

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Fernando Costenaro Silva

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORÍTMOS PARA GERAÇÃO  
DE TRAJETÓRIAS DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM  
AUTOMATIZADA APLICADOS EM CALDEIRAS DE USINAS  
TERMOELÉTRICAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra

Coorientador: Prof. Dr. Eng. Nelso Gauze Bonacorso

Florianópolis  
2012

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

Silva, Fernando Costenaro

Desenvolvimento de algoritmos para geração de trajetórias de revestimento por soldagem automatizada aplicados em caldeiras de usinas termoelétricas [dissertação] / Fernando Costenaro Silva ; orientador, Jair Carlos Dutra ; coorientador, Nelso Gauze Bonacorso. - Florianópolis, SC, 2012.

108 p. ; 21cm

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

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Geração de trajetórias. 3. Revestimento por soldagem. 4. MIG/MAG pulsado. I. Dutra, Jair Carlos. II. Bonacorso, Nelso Gauze. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Fernando Costenaro Silva

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORÍTMOS PARA GERAÇÃO  
DE TRAJETÓRIAS DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM  
AUTOMATIZADA APLICADOS EM CALDEIRAS DE USINAS  
TERMOELÉTRICAS**

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

Florianópolis, 11 de maio de 2012.

---

Prof. Dr. Eng. Julio Cesar Passos,  
Coordenador do Curso  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra,  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Eng. Nelso Gauze Bonacorso,  
Coorientador  
Instituto Federal de Educação Tecnológica

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Eng. Carlos Eduardo Iconomos Baixo,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Eng. Edson Roberto De Pieri,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Eng. Raul Gohr Júnior,  
IMC Soldagem



Dedico este trabalho a minha  
namorada Carolina e a minha mãe  
Ieda.



## AGRADECIMENTOS

Ao meu mestre e coorientador, Prof. Nello Gauze Bonocorso, pelos conhecimentos transmitidos desde minha graduação, pela grande colaboração e dedicação nesta dissertação e os conselhos durante este mestrado.

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e oportunidade de fazer parte da equipe do LABSOLDA.

Aos colegas e amigos da pós-graduação Cleber Marques, Diego Erdmann dos Santos, Eduardo Bidese Puhl, Fabio Renato Michelin, Felipe Kalil Mendonça, Hellinton Direne Filho, Jônathas Alexandre Alves, Marcelo Pompermaier Okuyama, Miguel Guayasamin, Rafael Polezi Lucas e Renon Steinbach Carvalho.

À equipe do LABSOLDA, em especial a Cleber Guedes, Evandro Martins, Luciano Machado Cirino, Márcia Paula Thiel, Marcus Barnetche, Mateus Barancelli Schwedersky, Raul Gohr Junior, Régis Henrique Gonçalves e Silva e Ricardo Campagnin.

Aos estagiários, bolsistas e colaboradores Alessandro Okagawa Falleiros, Alexandre Blum Weingartner, Everton Werlang, Giovanna Nascimento Corrêia, Henrique Martinello Savi, Ivan Olszanski Pigozzo, João Facco de Andrade, Marcos Vicente Reis Junior, Miguel Mannes Hillesheim, Paulo Roberto Pereira, Ramon Natal Meller, Renan Kindermann, Rodrigo da Silva Machado, Tahiriny Ghizoni Kafka e Tiago Peixoto, que atuaram e ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

A minha família, por todo o apoio e paciência durante esta caminhada, em especial minha mãe Ieda, minha avó Alda e minha namorada Carolina.

Aos professores Edson Roberto De Pieri e Carlos Eduardo Iconomos Baixo por aceitarem o convite de avaliar este projeto de mestrado.

A Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao CNPQ, pela bolsa de pesquisa e apoio financeiro para viagens.





“Inteligência é a capacidade de se adaptar à mudança.”

(Stephen Hawking)



## RESUMO

Os tubos das caldeiras das usinas termoeletricas sofrem desgastes devido à erosão e corrosão causadas pela alta temperatura e impurezas resultantes da queima do carvão. O risco de rupturas nestes tubos, e a consequente parada para manutenção, crescem com a diminuição de sua espessura. A solução até então utilizada pela empresa TRACTEBEL Energia é o corte das partes seriamente desgastadas e a substituição por novas. As partes novas são unidas ao restante da parede de água por meio de soldagem TIG. Em alguns outros países, estas novas partes são preparadas previamente com um revestimento por soldagem com ligas mais resistentes aos citados desgastes. Esta tecnologia é realizada de forma automática com diferentes equipamentos que são adaptados para a tarefa. As operações são divulgadas em panfletos e algumas publicações, mas sem a revelação de fato dos procedimentos utilizados. É observado que os equipamentos não foram projetados com especificidade para a referida aplicação. Por isso, no LABSOLDA foi iniciado um projeto para o desenvolvimento de equipamentos e de tecnologias de soldagem para que a TRACTEBEL Energia possa revestir as paredes de suas caldeiras com o mais avançado estado da arte. O desenvolvimento visa não somente o revestimento de partes separadas e posterior inclusão nas paredes, mas também o revestimento *in loco* de partes desgastadas. Neste caso, a dificuldade é maior, pois as posições de soldagem estão condicionadas à posição dos tubos das caldeiras. O presente trabalho está inserido no contexto deste desenvolvimento, que inclui o projeto e construção de um manipulador automático de soldagem com quatro graus de liberdade e o desenvolvimento de trajetórias de soldagem. É abordado o desenvolvimento de metodologias de revestimento com orientação vertical e também horizontal. São apresentados os respectivos algoritmos de geração de trajetória com oscilação da tocha de forma a acompanhar a circunferência dos tubos, ou seja, utilizando mais de um eixo simultaneamente. Este tipo de versatilidade visa atender os desenvolvimentos dos procedimentos de soldagem, tratados de forma científica, não significando, portanto, que serão utilizadas no final do projeto. Os testes de revestimento foram realizados com o processo MIG/MAG pulsado, utilizando o arame ER309 e os tubos na posição vertical.

**Palavras-chave:** paredes tubulares, automatização de revestimentos, geração de trajetórias, revestimento por soldagem, MIG/MAG pulsado.

## ABSTRACT

The boiler tubes of thermal power plants suffer wear due to erosion and corrosion caused by high temperature and impurities resulting of the burning coal. The risk of rupture in these tubes and subsequent shut down for maintenance increases with the decrease of its thickness. The solution used so far by the company TRACTEBEL Energia is cutting off seriously eroded parts and replace it by new ones. The new parts are joined to the rest of the water wall through TIG welding. In some other countries, these new parts are previously prepared with a welding overlay with alloys more resistant to the cited wear. This technology is accomplished automatically with different equipments which are adapted to the task. The operations are disclosed in several publications and flyers, but without the revelation in fact of the employed procedures. It is observed that the equipments have not been projected with specificity for such application. Wherefore, in LABSOLDA, has been started a project for the development of welding technologies and equipment so that the TRACTEBEL Energia might overlay their walls of boilers with the most advanced state of the art. The development aims not only the overlay of separate parts and subsequent inclusion in the walls, but also the overlay in situ of worn parts. In this case, the difficulty is increased, since the welding positions are subject to the position of boiler tubes. This work is inserted in the context of this development, which includes the design and construction of an automatic welding manipulator with four degrees of freedom presented here and the development of welding trajectories. It is broached the development of overlay methodologies for vertical orientation as well as horizontal. Are presented the respective algorithms of trajectory generation with torch oscillation in order to follow the circumference of the pipes, or that is, using more than one axis simultaneously. This kind of versatility seeks to meet the development of welding procedures, treated in a scientific way, not meaning, therefore that will be used at the end of the project. The overlay tests were performed with the pulsed MIG/MAG process, using the ER309 wire and tube in a vertical position.

