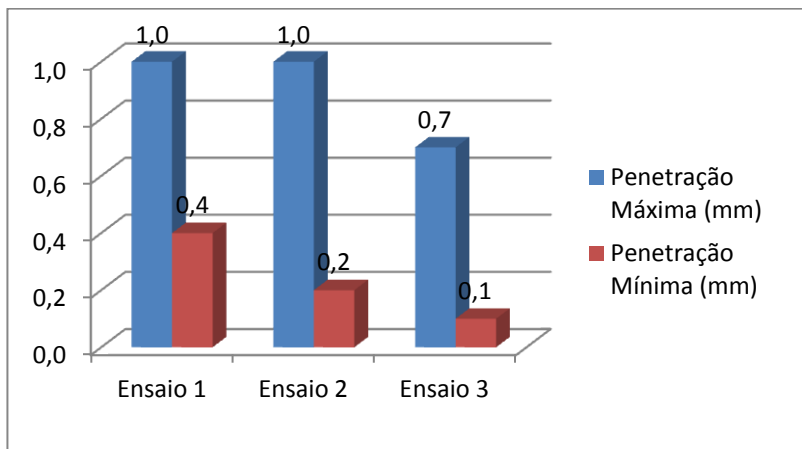


Figura 6.12. Penetrações

Os valores de diluição dos revestimentos são apresentados na Figura 6.13. O menor valor foi encontrado no procedimento com o MIG/MAG CA, posto que o mesmo apresenta o maior reforço e a menor penetração. Em comparação ao EPRI, os valores ficaram entre 5 e 10% acima dos pré-definidos.

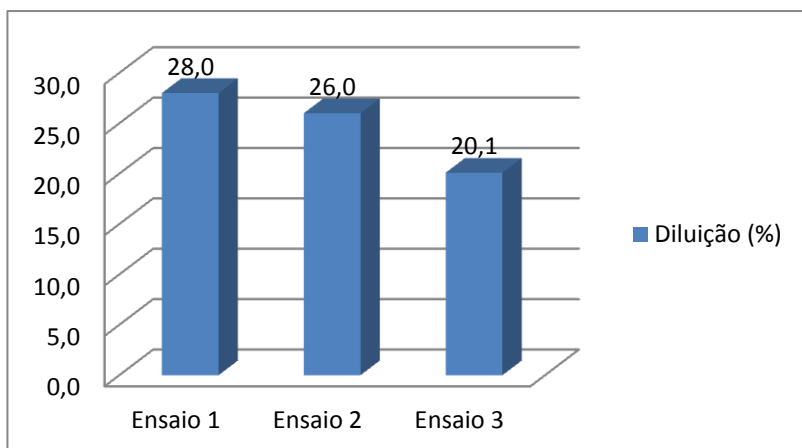


Figura 6.13. Diluições

### 6.3.2 Ovalização dos Tubos

A Figura 6.14 traz as medidas dos diâmetros dos tubos em quatro situações analisadas. Nota-se que a variação do diâmetro interno do tubo, que originalmente é de 28 mm, é maior no método tradicional, onde a sequência dos cordões é iniciada pela membrana e finalizada no topo do tubo. Com a utilização da nova sequência de soldagem, a ovalização foi reduzida, o que contribui para a diminuição na deformação total do painel padrão e facilita a união dos tubos novos com os já instalados na caldeira, o que colabora para o fluxo de água em seu interior.

Dentro do novo método, a soldagem com corrente alternada apresentou menor ovalização do que com corrente contínua. Este fato vai de acordo com os resultados de penetração e diluição, onde a corrente alternada também apresentou valores menores. Assim, a soldagem com o MIG/MAG CA, em conjunto com a nova sequência, foi a que interferiu menos nas características geométricas dos tubos.