**Keywords:** tubular walls, automated overlay, trajectories planning, overlay by welding, pulsed MIG/MAG.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubos desgastados em A e o local do soprador de vapor em B.....	24
Figura 2 – Formas de revestimentos: em (A) manual e em (B) mecanizado. 25	
Figura 3 - Robôs dedicados a soldagem: em A um antropomórfico de 6 DOF e em B um cartesiano de 3 DOF. ....	26
Figura 4 - Andaimos no interior da caldeira (A) e no corredor (B).....	27
Figura 5 - Manipuladores dedicados ao revestimento de caldeiras: em (A) o sistema da Gullco e em (B) o sistema da BUG-O SYSTEMS.....	28
Figura 6 - Tartflope V4: manipulador cartesiano de quatro graus de liberdade. ....	29
Figura 7- Esquema do processo TIG Alimentado com arame quente.....	34
Figura 8 - Revestimento realizado pelo processo TIG com alimentação de arame pré-aquecido – TIG HOT WIRE. ....	35
Figura 9 - Esquema do processo Aspersão térmica por arco elétrico.....	36
Figura 10 - Defeito no revestimento com aspersão térmica .....	36
Figura 11 - Revestimento de Inconel 625 aplicado com PTA-P. ....	37
Figura 12 - Esquemático de uma tocha genérica associada aos principais elementos utilizados no processo PTA-P.....	38
Figura 13 - Representação esquemática do processo MIG/MAG.....	39
Figura 14 - Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência por curto-circuito.....	40
Figura 15 - Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência do tipo goticular. ....	41
Figura 16 - Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico no processo MIG/MAG pulsado.....	42
Figura 17 - Variáveis do MIG/MAG pulsado modo misto. ....	43
Figura 18 – Comportamento do arame na variante <i>CMT</i> .....	44
Figura 19 - Trajetórias sem e com tecimento mais usadas em soldagem.....	45
Figura 20 - Eixos envolvidos no tecimento: (A) somente o eixo Y, (B) somente o eixo A e em (C) os eixos Y e Z. ....	46
Figura 21 - Características e parâmetros dimensionais das paredes de caldeiras.....	49
Figura 22 - Fixação do manipulador na parede tubular. ....	50
Figura 23 – Posição e orientação inicial da tocha de soldagem. ....	51
Figura 24 – Parede na posição vertical. ....	53
Figura 25 – Trajetória de posicionamento do revestimento da membrana.....	55
Figura 26 – Tecimento Trapezoidal.....	55
Figura 27 – Tecimento Triangular. ....	57
Figura 28 – Trajetória da ferramenta até a junção membrana-tubo. ....	58
Figura 29 – Pontos e ângulos iniciais do arco a ser revestido. ....	60
Figura 30 – Pontos centrais e laterais dos cordões no tubo.....	62
Figura 31 – Número de cordões par em (A) e ímpar em (B). ....	63
Figura 32 – Sentido da soldagem dos tubos na posição horizontal.....	64

Figura 33 – Caminho do ponto central do eixo angular do manipulador (A – B – C – D) e da origem do sistema de coordenadas da tocha (A' – B' – C' – D').	65
Figura 34 – Limite máximo da inclinação das tochas: Em (A) Tocha achatada e em (B) tocha normal.	65
Figura 35 - Pontos do tecimento no arco AB.	68
Figura 36 – Terminal de programação do Tartflope V4.	71
Figura 37 – Diagrama de blocos do programa do Tartflope V4.	72
Figura 38 – Em (A) tela inicial de programação do manipulador e em (B) tela de seleção da trajetória.	73
Figura 39 – Em (A) tela para a marcação de pontos e em (B) tela para determinação dos parâmetros de deslocamento.	74
Figura 40 – Tela de operação da trajetória.	75
Figura 41 – Diagrama de blocos da rotina Caldeira.	76
Figura 42 – Em (A) detalhe do sentido longitudinal selecionado e em (B) detalhe do sentido transversal selecionado.	77
Figura 43 – Em (A) tela de configurações e em (B) tela de marcação dos pontos para definir o centro do tubo.	78
Figura 44 – Em (A) tela de programação da membrana e em (B) tela de programação da junção membrana-tubo.	79
Figura 45 – Tela de programação do tubo.	79
Figura 46 – Bancada de soldagem para ensaios de revestimentos.	81
Figura 47 - Especificações dimensionais do revestimento.	82
Figura 48 – Localização dos pontos para definir e referenciar o centro do tubo.	84
Figura 49 - Representação gráfica da circunferência do tubo calculada.	84
Figura 50 – Cordão de revestimento da membrana.	86
Figura 51 – Cordão de revestimento da junção do tubo.	86
Figura 52 – Oscilograma de tensão e corrente pelo tempo da junção.	87
Figura 53 – Primeiro cordão de revestimento do tubo.	88
Figura 54 – Terceiro e último cordão de revestimento do tubo.	88
Figura 55 – Oscilograma de tensão e corrente do terceiro cordão do tubo.	89
Figura 56 – Macrografia do tubo revestido com os valores máximos medidos.	90
Figura 57 – Bancada robotizada para o revestimento de paredes tubulares horizontais.	91
Figura 58 – Revestimento da parede na posição horizontal.	92
Figura 59 - Oscilograma do processo CMT Pulse.	92
Figura 60 – Macrografia do revestimento da parede na posição horizontal.	93
Figura 61 – Defeitos de soldagem devido à inadequada relação entre velocidade de soldagem e frequência de tecimento.	93
Figura 62 – Oscilograma de tensão e corrente pelo tempo da lateral do tubo com tecimento apenas no eixo y.	94
Figura 63 – Comportamento do arco elétrico na superfície do tubo.	94
Figura 64 – Interface padrão do Mach3.	106



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dimensões das configurações de paredes mais encontradas.....	50
Tabela 2 - Composição química do aço 16Mo3.....	82
Tabela 3 – Critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda. .....	83
Tabela 4 – Coordenadas dos três pontos medidos. ....	83
Tabela 5 - Parâmetros de movimento na posição vertical descendente. ....	85
Tabela 6 – Parâmetros utilizados para o revestimento da secção de parede tubular horizontal.....	91



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas

DOF – Degrees of Freedom

DBCP – Distância-bico-de-contato-peça

CMT – Cold Metal Transfer

LABSOLDA – Laboratório de soldagem

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

CNC – Controle Numérico Computadorizado

TIG – Tungsten Inert Gas

HVOF - High Velocity Oxygen Fuel

PTA-P – Plasma de arco Transferido Alimentado com Pó

DFBC – Distância-flange-bico-de-contato

IHM – Interface Homem-Máquina

CAM – Computer Aided Manufacturing

PC – Computador pessoal

THC – Torch Height Control

DET – Distância entre extremidade do tecimento

EPRI – Electric Power Research Institute



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	25
1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES .....	29
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO .....	31
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>33</b>
2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICÁVEIS .....	33
<b>2.1.1 TIG Alimentado .....</b>	<b>34</b>
<b>2.1.2 Aspersão Térmica .....</b>	<b>35</b>
<b>2.1.3 PTA-P .....</b>	<b>37</b>
<b>2.1.4 MIG/MAG .....</b>	<b>39</b>
2.1.4.1 MIG/MAG Convencional – Transferência por Curto-Circuito.....	40
2.1.4.2 MIG/MAG Convencional – Transferência Globular .....	40
2.1.4.3 MIG/MAG Convencional – Transferência Goticular Projetada.....	41
2.1.4.4 MIG/MAG Pulsado.....	42
2.1.4.5 MIG/MAG Pulsado Modo Misto.....	43
2.1.4.6 MIG/MAG CMT.....	43
2.2 TÉCNICAS DE REVESTIMENTO .....	44
<b>3 DESENVOLVIMENTO DAS TRAJETÓRIAS DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM.....</b>	<b>49</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA DAS PAREDES DE CALDEIRAS....	49
3.2 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO E DA ORIENTAÇÃO INICIAL DA TOCHA.....	50
3.3 METODOLOGIA PARA TUBOS COM ORIENTAÇÃO VERTICAL ..	53
<b>3.3.1 Membrana .....</b>	<b>54</b>
<b>3.3.2 Junção membrana-tubo .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.3 Tubo .....</b>	<b>60</b>
3.4 METODOLOGIA PARA TUBOS COM ORIENTAÇÃO HORIZONTAL .....	63
<b>4 IMPLANTAÇÃO DAS METODOLOGIAS.....</b>	<b>71</b>
4.1 INTERFACE DO USUÁRIO .....	71
4.2 O PROGRAMA DO TARTÍLOPE V4.....	72
4.3 A ROTINA CALDEIRA .....	75
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>81</b>
5.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA .....	81
5.2 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM .....	82
5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	83
<b>5.3.1 Parede Tubular na Vertical .....</b>	<b>85</b>
<b>5.3.2 Tubos na Horizontal .....</b>	<b>90</b>
5.4 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS.....	93

<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO A – Mach 3 .....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO B – Principais Funções do Código G Usadas na Soldagem.....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

É inquestionável a essencialidade da energia elétrica no desenvolvimento das atividades sociais e econômicas no mundo contemporâneo. Há uma forte e direta correlação entre atividade econômica e consumo de energia. Esta relação se dá, no longo prazo, pela necessidade de ampliação da capacidade produtiva, visando manter a relação entre oferta e demanda de energia elétrica. Já no curto prazo, a correlação é mais nítida, na medida em que variações no ritmo da produção econômica afetam diretamente o consumo de energia elétrica.

Para dar suporte ao crescimento econômico do Brasil, são necessários que, além da expansão da oferta de energia, sejam mantidos, ou melhorados, os índices de produção de energia do parque produtivo atualmente existente. No primeiro semestre de 2011, as usinas hidrelétricas responderam por 68,0% da geração de energia elétrica na matriz nacional, e as termoeletricas por 26,2%. As demais fontes de energia são: as pequenas centrais hidrelétricas, com 3,0%, centrais geradoras hidrelétricas, com 0,2%, usinas nucleares, com 1,8% e as usinas eólicas, com 0,8% [1].

As usinas termoeletricas desempenham um papel importante em tempos de estiagem, complementando a geração de energia ao sistema elétrico. Para cumprir tal função, as usinas termoeletricas necessitam realizar paradas periódicas para recuperar suas plantas dos desgastes ocasionados por erosão e corrosão.

As manutenções realizadas nas termoeletricas são necessárias para evitar o rompimento dos tubos que constituem as paredes das caldeiras. O rompimento ocorre devido à diminuição da espessura dos tubos gerada principalmente pela erosão e corrosão causados pela alta temperatura e impurezas resultantes da queima do carvão [2].

Essa diminuição de espessura pode ser observada, Figura 1A, quando um corte transversal é realizado em uma seção de parede que foi substituída. Neste caso, a diferença de espessura é visível e, identifica que a parte inferior desta parede constituía o lado interno da caldeira.

Os sopradores de vapor, Figura 1B, que têm a função de realizar a limpeza das paredes da caldeira, também contribuem com os danos nos tubos. Tal limpeza é necessária para manter a eficiência na produção de energia elétrica, pois a fuligem gerada na queima do carvão se deposita sobre os tubos, prejudicando a troca de calor. Entretanto, a retirada de fuligem acaba extraindo também uma pequena quantidade de

material que constitui o tubo, reduzindo a espessura e comprometendo a integridade do tubo com o passar do tempo [3].

Figura 1 - Tubos desgastados em A e o local do soprador de vapor em B.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2009).

Na maioria das vezes, ocorre somente a substituição dos tubos, caracterizando manutenção corretiva planejada das paredes afetadas por desgaste. Cabe salientar, que essa substituição não agrega características de melhorias de resistência contra os mecanismos de falhas [4], [5].

Em outros países, já é uma prática normal o revestimento por soldagem de partes das paredes de caldeiras com materiais resistentes à erosão e à corrosão. O revestimento implica em uma economia devido ao aumento do tempo entre manutenções preventivas e a minimização dos custos relativos às paradas indesejadas e não programadas para substituição total ou parcial de componentes [6].

No mundo, apesar dos significantes avanços tecnológicos na área de projetos de caldeiras de termoelétricas, até o presente momento não se consegue evitar os desgastes ocasionados pela erosão e pela



corrosão. Se, com um novo projeto, fosse possível eliminar totalmente o problema de desgaste, a eventual troca de uma caldeira já instalada seria inviável do ponto de vista técnico e econômico. Portanto, o desgaste das paredes tubulares de caldeiras ainda permanecerá por muitos anos e deve ser periodicamente monitorado.

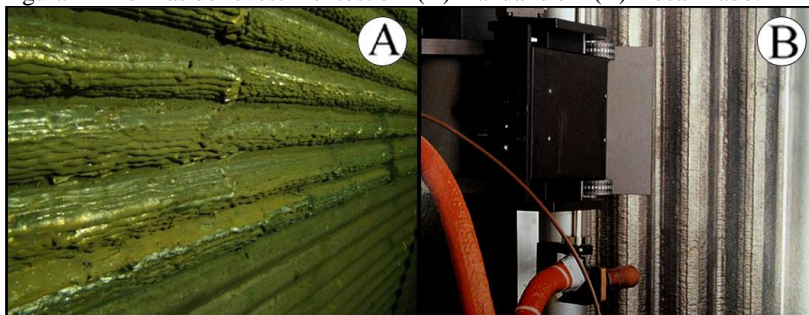
## 1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os revestimentos por soldagem MIG/MAG das paredes tubulares das caldeiras são realizados no local e, na maioria das vezes, de forma manual por uma equipe de soldadores. Os principais problemas advindos deste tipo de operação são: o longo tempo de execução de um trabalho insalubre, o resultado do revestimento depende fortemente da habilidade do soldador, e as posições de soldagem são desfavoráveis como mostra a Figura 2A.

A operação de revestimento por soldagem MIG/MAG de forma automatizada ou mecanizada, como mostra a Figura 2B, apresenta uma série de vantagens em relação ao processo manual [3], [7], [8], tais como: melhor uniformidade e qualidade da soldagem nas regiões revestidas, redução significativa dos defeitos de soldagem, diminuição da quantidade de material consumido e do tempo de execução.

Outro aspecto importante é a melhoria da condição de trabalho, uma vez que o soldador passa a não mais atuar próximo ao arco elétrico e da geração de fumos, pois é necessário apenas um operador para efetuar eventuais ajustes nos parâmetros do processo de soldagem [3].

Figura 2 – Formas de revestimentos: em (A) manual e em (B) mecanizado.

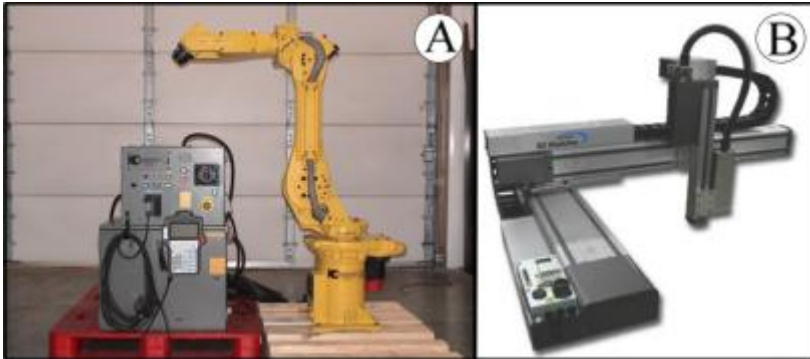


Fonte: Adaptado de Carvalho (2009) e Magnatech (2011).

Várias fabricantes produzem robôs específicos para serem usados na soldagem, como por exemplo, o Fanuc ArcMate 100i, Figura 3A. As grandes vantagens deste equipamento são: as altas velocidades de posicionamento, ótima precisão e facilidade de programar trajetórias, desde retas até curvas complexas [9].

Além dos robôs antropomórficos, é possível utilizar também robôs cartesianos, que apresentam normalmente dois ou três eixos prismáticos, como por exemplo, o EZ Modules RU-HMSz da Epson, Figura 3B. A trajetória de soldagem é definida por intermédio de pontos especificados pelas coordenadas cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). São geralmente fáceis de programar e sua rigidez permite uma precisão de centésimos de milímetros [10].

Figura 3 - Robôs dedicados a soldagem: em A um antropomórfico de 6 DOF e em B um cartesiano de 3 DOF.



Fonte: Adaptado de FANUC (A) e EPSON (B) (2011).

O problema na utilização dos robôs para a tarefa de revestimento de tubos de caldeira é a dificuldade para transportar e fixar os mesmos dentro de um ambiente confinado. Dentro das caldeiras são montados andaimes, Figura 4A, que chegam a mais de 30 metros de altura para realizar as operações de manutenção. Conforme pode ser visto na Figura 4B, os andaimes não fornecem espaço suficiente para instalação e operação de um robô antropomórfico ou cartesiano de grande porte, que além de pesados necessitam ser transportados constantemente para alcançar toda a área da parede de caldeira a ser recuperada.

Figura 4 - Andaimes no interior da caldeira (A) e no corredor (B).

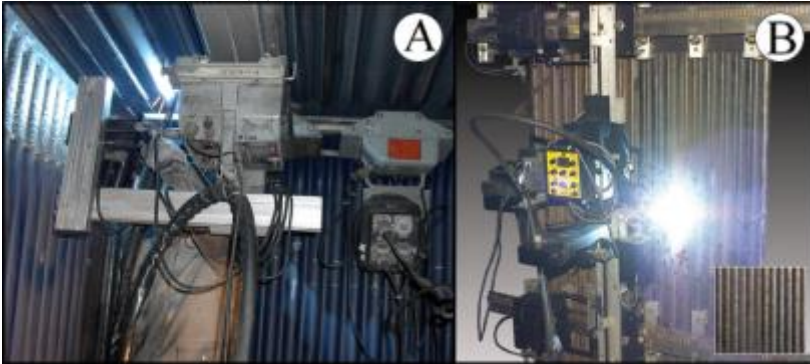


Geralmente, são utilizados manipuladores específicos para realizar a soldagem automatizada em campo. Estes equipamentos tendem a suprir os requisitos de robustez, facilidade de transporte e instalação, uma vez que possuem pouco mais de 30 kg e tamanho reduzido quando comparados aos robôs [3].

Contudo, os manipuladores dedicados à soldagem, apresentam diversas limitações. Geralmente, eles são bem simples, apresentando apenas 2 ou 3 graus de liberdade, inviabilizando assim a correta orientação da tocha de soldagem em certas situações de operação. Não existe a possibilidade de implantação de novos tipos de trajetórias de soldagem e o número de trajetórias disponíveis é bastante restrito. Outra limitação destes equipamentos é que a soldagem é feita apenas nos tubos com orientação vertical.

Algumas fabricantes fornecem manipuladores específicos para o revestimento de paredes de caldeiras. Como exemplo, o sistema “*All Position Overlay Gantry System*”, composto pelo manipulador “*KAT® Carriage Auto-Weld*” e outros equipamentos da empresa canadense *Gullco*, Figura 5A [11], e o sistema “*All Position Overlay System*”, da fabricante norte-americana *BUG-O SYSTEMS*, Figura 5B [12].