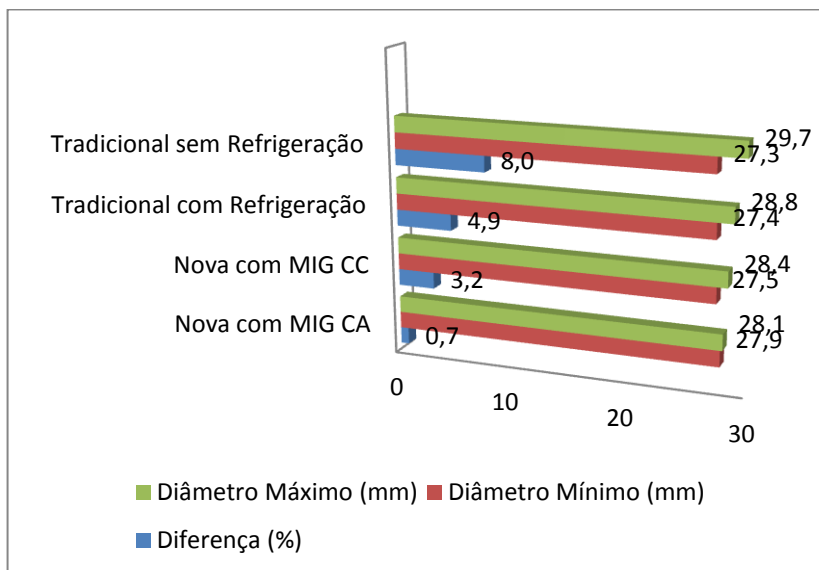


Figura 6.14. Ovalização nos diferentes métodos de revestimento

## 6.4. Discussão dos Resultados

No âmbito deste trabalho, cita-se como resultado o desenvolvimento e construção de um sistema robótico dedicado ao

revestimento de painéis tubulares de caldeiras de usinas termelétricas. Este robô, TARTÍLOPE VX, tornou mais robusta à execução dos trabalhos em tubos de caldeira, sobretudo por viabilizar o emprego de diferentes variações do processo MIG/MAG, em virtude de sua elevada dinâmica de deslocamento da tocha. Esta por sua vez, possibilitou elevar as velocidades de soldagem e, conseqüentemente, reduzir o tempo final de revestimento de um painel. Adicionalmente, o robô pode ser aplicado no desenvolvimento de futuros trabalhos de pesquisa.

Excelentes resultados foram obtidos com relação à avaliação geral do revestimento. As análises dos três métodos empregados são satisfatórias, uma vez que produziram revestimentos sem defeitos. Contudo, observou-se algumas diferenças entre eles. O revestimento com o TARTÍLOPE V4 é o mais demorado, com maior diluição e maior penetração média, o que é decorrente, principalmente, de suas limitações mecânicas. Por estas características, considera-se que este procedimento não é o mais adequado para o revestimento dos painéis tubulares.

Na comparação entre os procedimentos efetuados com o TARTÍLOPE VX há prós e contras tanto para o modo com corrente contínua, quanto para a corrente alternada. A corrente contínua proporciona revestimento em menor tempo, logo apresenta maior produtividade, e com menor reforço. Por fim, ainda apresenta menor quantidade de respingos finos, se comparado a corrente alternada.

Já no revestimento com corrente alternada, a diluição é significativamente menor, assim como a penetração média. Adicionalmente, apresenta percentuais mais elevados de cromo na superfície. Deste modo, a expectativa é que o revestimento com corrente alternada seja mais resistente aos efeitos da erosão e corrosão, tendo vida útil maior do que o revestimento com corrente contínua.

A aplicação da metodologia desenvolvida, com a nova sequência de realização dos cordões e o sistema de resfriamento dos tubos, no revestimento automatizado dos painéis, produz superfícies com qualidade geométrica superior, se comparado com as superfícies revestidas pelos processos manuais de soldagem ou pelas antigas técnicas de revestimento automatizado. Cabe destacar também que a ovalização dos tubos foi consideravelmente reduzida com a aplicação das tecnologias desenvolvidas ao longo do presente trabalho, sendo reduzida de 8,0% para 0,7%.

Além dos avanços relacionados ao revestimento dos tubos, a nova técnica de oscilação pendular da tocha para o revestimento da membrana proporcionou a redução no número total de cordões realizados em um painel. Assim, houve aumento da produtividade, e ao mesmo passo

reduziu o risco de falhas, tendo em vista que são efetuados menos cordões.

Com relação às técnicas de oscilação da tocha, conclui-se que trabalhar com comprimentos de oscilação menores do que 2,25 mm é fundamental para proporcionar um revestimento mais uniforme. Tem-se também, que elevadas velocidades de oscilação proporcionam melhor distribuição de calor na peça, o que produz uma poça metálica menor, bem como reduz o escorrimento, quando a operação é efetuada na posição vertical descendente. Ainda com relação à oscilação da tocha, mesmo com o movimento tangente ao tubo e havendo pequena variação na DBCP não se notou instabilidades no arco elétrico durante a operação, principalmente diante de ter-se trabalhado com elevados comprimentos de arco.