Figura 5 - Manipuladores dedicados ao revestimento de caldeiras: em (A) o sistema da Gullco e em (B) o sistema da BUG-O SYSTEMS.



Fonte: Adaptado de Gullco (A) e BUG- O SYSTEMS (B) (2011).

Ambos os manipuladores proporcionam velocidades de posicionamento de até 3 m/min. São constituídos por um trilho vertical rígido que é fixado em dois trilhos horizontais flexíveis e paralelos e são instalados com bases magnéticas.

O tecimento geralmente utilizado pelos equipamentos é do tipo pendular, realizado por um eixo rotacional existente na extremidade do manipulador, onde é fixada a tocha de soldagem. O movimento oscilatório resultante apresenta grande variação da DBCP (distância-bico-de-contato-peça), que neste caso, representa a distância entre o bico de contato da tocha e a superfície do tubo. Com o aumento da amplitude de tecimento ocorrem instabilidades do arco elétrico gerando grande quantidade de salpicos e descontinuidades da penetração e da geometria do cordão de solda.

Outro problema é que a parede a ser revestida pode estar empenada, ou sofrer deformações durante a aplicação do revestimento. Nestes casos, há necessidade de se manter constante a DBCP durante a execução da trajetória de soldagem para evitar os problemas supracitados. Esse ajuste de DBCP, função disponibilizada por poucos fabricantes de manipuladores, pode ser realizado de forma manual pelo operador do manipulador ou de forma automática via sensor de realimentação.

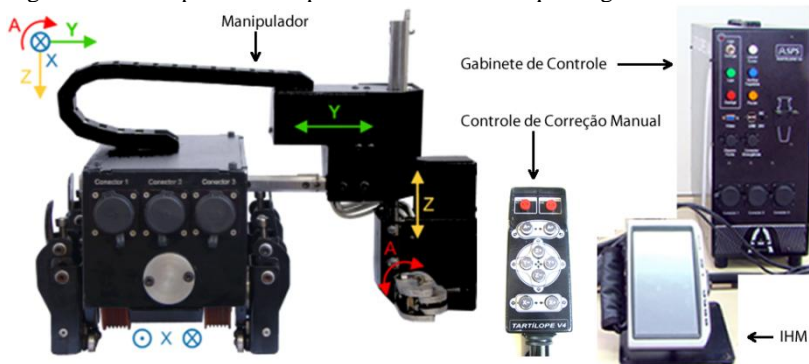
Por limitações de uma correta orientação da tocha e geração de trajetória de soldagem com DBCP praticamente constante, esses manipuladores não viabilizam o posicionamento adequado da tocha durante as operações de soldagem dos tubos de caldeira. Como resultado, os respectivos revestimentos não são homogêneos na região

tubular restaurada, comprometendo desta forma, a qualidade da proteção.

## 1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

No projeto de pesquisa denominado “Sistema Robótico de Quatro Graus de Liberdade para o Revestimento e Fabricação por Soldagem de Tubos de Caldeiras e Tecnologias de Soldagem Associadas – Cabeça de Série” atuaram, de forma cooperativa, pesquisadores do LABSOLDA, laboratório de soldagem da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) e profissionais da TRACTEBEL Energia S/A. Neste projeto, um manipulador cartesiano do tipo CNC (controle numérico computadorizado) de quatro eixos (Tartílope V4), Figura 6, foi projetado e construído para revestir com materiais nobres paredes de tubos de caldeiras que sofreram redução da espessura devido à erosão e corrosão [13].

Figura 6 - Tartílope V4: manipulador cartesiano de quatro graus de liberdade.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2009).

O Tartílope V4 é constituído basicamente por quatro módulos: O manipulador da tocha, o gabinete de controle, a interface homem-máquina e o controle de correção manual.

No manipulador, o eixo designado como X corresponde ao deslocamento do manipulador sobre um trilho, que pode ser flexível ou rígido, no sentido de soldagem. O eixo designado como Y tem o papel de fazer movimentos de tecimento de formas pré-definidas, podendo ser do tipo trapezoidal, triangular e triangular com parada nos extremos. O

eixo designado como Z é fundamentalmente utilizado para ajustar a distância entre a tocha e a peça. O eixo angular, designado como A, é responsável pela orientação da tocha de soldagem.

O gabinete de controle do Tartílope V4 contém todas as placas eletrônicas de isolamento, acionamento e controle. Na parte dianteira do gabinete estão situados os botões de acionamento e conectores para os demais módulos.

A programação do Tartílope V4 é feita principalmente pela interface de programação via a tela *touchscreen*. O software da interface de programação do Tartílope V4 é executado no sistema operacional Windows XP.

O controle de correção manual é utilizado para executar o rápido posicionamento do equipamento por intermédio dos botões que correspondem ao sentido positivo e negativo de cada eixo. Este também permite a inicialização do movimento do equipamento e o disparo da fonte de soldagem. Caso ocorra algum problema com o equipamento, o botão “Parada de emergência” desabilita a potência e a fonte de soldagem.

O programa do manipulador é bastante limitado, atuando apenas no plano XY, com os motores dos eixos X e Y. Os demais eixos são acionados apenas manualmente, não aproveitando assim, toda a mecânica existente para realizar trajetórias complexas de forma automatizada.

Para dar continuidade ao desenvolvimento de equipamentos e de processos de soldagem, aplicados em usinas termoelétricas, foi aprovado, no final de 2011, um projeto com a empresa TRACTEBEL Energia S/A. Esse novo projeto, com três anos de duração, é intitulado: “Desenvolvimento de uma Tecnologia Nacional Automatizada para o Revestimento e Fabricação por Soldagem de Tubos de Caldeira e Tecnologias de Soldagem Associadas” [14].

De acordo com os problemas relatados pela TRACTEBEL, o revestimento dos tubos de caldeira necessita que o equipamento execute uma trajetória mais favorável para manter a soldagem estável, evitar o retrabalho e minorar as possíveis falhas, além de facilitar a operação do equipamento, automatizando o posicionamento da tocha e a geração das trajetórias. Assim, o objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de metodologias de geração de trajetórias para o Tartílope V4 aplicado à tarefa de revestimento dos tubos em caldeiras de termoelétricas. Para tornar essa proposta possível é necessário atingir os objetivos específicos:

- Avaliar os tipos de trajetória com tecimento empregadas no revestimento de paredes tubulares;
- Adequar o sistema de controle do Tartílope V4 para execução dos algoritmos de geração das trajetórias de revestimento de tubos tanto na posição horizontal quanto na vertical;
- Implementar o algoritmo desenvolvido no programa CNC do Tartílope V4;
- Consolidar os algoritmos desenvolvidos por meio de ensaios em laboratório;
- Avaliar os resultados de revestimentos produzidos pelos algoritmos desenvolvidos.

### 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

A estrutura do trabalho está dividida em sete capítulos, sendo o primeiro a Introdução.

O segundo capítulo apresenta uma fundamentação teórica no qual é explicada a base de conhecimentos para o entendimento do trabalho. São avaliados os processos de soldagem destinados ao recobrimento de superfícies, destacando o processo MIG/MAG e suas vantagens e desvantagens em relação a outros processos de soldagem. Neste capítulo são também apresentadas as técnicas de revestimentos destacando-se as trajetórias de soldagens filetadas e com tecimento do tipo transversal.

O terceiro capítulo descreve as metodologias propostas no trabalho para a geração de trajetórias para paredes com tubos com orientação vertical e horizontal.

O quarto capítulo apresenta a descrição do programa do equipamento e a implementação das metodologias do capítulo anterior.

A seguir, o quinto capítulo apresenta a bancada de ensaios experimentais de validação das metodologias propostas para o revestimento de tubos de parede de caldeira e os respectivos resultados obtidos.

O sexto capítulo traz as conclusões sobre os desenvolvimentos do trabalho.

Por fim, o sétimo capítulo apresenta sugestões para trabalhos futuros.





## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os materiais nobres, como as ligas de aço inoxidável 309, 316 e INCONEL 625, são utilizados para o revestimento das paredes das caldeiras devido suas propriedades mecânicas e químicas adequadas para resistir, por um período maior, ao desgaste causado pela corrosão e erosão [3]. Para atender este tipo de aplicação não existe apenas uma única solução e sim diversos tipos de procedimentos de soldagem. Por sua vez, cada um dos procedimentos de soldagem envolve basicamente duas especificações, o tipo de processo e a forma da trajetória de soldagem, com seus respectivos conjuntos de parâmetros.

### 2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICÁVEIS

Um processo de soldagem, para ser empregado com sucesso na recuperação automatizada de superfícies danificadas por erosão e corrosão em paredes de tubos de caldeiras, deve possuir as seguintes características:

- Depositar camadas isenta 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 e em todas as posições de soldagem;
- Ausência de respingos e salpicos na deposição dos cordões, o que evita que danos ocorram nos equipamentos automatizados;
- Produzir camadas de solda com excelente acabamento superficial e com baixa diluição, penetração e reforço.