Conclui-se que o novo sistema robótico juntamente com a metodologia de soldagem desenvolvida, é uma grande contribuição tanto para o aumento da produtividade quanto para o melhoramento da qualidade dos revestimentos em paredes tubulares de caldeiras. Outra consequência deste desenvolvimento é o aumento da disponibilidade das usinas termelétricas que se verifica de duas formas. A primeira se dá pelo aumento da confiabilidade via o incremento do tempo médio entre reparos e a segunda se dá pela elevação da manutenibilidade por redução do tempo de execução do revestimento.

Os ganhos supracitados são proporcionados pela redução do número de cordões de solda, os quais são executados com menor reforço e penetração devido ao uso de uma maior amplitude de oscilação da tocha. A constatação da redução do empenamento do painel revestido, a minimização da ocorrência de respingos devido à estabilidade do arco e a ausência de mordeduras e de falta de fusão são as outras vantagens proporcionadas por estes desenvolvimentos.

Destaca-se ainda que, durante o revestimento de painéis em oficina foi verificado facilidade no transporte, instalação e operação do equipamento. Somando-se isto aos resultados de soldagem, considera-se que o sistema e as tecnologias estão aptos para serem aplicadas na indústria.

## 7. CONCLUSÕES

Os procedimentos automatizados elaborados para o revestimento de painéis, que foram desenvolvidos no âmbito deste trabalho, são inovadores. Na literatura pesquisada, até o momento de produção deste texto, não se encontrou nenhum registro que tenham sido estudadas e aplicadas em conjunto às formas de trajetórias de soldagem e procedimentos de maior produtividade na posição vertical descendente neste tipo de revestimento, fato que garante o caráter inédito desta pesquisa.

O trabalho, aqui apresentado, representou um esforço associativo de várias áreas do conhecimento em engenharia. Por ter um compromisso principal na solução de um problema de alta complexidade numa área multidisciplinar, eletrônica, mecânica e automação, da engenharia, o trabalho requereu, inclusive, a aquisição de sensibilidades inerentes a soldadores de alta experiência prática. Isto foi especialmente requerido na determinação do procedimento de soldagem.

Para que o trabalho fosse realizado, vários passos intermediários tiveram que ser realizados, entre eles, adequações no TARTÍLOPE V4, o qual passou a ter maiores velocidades de deslocamento e certamente é mais um produto deste trabalho. Foi com auxílio deste robô que foram realizados alguns ensaios constantes neste texto.

Os objetivos propostos, citados na introdução deste trabalho, foram atingidos, conforme atestam os resultados apresentados no capítulo anterior, cabendo aqui alguns destaques:

- A metodologia de revestimento desenvolvida foi validada por intermédio de experimentos em laboratório e em campo. A mesma proporcionou redução na ovalização dos tubos e no número total de cordões necessários para o revestimento de um painel;

- O TARTÍLOPE VX mostrou-se eficiente para a soldagem em campo durante grandes períodos. O fato de viabilizar elevadas velocidades de deslocamento, principalmente nas juntas prismáticas Y e Z, foi fundamental para os procedimentos com frequência de oscilação de tocha na ordem de 4 Hz;

- A soldagem na posição vertical, embora dificulte a instalação inicial do painel e do equipamento, apresentou melhores resultados do que na posição plana. Adicionalmente, os procedimentos elaborados no trabalho podem ser realizados em tubos já instalados em caldeiras, fato

que não seria viável caso o desenvolvimento tivesse ocorrido na posição plana;

- A utilização do processo MIG/MAG com corrente alternada mostrou-se uma alternativa interessante para o revestimento na posição vertical descendente. Mesmo com ensaios exploratórios o procedimento apresentou-se robusto e com resultados promissores;

- Contrariando o exposto na literatura, a técnica elaborada com elevada oscilação da tocha de soldagem tornou possível a utilização do MIG/MAG com transferência goticular na soldagem fora de posição. Além disto, embora tal modo de transferência seja indicado para preenchimento de chanfros e alta penetração, teve-se resultados satisfatórios quando aplicado no revestimento;

- O sistema de refrigeração dos tubos foi importante para que a aplicação de elevadas correntes de soldagem pudesse ser utilizada por longos períodos na posição vertical sem que o material escorresse. O resfriamento do metal de base contribuiu também para a redução da penetração e diluição dos revestimentos;

- Os índices de teor de cromo na superfície dos revestimentos estão próximos a 20%, conforme indicado na literatura. Isto faz com que o revestimento tenda a ter maior resistência à corrosão e erosão.

O revestimento realizado nos painéis é aceitável, tanto do ponto de vista geométrico, quanto do ponto de vista das discontinuidades e da composição química presentes nas superfícies dos depósitos.



## 8. TRABALHOS FUTUROS

A metodologia desenvolvida, o sistema robótico e o processo de revestimento com MIG/MAG, em corrente contínua e alternada, que foram aqui apresentados, poderão servir como ponto de partida para futuros trabalhos nas áreas: de geração de trajetórias, de soldagem robotizada e de procedimentos de soldagem.

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

- Pesquisar a viabilidade de inserção de um sensor óptico a laser para a correção de trajetória. O objetivo é que pequenas alterações na trajetória sejam feitas de forma automática, reduzindo a possibilidades de erros do operador;

- Desenvolver procedimentos que utilizem o robô desenvolvido para realizar a soldagem de união entre o tubo e a membrana. Assim, o tempo total de montagem e revestimento do painel seria reduzido e haveria maior confiabilidade em tal união;

- Desenvolver um novo mecanismo rotacional, para o manipulador, que mantenha a junta rotacional A, em torno da junta prismática X, e adicione uma junta rotacional B, em torno da junta prismática Y, viabilizando soldar com distintos ângulos de ataque da tocha;

- Aprofundar os estudos do MIG/MAG com corrente alternada para revestimento. O intuito é tentar elevar as velocidades de soldagem com esta variante, bem como reduzir o reforço dos cordões. Isto aumentaria os benefícios na aplicação deste no revestimento de painéis;

- Pesquisar a viabilidade de pré-deformar os painéis antes do revestimento. Com isto, durante a soldagem o painel se deformaria no sentido oposto e ao término do revestimento não seria necessário desempenhar o mesmo na calandra;

- Estudar a viabilidade de aplicação de variantes do processo MIG/MAG controladas, por exemplo, o CMT, as quais propõem uma soldagem com maior estabilidade, bem como apresentando menor sensibilidade a variações na geometria da peça;

- Estudar a possibilidade de aplicação do TOP TIG para a posição de soldagem vertical descendente.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMADOR, P., LAI, G. **Application of Unifuse Overlay Tubes in the Convection Section of Waste-To-Energy Boilers**, 11th North American Waste to Energy Conference, 2003.
- [2] BRUMBAUGH R., NEWELL, W. **Application and Repair of Overlay Welds EPRI Technical Update**, April 2005.
- [3] LAI, G. **Fireside Corrosion and Erosion/Corrosion Protection in Coal-Fired Boilers**. Corrosion 2004, NACE.
- [4] BLOGG, N., BROOKS, R. **Innovative Technique Developed as Permanent Solution to Fireside Waterwall Erosion/Corrosion issues within Fossil Fired Power Boilers**, Power Generation Europe 2002.
- [5] DUTRA, J. C., FELIPPE, L., CARVALHO, R. S. **Sistema Robótico com Quatro Graus de Liberdade e Processos de Soldagem Dedicados para o Revestimento de Tubos de Caldeiras**. V CITENEL. Belém. 2009.
- [6] TILLEY, R. **Inherently Reliable Boiler Component Design – Waterwall Fireside Corrosion**. EPRI – Electric Power Research Institute – Final Report 1004324. March 2003.
- [7] KORIPPELLI, R. S., et al. **The Role of Fireside Corrosion on Boiler Tube Failures - Part II**. COAL POWER Magazine, junho 2010.
- [8] BAKKER, W. et al. **Waterwall Wastage Mechanisms in Coal-Fired Boilers - The Effect of Coal Chemistry on Waterwall Wastage**. EPRI Final Report, November 2001
- [9] KUNG, S. C. **Effect of Iron Sulfide on Furnace Wall Corrosion**. Final Report, December, 2006
- [10] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional – 2012 (Ano base 2011)**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2012.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf)>. Acesso em: 04 de setembro 2013.
- [11] GAO, X., et al. **Multifunctional robot to maintain boiler water-cooling tubes**. Robotica (Cambridge University Press), vol. 27, 2009, p.941-948.
- [12] DOOLEY, B. **Manual of Investigation and Correction of Boiler Tube Failures**. Report CS-3945. Electric Power Research Institute, p. 1-14, Palo Alto, California, April, 1985.
- [13] MURPHY, J. et al. Pourin Welding Engineering CO. **Weld overlay structure and a method of providing a weld overlay structure**. Int CI<sup>B23K</sup> 9/04. US2012/0214017A1. 22 feb. 2011, 23 ago. 2012.