O eletrodo revestido, apesar de apresentar a maior diversidade de eletrodos com ligas específicas, apresenta uma baixa produtividade devido ao comprimento limitado dos eletrodos e à necessidade de remover a escória após cada aplicação, além da dificuldade de automatização desse processo [15], [16].

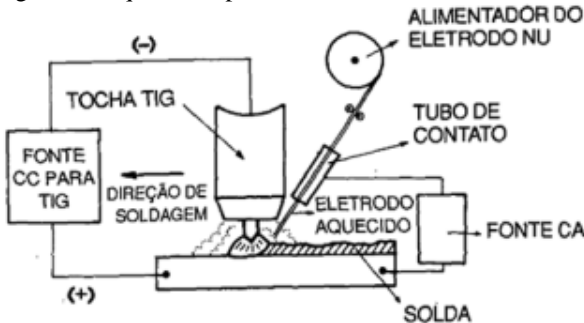
Atualmente, os processos aplicáveis que mais se aproximam destas características ideais são o TIG alimentado, aspersão térmica, Plasma com alimentação automática de pó (PTA-P) e o MIG/MAG com arame maciço e tubular.

### 2.1.1 TIG Alimentado

O processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) é geralmente utilizado na soldagem de chapas finas, apresentando uma ótima qualidade, isento de respingos, resíduos ou escória, e pode ser aplicado em quase todos os metais e ligas soldáveis.

Uma das variantes desse processo é o TIG Alimentado, no qual o arame é introduzido no arco de forma automática, conforme Figura 7. A alimentação de arame pode ser fria, no qual o mesmo é introduzido no arco de soldagem à temperatura ambiente, ou com pré-aquecimento por efeito joule, resultante da aplicação de uma corrente elétrica alternada no arame. A grande vantagem da utilização do arame pré-aquecido é a diminuição da energia necessária para fundir o material de adição, permitindo o uso de velocidades de alimentação maiores quando comparado com o arame frio ou até mesmo o TIG manual [17].

Figura 7- Esquema do processo TIG Alimentado com arame quente.



Fonte: Wainer et al. (1992).

O processo TIG alimentado também é empregado, com sistemas automatizados ou mecanizados, no revestimento de tubos com materiais nobres como aços inoxidáveis, Figura 8, e ligas de níquel, cobre e titânio [18]. É possível obter uma diluição abaixo de 5%, sendo comparável com o processo plasma. A geometria do cordão pode ser controlada alterando a velocidade de soldagem e/ou a taxa de alimentação de arame, que independe da corrente do arco pelo fato de ser utilizado um eletrodo dito não consumível de tungstênio [16], [17].

Figura 8 - Revestimento realizado pelo processo TIG com alimentação de arame pré-aquecido – TIG HOT WIRE.



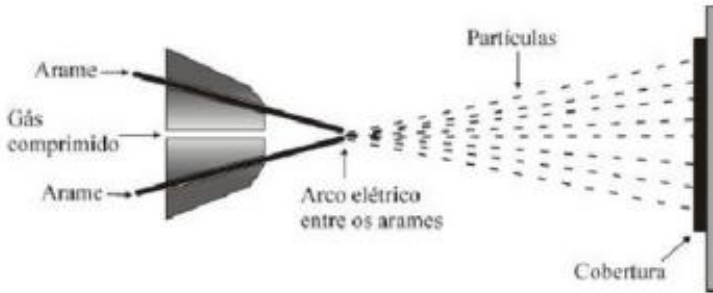
Fonte: Multialloy (2010).

Mesmo com a utilização de arame pré-aquecido, a taxa de deposição ainda é baixa quando comparado com outros processos de soldagem como o MIG/MAG. Ademais, a qualidade da solda não é o fator determinante e sim o menor período de indisponibilidade da termoeletrica, em virtude dos custos envolvidos durante a parada para manutenção.

### **2.1.2 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, conforme Figura 9. O material adere com o impacto, se deforma e preenche as rugosidades superficiais. O resfriamento solidifica as partículas em estruturas lamelares conhecidas por panquecas [19], [20].

Figura 9 - Esquema do processo Aspersão térmica por arco elétrico.



Fonte: Terres (2006).

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 desses processos apresenta grande porosidade, que pode resultar no descolamento de uma parte do material [21], como pode ser visto na Figura 10, além de que nem todos os materiais podem aderir à superfície revestida [22]. Isto ocorre principalmente devido falta de ligação metalúrgica, uma vez que normalmente a ligação resultante é apenas mecânica.

Figura 10 - Defeito no revestimento com aspersão térmica



Fonte: Rezakhani (2007).

O processo HVOF apresenta uma qualidade muito superior de revestimento, com uma camada densa, compacta e com baixa quantidade de poros, quando comparado às demais variações de aspersão térmica. Entretanto, o alto ruído, o custo elevado e a presença de porosidade são limitantes desse processo [22].

### 2.1.3 PTA-P

O processo de soldagem PTA-P, acrônimo de Plasma de arco Transferido Alimentado com Pó, apresenta muitas vantagens para a solda de revestimento, como bom acabamento superficial (Figura 11) [23], alta taxa de fusão, baixo aporte térmico, baixa diluição (em torno de 5%), possibilidade de misturar ligas em pó e de ser aplicado em todas as posições de soldagem [24]. Ao contrário da aspersão térmica, a soldagem obtém a fusão completa por ligação metalúrgica à superfície do tubo [25]. Este processo não foi utilizado ainda para realizar o revestimento de tubos de caldeira, entretanto, ensaios em laboratório apresentaram cordões de solda com boas características para o revestimento.

Figura 11 - Revestimento de Inconel 625 aplicado com PTA-P.

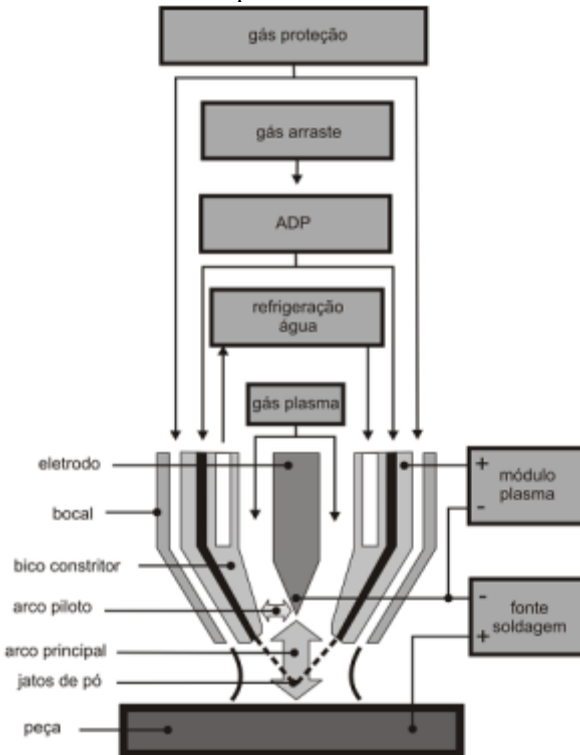


Fonte: Carvalho (2010).

A complexidade do sistema (Figura 12), 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 [25]. 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 do alimentador até o bocal da tocha. E por fim o gás de proteção, que serve para proteger o material fundido da contaminação da atmosfera [26].

Figura 12 - Esquemático de uma tocha genérica associada aos principais elementos utilizados no processo PTA-P.



Fonte: Alves (2011).

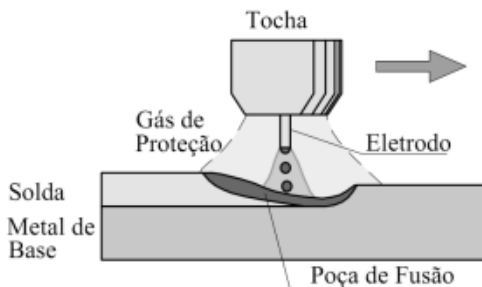
O gás de arraste necessita de válvula de controle de vazão para garantir a continuidade da deposição de material, uma vez que uma vazão alta do gás de arraste promove o lançamento de partículas para fora da poça de fusão. O gás de plasma também necessita de válvula de controle de vazão, para manter a pressão do arco constante, e conseqüentemente a penetração e estabilidade do arco principal [24], [26]. O Alimentador de pó armazena e faz o controle da alimentação do

pó. 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, dificultando o posicionamento e a movimentação da tocha ao redor do tubo.

### 2.1.4 MIG/MAG

O processo MIG/MAG, é caracterizado por utilizar um arco em atmosfera de gás inerte ou ativo que é gerado entre a peça e a extremidade do arame-eletrodo consumível e que pode ser aplicado em todas as posições de soldagem, conforme Figura 13 [27]. A versatilidade do processo MIG/MAG e a facilidade de mecanizar ou automatizar este processo contribuem com sua difusão, tanto nas operações de fabricação quanto nas de manutenção. É normalmente semi-automatizado, mas com o auxílio de sensores e de robôs ou manipuladores é possível tornar o processo totalmente automatizado.