- [14]COLEMAN, K. **Application and Repair of Overlay Welds**. Report 1009755. Electric Power Research Institute, p. 1-35, Palo Alto, California April 2005.
- [15]BLOGG, N., BROOKS, R. **Innovative Technique Developed as Permanente Solution to Fireside Waterwall Erosion / Corrosion Issues within Fossil Fired Boilers**. WSE UK and NL. Power Gen Europe. 2002.
- [16]ROEHL, C., STANZEL, K.. **Improved Pulsed Gas Metal Arc Welding Nets Higher Productivity**. Welding Journal p. 38 - 41, July 2008.
- [17]PIRES, J. N., LOUREIRO, A., BOLMSJÖ, G. **Welding Robots: Technology, System Issues and Applications**. London: Springer, 2006.
- [18]BONACORSO, N. G. **Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando a recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte**. Florianópolis: Tese de doutorado. Dept. de Eng. Mecânica, Ago. 2004. 114 p.
- [19]BOLMSJO, G., OLSSON, M., CEDERBERG, P. **Robotic Arc Welding - Trends and Developments for Higher Autonomy**. Industrial Robot, v. 29, n. 2, p. 98 – 104, 2002.
- [20]CHEN, X., DEVANATHAN, R., FONG, A.. **Advanced automation techniques in adaptive material processing**. London: World Scientific, 2002. 302 p.
- [21]CARY, H.B., HELZER, S.. **Modern Welding Technology**. Prentice Hall, 2004. 6th edition. 736 p.
- [22]SCIAVICCO, L., SICILIANO, B. **Modelling and control of robot manipulators**. London: Springer, 2004. 378 p.
- [23]SANGDEOK, P., JEONG, H.D., LIM, Z.S.. **Development of mobile robot system for automatic diagnosis of boiler tubes in fossil power plants and large size pipelines**. Internacional Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland. p. 1880-1885. 2002.
- [24]CARVALHO, R. S. **Robô CNC para a Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade**. 2009. 136 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [25]CARVALHO, R.S.; DUTRA, J. C.; FELIPPE, L.; BONACORSO, N. G. **Desenvolvimento de tecnologia para o revestimento de tubos de paredes de caldeiras de termelétricas**. V Congresso Brasi-

- leiro de Engenharia de Fabricação. Belo Horizonte - MG. Abril de 2009.
- [26] CARVALHO, R.S.; DUTRA, J. C.; FELIPPE, L. **Sistema robótico de quatro graus de liberdade e processos de soldagem dedicados para o revestimento de tubos de caldeiras.** V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL). Belém-PA. Junho de 2009.
- [27] CARVALHO, R. S., DUTRA, J. C., BONACORSO, N. G. **Desenvolvimento de um manipulador CNC robótico para a recuperação por soldagem dos tubos das caldeiras de termelétricas.** 63º Congresso Anual da ABM, 2008, Santos, SP, Brasil. Anais do 63º Congresso Anual da ABM, 2008.
- [28] MOTOMAN. **Motoman MA1400 arc weld robot.** Disponível em: <<http://www.motoman.com/datasheets/MA1400.pdf>>. Acesso em: 30 de abril de 2014.
- [29] DUTRA, J. C.; BONACORSO, N. G.; SILVA, R. H. G.; CARVALHO, R. S.; SILVA, F. C.. **Development of a flexible robotic welding system for weld overlay cladding of thermoelectrical plants- boiler tube walls.** Mechatronics (Oxford), v. 24, issue 5, p. 416-425, August 2014.
- [30] GULLCO KAT. **Overlay welding gantry system for all positions.** Disponível em: <<http://pdf.directindustry.com/pdf/gullco-international/automatic-overlay-welder/57995-148740.html>>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2014.
- [31] BUG-O SYSTEMS. **All position overlay system.** Disponível em: <[http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/Overlay\\_Bro\\_4\\_13\\_1364824164.pdf](http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/Overlay_Bro_4_13_1364824164.pdf)>. Acesso em: 31 de janeiro de 2014.
- [32] BUG-O SYSTEMS. **All position overlay system.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gsz4oLbxqks>>. Acesso em: 08 de outubro de 2014.
- [33] SILVA, F. C. **Desenvolvimento de algoritmos para geração de trajetórias de revestimento por soldagem automatizada aplicados em caldeiras de usinas termelétricas.** 2012. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [34] NORRISH, J. **Advanced welding processes: technologies and process control.** 3 ed. Woodhead Publishing in Materials: Cambridge - England, 2006, 288 p.
- [35] REZAKHANI, D. **Corrosion behaviours of several thermal spray coating s used on boiler tubes at elevated temperatures.** 2007. Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