Figura 13 - Representação esquemática do processo MIG/MAG.



Fonte: Modenesi e Villani (2000).

Este processo possui uma ampla faixa de aplicação em diferentes ligas e espessuras. A alimentação contínua do eletrodo nu, aliada com a possibilidade de elevadas velocidades de soldagem e a não formação de escória contribuem com a alta taxa de produtividade deste processo.

Existem basicamente quatro modos de transferência do metal de adição: curto-circuito, globular, goticular projetada e controlada [28], [29]. Os três primeiros utilizam fonte de tensão constante e são resultantes da regulagem dos parâmetros de soldagem. Atualmente, com o avanço da eletrônica das fontes de soldagem é possível utilizar

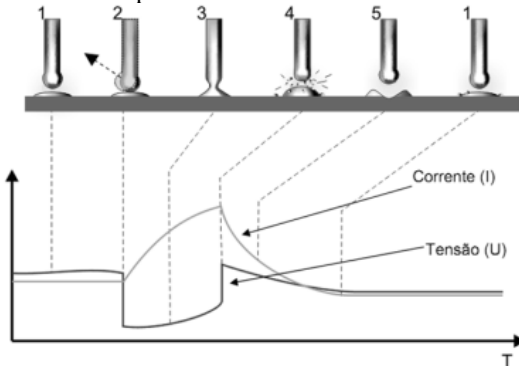
diferentes formas de onda de corrente que atuam diretamente no comportamento da transferência metálica. Entre as diversas formas de onda, a mais comumente utilizada é a forma de onda pulsada [28], [29].

Existem outras variantes, que podem monitorar alguma variável da soldagem, como tensão, corrente ou velocidade do arame e atuar nas variáveis do processo para proporcionar um controle da transferência metálica e estabilidade do processo.

#### 2.1.4.1 MIG/MAG Convencional – Transferência por Curto-Circuito

O modo de transferência metálica por curto-circuito ocorre quando se utiliza baixo valor de tensão e, conseqüentemente, baixo valor de corrente durante a fase de arco aberto. A transferência é dada por curto-circuito, conforme Figura 14, no qual a gota de metal formada na ponta do eletrodo aumenta de diâmetro até tocar na poça de fusão, quando o arco é extinto [30]. Quando a gota é transferida para a poça de fusão, o arco elétrico é reaberto e o processo se repete de forma aleatória. Esse processo apresenta grande instabilidade do arco elétrico e quantidade intensa de respingos. É normalmente empregado na soldagem manual de chapas finas e soldagem fora de posição [28], [29].

Figura 14 - Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência por curto-circuito.



Fonte: Silva (2005).

#### 2.1.4.2 MIG/MAG Convencional – Transferência Globular

Ocorre quando se utilizam valores intermediários de tensão e conseqüentemente de corrente. O diâmetro médio das gotas é em geral maior que o diâmetro do eletrodo. É caracterizada principalmente pela

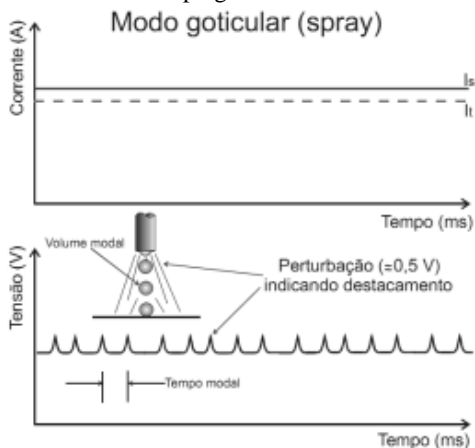


transferência irregular de gotas grandes em frequência muito baixa, com elevado nível de respingos. Devido à força gravitacional ser dominante neste tipo de transferência metálica, a soldagem é limitada à posição plana. Na soldagem vertical, as gotas podem cair sem acompanhar o arco. Estas desvantagens e o aspecto irregular do cordão de solda fazem com que este modo de transferência seja pouco aplicado na soldagem MIG/MAG [28], [29].

#### 2.1.4.3 MIG/MAG Convencional – Transferência Goticular Projetada

Esta variante ocorre quando se utilizam valores elevados de tensão e, conseqüentemente, de corrente, acima da faixa de corrente de transição ( $I_t$ ), que depende principalmente do gás de proteção e da composição do arame utilizado, conforme Figura 15. Neste modo, as gotas são pequenas, com diâmetro menor que o do eletrodo e apresenta elevada frequência de destacamento [31]. As gotas são projetadas seguindo o eixo do eletrodo, permitindo assim o uso desse processo em qualquer posição [28], [29].

Figura 15 - Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico durante a transferência do tipo goticular.



Fonte: Barra (1998).

As principais características são: a elevada estabilidade do arco, baixa quantidade de respingos, boa molhabilidade e penetração de solda, além de proporcionar cordões com bom aspecto superficial, favorecer a soldagem em alta velocidade e apresentar alta taxa de

deposição. A maior limitação deste processo é o tamanho elevado da poça de fusão, resultante das altas correntes utilizadas, no qual pode ocorrer o escorrimento da poça em situações fora da posição plana [31].

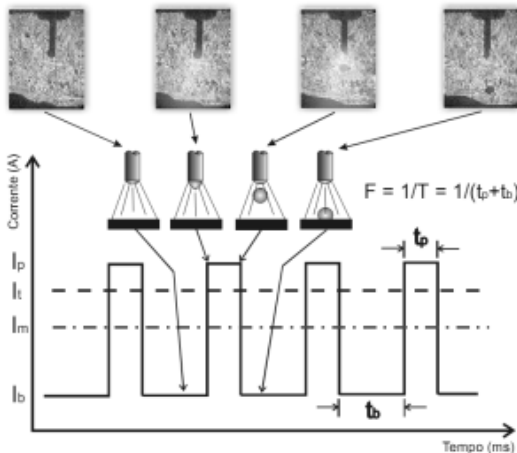
#### 2.1.4.4 MIG/MAG Pulsado

O modo Pulsado do processo MIG/MAG agrega as melhores características dos modos de transferência do tipo curto-circuito e goticular, para obter uma transferência estável e regular, com um valor de corrente baixa. Isto é possível modulando o sinal de corrente de soldagem, variando entre a corrente de base e a corrente de pulso, para se controlar a transferência das gotas [28], [29], [32].

A corrente de base mantém o arco aberto com baixa energia, enquanto que a corrente de pulso, com valor maior que a corrente de transição, serve para formar a gota e destacá-la [31], conforme Figura 16. A corrente média é a média ponderada das correntes de pulso e de base. Desta forma, uma transferência goticular é obtida com correntes médias abaixo da corrente de transição. Assim, é possível soldar tanto chapas finas como em todas as posições [32].

Com relação às desvantagens podemos citar o grande número de parâmetros e a dificuldade de defini-los, falta de fusão devido ao baixo calor de aporte, e a necessidade de soldadores mais treinados e de equipamentos mais complexos [31].

Figura 16 - Comportamento da tensão e da corrente do arco elétrico no processo MIG/MAG pulsado.

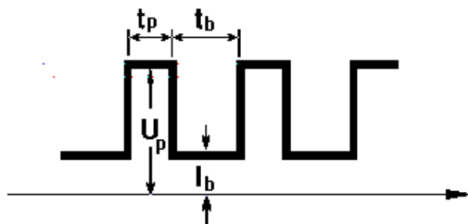


Fonte: Barra (1998).

### 2.1.4.5 MIG/MAG Pulsado Modo Misto

O Pulsado Modo Misto é uma variação do MIG/MAG pulsado, no qual é imposta uma corrente de referência durante a base e uma tensão de referência durante o pulso [33], conforme Figura 17. Esta técnica apresenta a capacidade de auto-ajuste do comprimento do arco, sem prejudicar a transferência metálica, diminuindo assim a sensibilidade do processo à variação da DBCP [28], [31].

Figura 17 - Variáveis do MIG/MAG pulsado modo misto.



Fonte: Gohr (2011).

Uma alteração da DBCP altera instantaneamente o comprimento do arco elétrico e por consequência a sua impedância. Para uma fonte de soldagem operando no modo corrente, a tensão se modifica de forma proporcional a impedância do arco. Quando o arco elétrico, por uma eventualidade, diminui seu tamanho, a tensão também diminuirá, reduzindo a energia do arco e a capacidade de fusão do eletrodo, podendo resultar até mesmo na interrupção do processo [33].

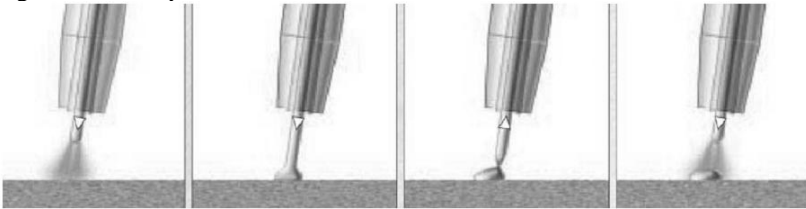
No modo tensão, a corrente se modifica de forma contrária a impedância do arco. Como esse processo utiliza tensão no pulso, a corrente está livre para variar de acordo com a altura do arco. Assim, este modo apresenta menor sensibilidade a pequenas variações de altura e tende a resultar em melhor estabilidade do arco.

### 2.1.4.6 MIG/MAG CMT

A variante CMT (*Cold Metal Transfer*), desenvolvida pela empresa austríaca Fronius, é baseada no processo MIG/MAG e tem como principal característica o controle do recuo do arame quando é detectado um curto-circuito. Com isso, o destacamento de gota acontece com menor corrente, e consequentemente, isento de respingos, além de manter o arco estável independentemente da qualidade da superfície ou da velocidade de soldagem [34].

Inicialmente, a fonte de soldagem impõe uma corrente necessária para a formação da gota metálica. Em seguida, a corrente é reduzida e mantida num patamar mais baixo até o arame tocar na peça e o curto-circuito ser detectado, Figura 18. No momento do curto circuito, a tensão tende a zero e a corrente é forçada a se manter baixa, proporcionando a acomodação da gota na peça. Depois, o arame é retrocedido mecanicamente, ajudando no destacamento da gota e facilitando a deposição do metal líquido por tensão superficial. Por fim, o processo reinicia, alimentando o arame até detectar novamente o curto-circuito [34].

Figura 18 – Comportamento do arame na variante *CMT*.



Fonte: Fronius (2011).

Existe ainda a combinação do CMT com o modo pulsado, no qual ocorrem diversos pulsos de corrente entre as transferências por curto-circuito com o recuo do arame controlado. Com isso, é possível controlar a geometria e penetração do cordão e o aporte térmico [34].

A limitação do CMT, para ser utilizada com o manipulador Tartilope V4, é o tamanho e o peso elevado da tocha, que exige um torque muito elevado do eixo angular, impossibilitando a execução correta das trajetórias de soldagem com o equipamento atual.

## 2.2 TÉCNICAS DE REVESTIMENTO

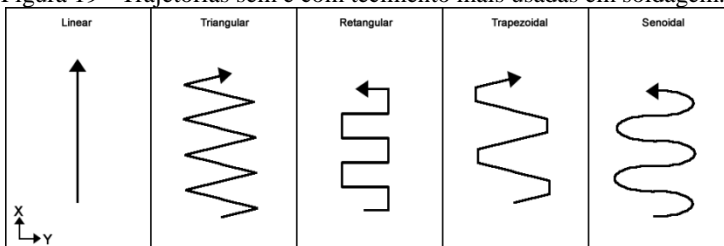
Os tubos são normalmente revestidos de forma mecanizada, com diversos passes lineares e alta velocidade de soldagem. Os cordões de solda resultantes são do tipo filete com um baixo valor de relação largura/altura. Além das características geométricas da secção transversal destes cordões de solda não 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.

As técnicas de tecimento, movimento periódico da tocha de soldagem, são geralmente realizadas transversalmente à direção de soldagem com o objetivo de diminuir o tempo total de soldagem de revestimento e o número de cordões de solda. Sua aplicação permite o preenchimento de juntas em um único passe ou a redução de número de passes, pois proporcionam um cordão mais largo, além de controlar a poça de fusão e tornar mais suave o ciclo térmico de soldagem [29]. O aumento da área contribui também com a distribuição do calor, resultando em menor diluição, penetração e reforço [35].

Existem diversos tipos de trajetórias de soldagem, Figura 19, sendo que os mais utilizados nos manipuladores apresentam as formas: linear, triangular, trapezoidal e retangular [7]. Em função da necessidade da aplicação é possível usar outras formas como a senoidal, exponencial, duplo oito, etc.

Figura 19 - Trajetórias sem e com tecimento mais usadas em soldagem.

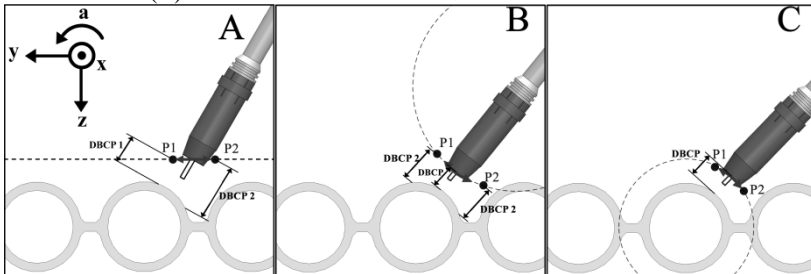


Essas trajetórias são aplicadas geralmente em superfícies planas, sendo executadas por intermédio de um eixo perpendicular ao sentido de soldagem. A aplicação em geometrias complexas, como em tubos, apresenta uma grande variação da altura da tocha devido à geometria cilíndrica dos tubos, limitando a amplitude máxima de tecimento principalmente nas laterais do tubo. Quanto maior o diâmetro do tubo, maior é a diferença de profundidade, que está relacionada com o eixo Z no equipamento utilizado.

Como o manipulador é fixado por meio de um trilho, que está situado paralelamente à parede de tubos, o tecimento é realizado somente no eixo Y, Figura 20(A) ou no eixo de oscilação A, Figura 20(B). Deste modo, se for aplicado um tecimento com as trajetórias convencionais, o resultado é uma variação significativa na DBCP. Para amenizar esse problema é possível aplicar a orientação da tocha de

maneira que esta fique perpendicular ao tubo e realize o tecimento por meio dos movimentos simultâneos dos eixos y e z do manipulador da tocha, Figura 20(C). Assim, essa variação de altura é minimizada e proporciona uma DBCP praticamente constante [37].

Figura 20 - Eixos envolvidos no tecimento: (A) somente o eixo Y, (B) somente o eixo X e em (C) os eixos Y e Z.



Fonte: Silva (2011).

As variáveis envolvidas nas trajetórias com tecimento são [38]:

- 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 tecimento no eixo Y;
- Frequência (Hz): é o número de ciclos de oscilação de tecimento do eixo Y 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.

Uma trajetória é composta pela forma geométrica do caminho no espaço cartesiano ou das juntas e pelo tempo para realizar o deslocamento [38]. No manipulador Tartflope V4, o movimento é especificado no espaço cartesiano e a trajetória está diretamente relacionada com as variáveis de soldagem.

Com base nos processos de soldagem abordados, foi escolhido o processo MIG/MAG pulsado misto, devido, principalmente, à menor sensibilidade a variação da DBCP. Para a trajetória de tecimento, foi escolhido o tecimento do tipo triangular, por apresentar uma distribuição mais uniforme e apresentar um menor número de pontos.





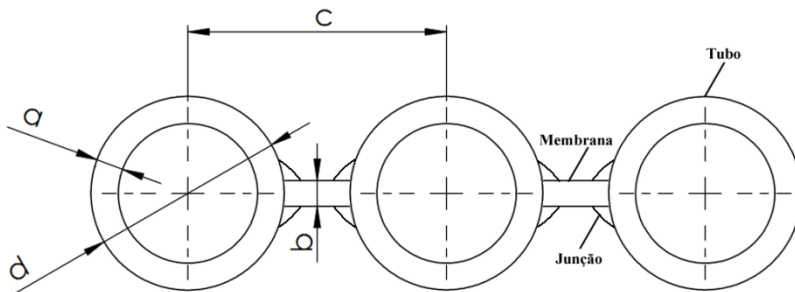
### 3 DESENVOLVIMENTO DAS TRAJETÓRIAS DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM

Neste capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas para desenvolver e implementar, no manipulador cartesiano Tartilope V4, o algoritmo de geração de trajetórias para o revestimento de tubos de caldeiras com orientação vertical ou horizontal.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA DAS PAREDES DE CALDEIRAS

As paredes das caldeiras de usinas termoelétricas são formadas por vários tubos, unidos por solda às membranas, conforme mostra a Figura 21. Além da orientação dos tubos destas paredes, vertical ou horizontal com uma inclinação de aproximadamente  $15^\circ$ , existem vários modelos de paredes caracterizados pelo conjunto de parâmetros dimensionais:  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ .

Figura 21 - Características e parâmetros dimensionais das paredes de caldeiras.



A Tabela 1 apresenta os valores destes parâmetros dimensionais para as três configurações de paredes encontradas na caldeira da unidade C do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda [39]. A primeira 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. Esta unidade é responsável por 42% de geração de energia do complexo e é a que mais apresenta problemas de corrosão e erosão.

Cabe ressaltar, que as trajetórias de soldagem no manipulador da tocha são calculadas com base na orientação dos tubos e nos valores dos parâmetros dimensionais da parede a ser revestida.

Tabela 1- Dimensões das configurações de paredes mais encontradas.