- [36]POLAK, R. et al. **Thermal Spraying between erosion and corrosion challenges**. 2008. Terolab Surface Ltd. (TSL), Vienna.
- [37]PACCHIAROTTI, A. **Advanced Weld Overlay Technology for Pressure Vessels and Boilers Minutes of the EFC WP15**. Corrosion in the Refining Industry, Março 2006.
- [38]LAI, G., et al. **Use of Pulse Spray Gas Metal Arc Weld Overlay Technology for Boiler Tube Protection Against Corrosion and Erosion**, Welding Services, Inc.
- [39]MASTEEL. **EN 10028: 2: 2006 – 16Mo3**. Disponível em: <<http://www.masteel.co.uk/16mo3.htm>>. Acesso em: 30 de setembro de 2014.
- [40]MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.C. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 2005, 362 p.
- [41]SCOTTI, A. **Process Modelling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW**. PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, UK, 1991.
- [42]BROERING, C. E. **Desenvolvimento de Sistemas para a Automação da Soldagem e do Corte Térmico**. Florianópolis: Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, Fev. 2005. p. 96.
- [43]SILVA, F. C. et al. **Nova Técnica de Tecimento Aplicado na Soldagem Automatizada de Revestimento das Paredes Tubulares das Caldeiras de Termelétricas**. XXXVI CONSOLDA, Recife, Out. 2010.
- [44]LUCAS, R. P. **Sistema de Geração de Trajetórias em Manipulador Cartesiano para Aplicações em Soldagem Naval**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [45]MODENESI, P. J. **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, 2001. p. 25.
- [46]SOARES, H. C. G. **Estudo de sequência de soldagem para redução e eliminação de distorções**. 2006. 95 p. Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [47]GRAIG, E. et al. AquileX Corp. **Method and system for weld bead sequencing to reduce distortion and stress**. Int CI<sup>B23K</sup> 31/02. US007703660B2. 9 ago. 2007, 27 abr. 2010.
- [48]BAKKER, W. **Materials solutions for waterwall wastage - an update**. EPRI, Palo Alto, CA, USA, 2005.

- [49]LAI, G. **Performance of automatic GMAW overlays for waterwall protection in coal-fired boilers.** Conference Proceedings: EPRI-RRAC Fifth International Conference on Welding and Repair Technology for Power Plants, EPRI, Palo Alto, CA, USA, 2002, p. 225-242.
- [50]STRYKOWSKI VON, D. Baumgarte Boiler Systems&Services. **Verfahren und Vorrichtung zum Schweisplatieren.** Int CI<sup>B23K</sup> 9/04. EP 1 486 284 A1. 13.06.2003, 14.06.2004.
- [51]TERRES, C. J. **Avaliação de Revestimentos de aços Inoxidáveis Depositados por Aspersão Térmica.** 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [52]SILVA, R. H. G. **Inovações em Equipamentos e em Parametriação no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P).** 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [53]REIS, R.; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma.** Artliber Editora, 1ª ed., 2007. ISBN 978-85-88098- 39-8. 147p.
- [54]ALVES, J. A. **Desenvolvimento de um Sistema d Alimentação de Consumíveis em Pó para Soldagem PTA-P com Capacidade para Manipulação de Ligas Experimentais e Transporte em Oposição à Gravidade.** 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [55]SCOTTI, A., PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG – Melhor entendimento, melhor desempenho.** Ed. Artliber, São Paulo, 2008, 284 p.
- [56]GOHR JR., R. **Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG.** Florianópolis: Tese de doutorado. Dept. de Eng. Mecânica, Set. 2002. 165 p.
- [57]BAIXO, C. E. I. **Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco visando sua aplicação em procedimentos de reparo submarino.** Florianópolis: Tese de doutorado. Dept. de Eng. Mecânica, Dez. 1999. 191 p.
- [58]SCOTTI, A., PONOMAREV, V., LUCAS, W.. **A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding.** Journal of Materials Processing Technology, v. 212, p. 1406 – 1413, 2012.
- [59]IORDACHESCU, D., QUINTINO, L. **Steps toward a new classification os metal transfer in gas metal arc welding.** Journal of Materials Processing Technology, v. 202, p. 391 - 397, 2008.

- [60] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicado ao passe de raiz**. Florianópolis: Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, Fev. 2005. 127 p.
- [61] BARRA, S. R. **Influência dos Procedimentos de Soldagem Sobre a Resistência à Cavitação de Depósitos Obtidos com a Utilização de Arames Tubulares de Aços Inoxidáveis Ligados ao Cobalto**. 1998. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [62] IORDACHESCU, D., LUCAS, W., PONOMAREV, V. **Reviewing the “classification for metal transfer”**. IIW Doc., No XII-1888-06, 2006. 10 p.
- [63] LOPERA, J. E. P., ALFARO, S. C. A., MOTTA, J. M. S. T. **Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW**. Soldagem e Inspeção, v. 17, n. 4, p. 335 – 346, Out/Dez 2012.
- [64] FRONIUS. **CMT: Cold Metal Transfer**. Disponível em: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-16FC0973-6DEFEAF4/fronius\\_brasil/CMT\\_cold\\_metal\\_transfer\\_pt.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-16FC0973-6DEFEAF4/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf)>. Acesso em: 22 de novembro de 2014.
- [65] SANTOS, T. F. **Soldagem MIG com corrente alternada – MIG CA**. Florianópolis: Tese de doutorado. Dept. de Eng. Mecânica, Abril. 2008. 116 p.
- [66] HILTUNEM, V.; PIETIKÄINEN, J. **Investigations and Observations on Material Transfer in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding**. Arc Physics and Weld Pool Behaviour. p. 147-163, 1979.
- [67] SOUZA, D.; ALVES, A.R.; SCOTTI, A. **Um Modelo Qualitativo Para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIGMAG**. Anais do 4º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia da Fabricação, Estância de São Pedro SP, Abril, 2007. CD ROM.
- [68] MULLIGAN, S.J. **Pulsed MIG Arc Welding Processes for Joining of Thin Sheet Aluminium**. The Welding Institute – TWI, July, 2003.
- [69] IMC SOLDAGEM. **MTE DIGITEC 450/600 – Manual de Instruções - 5ª Edição**. Disponível em: < <http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/digitec.zip>>. Acesso em: 02 de agosto de 2014.
- [70] KINDERMANN, R.M.; Carvalho, R. S.; Dutra, J. C.; Bonacorso, N. G.. **Estudo sobre a Influência da Frequência de Tecimento das Características dos Cordões em Operações de Revestimento**

- de Modo Automatizado.** 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 11 a 15 de abril de 2011 – Caxias do Sul – RS – Brasil.
- [71]MOTOMAN. **Industrial Robot MOTOMAN-UP6.** Disponível em: <[http://www.micromech.co.uk/dir\\_products/pdf/motoman/up6-series\\_robot.pdf](http://www.micromech.co.uk/dir_products/pdf/motoman/up6-series_robot.pdf)>. Acesso em: 04 de agosto de 2014.
- [72]CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica.** McGraw-Hill, 2.ed, 1986. São Paulo, Brasil.
- [73]CORRÊA, M. A. **Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco.** 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [74]HEAT-INPUT. **Control Limits Distortion and Spatter.** Welding Design and Fabrication. p. 20-22, Aug. 1999.
- [75]FILHO, H. D. SILVA, R. H. G. DUTRA, J. C. **Estudo dos Processos de Soldagem MIG/MAG com Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente Utilizando a Termografia.** XXXIX CONSOLDA, Curitiba, Nov. 2013.
- [76]KIESE, M. HALLE, S. V. **Neue Verfahren zur Erkennung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten beim Lichtbogenschweißen.** Deutscher Verband für Schweißen 244. p. 471 – 475.
- [77]FLIR SYSTEMS. **FLIR SC7000.** Disponível em: <<http://www.flir.com/thermography/americas/us/content/?id=18360>>. Acesso em: 06 de agosto de 2014.
- [78]FLIR SYSTEMS. **Infrared Imaging Software Suite for Research and Development Applications.** Disponível em: <[http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography\\_APAC/Products/Product\\_Literture/ALTAIR%20Leaflet%20APAC.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/ALTAIR%20Leaflet%20APAC.pdf)>. Acesso em: 06 de agosto de 2014.
- [79]PUHL, E. B. **Desenvolvimento de tecnologias no processo MIG/MAG para aumento de produtividade e melhoria da qualidade mediante o uso da polaridade negativa.** 2011. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [80]ESSERS, W. G. A. W. R. **Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding.** Arc Physics and Weld Pool Behaviour, 1979. 289-300.
- [81]SILVA, R. H. G. e et al. **Elevada performance na fabricação e revestimento de paredes de caldeiras.** Anais VII CITENEL e III SEENEL. Rio de Janeiro, 2013. 10 p.



- [82]OKUYAMA, M. P. et al . **Engenharia de usabilidade aplicada no desenvolvimento de um sistema interativo para soldagem robótica.** Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 17, n. 4, dez. 2012.
- [83]PANASONIC. **Instruction Manual - AC Servo Motor and Driver - MINAS A4 Series.** Disponível em: <[http://industrial.panasonic.com/ww/i\\_e/25000/minas\\_a4\\_e/minas\\_a4\\_e.pdf](http://industrial.panasonic.com/ww/i_e/25000/minas_a4_e/minas_a4_e.pdf)>. Acesso em: 09 de setembro de 2014.
- [84]ART SOFT. **Using Mach3 Mill.** Disponível em: <[http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/02/Mach3Mill\\_Install\\_Config.pdf](http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/02/Mach3Mill_Install_Config.pdf) >. Acesso em: 21 de abril de 2014.
- [85]IMC SOLDAGEM. **DIGIPLUS A7 – Manual de Instruções - 3ª Edição.** Disponível em: <[http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/manual\\_Digiplus\\_3aEd.pdf](http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/manual_Digiplus_3aEd.pdf)>. Acesso em: 01 de outubro de 2014.
- [86]BAKKER, W. **Long-Term Testing of Protective Coatings and Claddings at Allegheny Energy Supply Hatfield's Ferry #2 Boiler,** EPRI, Palo Alto, CA, USA, 2000.
- [87]SHERLOCK, T. P. et al. **State of Knowledge Assessment for Accelerated Waterwall Corrosion with Low NOx Burners.** EPRI, Palo Alto, CA, USA, 1997.
- [88]SILVA, C. C.; NETO, A. B. S.; SILVA, F. D. A.; JÚNIOR, F. E. S. F.; FARIAS, J. P. **Soldagem de Tubos de Aço ASTM A106 Gr. B para serviço em alta temperatura - Parte 1- Análise das Tensões Residuais** Soldagem & Inspeção, vol 13, p. 128 - 140. 2008.
- [89]KOU, S. **Welding Metallurgy,** 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2002.
- [90]MASUBUCHI, K. **Residual stress and distorsion, Metals Handbook,** 9th ed., vol 6. 1983. Metals Park, OH, American Society for Metals - ASM.
- [91]FRANCIS, J.A.; STONE, H.J.; KUNDU, S.; ROGGE, R.B.; BHADESHIA, H.K.D.H.; WITHERS, P.J.; KARLSSON, L. **Transformation Temperatures and Welding Residual Stresses in Ferritic Steels.** In: Proceedings of PVP2007 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. July 22-26, 2007, San Antonio, Texas.
- [92]MELO, R.H.F. et al . **Avaliação do campo de tensões residuais por difração de raios - X utilizando o método do  $2\psi$  em revestimentos metálicos do aço inoxidável E308-L.** Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 18, n. 1, Jan. 2013.
- [93][BONACORSO, N. G., NOLL, V., GEVAERD, B. M. **Desenvolvimento de um drive didático para acionamento de motores de**

- passo aplicados ao ensino de eletrônica e mecatrônica.** Revista Eletrônica de Potência, v. 13, n. 2, p. 117-123, Mai. 2008.
- [94] PARKER AUTOMATION. **Tecnologia eletromecânica – apostila 1600.231.01.** Jacareí, 2003. 60 p.
- [95] KLAFTER, R.D., CHMIELEWSKI, T. A., NEGIN, M. **Robotic engineering – an integrated approach.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 744 p.
- [96] SMID, P. **CNC programming handbook.** 3. ed. New York: Industrial Press, 2007. 600 p.
- [97] SUH, S. H., KANG, S. K., CHUNG, D. H., STROUND, I. **Theory and design of CNC systems.** London: Springer, 2008. 455 p.
- [98] MADISON, J. **CNC machining handbook: basic theory, production data, and machining procedures.** New York: Industrial Press, 1996. 396 p.
- [99] BERTRÁN, J. A. R. **Sistematização do Processo de Projeto em Automação de Máquinas Cartezianas com Acionamento Eletromecânico – Ênfase no Posicionamento.** 2009. 150 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.