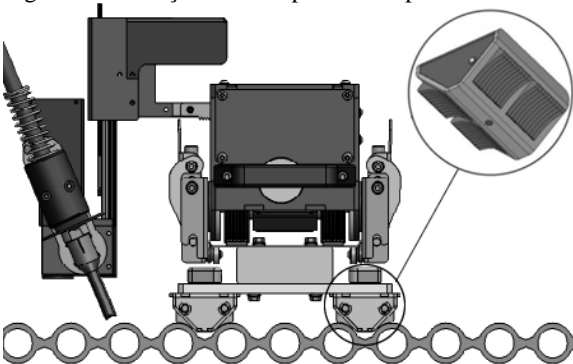
Parâmetro	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
a (mm)	5,0	5,6	5,0
b (mm)	6,0	6,0	6,0
c (mm)	56,0	56,0	60,0
d (mm)	38,0	42,0	32,0

Fonte: Labsolda (2009).

### 3.2 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO E DA ORIENTAÇÃO INICIAL DA TOCHA

O trilho magnético, eixo X do manipulador, é fixado nas paredes das caldeiras de forma paralela aos eixos longitudinais dos tubos por meio de sapatas magnéticas, como mostra a Figura 22. Essas sapatas magnéticas são projetadas para cada configuração de parede e se encaixam entre dois tubos. Mesmo assim, alguns desalinhamentos permanecem devido à existência de deformações nos tubos causados pelo calor aplicado às paredes. Esses pequenos desalinhamentos podem ser corrigidos durante o procedimento de soldagem utilizando o controle de correção manual dos eixos do manipulador e, futuramente, por intermédio do controle automático de altura da tocha.

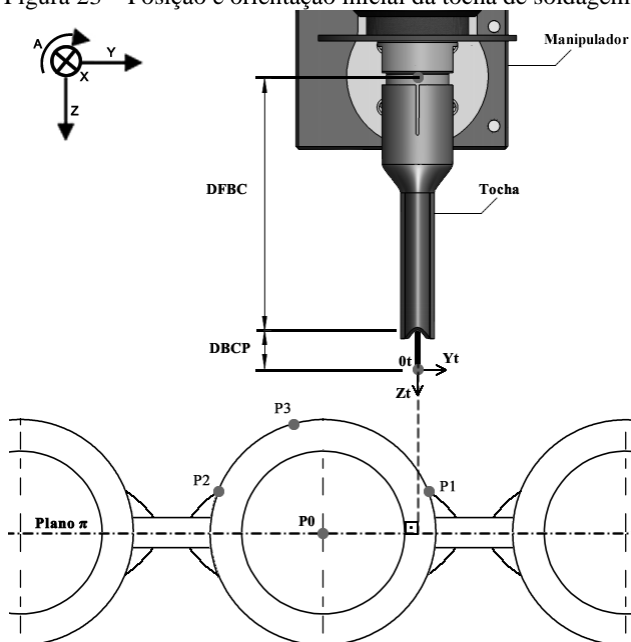
Figura 22 - Fixação do manipulador na parede tubular.



Após fixar o manipulador na parede da caldeira o próximo passo é referenciar todos os eixos do manipulador e, a seguir, definir a posição e a orientação inicial da tocha de soldagem na região que se deseja revestir. A posição da origem do sistema de coordenadas da

tocha,  $0_t$ , é fixa e localizada a uma distância do centro do eixo angular A do manipulador, correspondente à soma da DBCP nominal com a DFBC (distância flange bico de contato), conforme mostra a Figura 23. A orientação inicial da tocha é normal ao plano central da parede de tubos, plano  $\pi$ .

Figura 23 – Posição e orientação inicial da tocha de soldagem.



A seguir, é necessário definir as coordenadas do ponto central do tubo, ponto  $P0(0, y_0, z_0)$ , a fim de determinar a posição de zero peça para as etapas de revestimento. Para isso, utiliza-se a tocha de soldagem do manipulador para determinar este ponto.

Na sequência, o operador posiciona a tocha, via a interface do usuário do manipulador, para determinar os três pontos  $P1(0, y_1, z_1)$ ,  $P2(0, y_2, z_2)$  e  $P3(0, y_3, z_3)$ . Os pontos  $P1$  e  $P2$  estão situados nas extremidades superiores dos cordões de solda de união, entre a membrana e o tubo, e o ponto  $P3$  na superfície não revestida do tubo, próximo ao topo, Figura 23. Eles são marcados nestas regiões específicas para facilitar a geração da trajetória da junção.

Cada região da parede pode apresentar diferentes espessuras na superfície desgastada. Assim, é necessário definir um novo raio e o

ponto central do tubo, para que a trajetória gerada seja a mais próxima da geometria do tubo desgastado, conforme equação 3.1.

$$F(y_0, z_0, r) = (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - r^2 = 0 \quad (3.1)$$

Para definir as coordenadas  $y_0$  e  $z_0$  do ponto central e o raio  $r$  do tubo, é aplicado o método dos mínimos quadrados para equações não lineares com sucessivas iterações [40]. As condições iniciais deste método são as coordenadas de no mínimo três pontos P1, P2 e P3 e uma estimativa dos valores procurados, conforme equação 3.2.

$$y_0 = y_3; z_0 = z_3 + \frac{d}{2}; r = \frac{d}{2} \quad (3.2)$$

A seguir é calculada a matriz Jacobiana e o vetor residual com as condições iniciais pelas equações 3.3 e 3.4.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial y_0} & \frac{\partial F_1}{\partial z_0} & \frac{\partial F_1}{\partial r} \\ \frac{\partial F_2}{\partial y_0} & \frac{\partial F_2}{\partial z_0} & \frac{\partial F_2}{\partial r} \\ \frac{\partial F_3}{\partial y_0} & \frac{\partial F_3}{\partial z_0} & \frac{\partial F_3}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 - F_1 \\ 0 - F_2 \\ 0 - F_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Onde as derivadas parciais da matriz Jacobiana são expressas pelas seguintes equações 3.5, 3.6 e 3.7.

$$\frac{\partial F}{\partial y_0} = -2 * (y - y_0); \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial z_0} = -2 * (z - z_0); \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial r} = -2 * r \quad (3.7)$$

Os ajustes  $\Delta y_0$ ,  $\Delta z_0$  e  $\Delta r$  e os valores calculados na primeira iteração são expressos respectivamente pelas seguintes equações 3.8 e 3.9.

$$\begin{bmatrix} \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \\ \Delta r \end{bmatrix} = (J^t * J)^{-1} * J^t * K \quad (3.8)$$

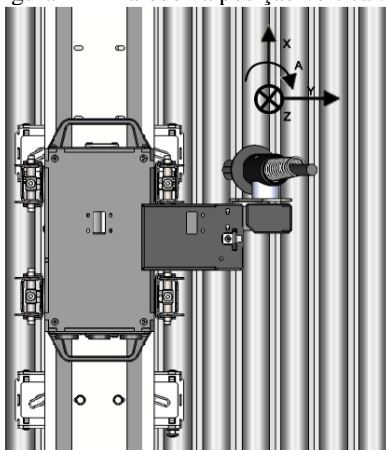
$$y'_0 = y_0 + \Delta y_0; z'_0 = z_0 + \Delta z_0; r' = r + \Delta r \quad (3.9)$$

São realizadas sucessivas iterações até que os ajustes, calculados pela equação 3.8, tornem-se menores que o valor do erro admissível, de 0,01 mm. Enquanto isto não ocorrer, os valores iniciais da próxima iteração serão os fornecidos pelo conjunto de equações 3.9.

### 3.3 METODOLOGIA PARA TUBOS COM ORIENTAÇÃO VERTICAL

A parede na posição vertical, Figura 24, é revestida no sentido longitudinal aos tubos. Neste caso, o sentido de soldagem utilizado é o vertical descendente, com orientação da tocha perpendicular ao plano  $\pi$ . Esta posição de soldagem foi escolhida, pois com o auxílio da força da gravidade, é possível conseguir velocidades maiores sem que a poça de fusão escorra.

Figura 24 – Parede na posição vertical.



As paredes das caldeiras a serem revestidas são divididas em membrana, junção membrana-tubo e tubo, conforme diretriz da *Electric Power Research Institute* [41]. Cada uma destas regiões apresenta características diferentes e necessitam de trajetórias específicas para serem revestidas. Deste modo, o procedimento para revestir as paredes é também dividido em três etapas sequenciais, começando pela membrana, seguindo para a junção membrana-tubo e, por fim, o tubo.

### 3.3.1 Membrana

A primeira etapa corresponde ao passe da membrana, no qual é necessário apenas tecimento no eixo Y, devido à condição de paralelismo existente entre a superfície da membrana e o plano XY do manipulador. Inicialmente, o operador informa ao programa do manipulador os parâmetros da trajetória de tecimento transversal e a distância,  $l$ , a ser revestida a partir da cota  $x$  da posição inicial.

A seguir, são calculadas, as coordenadas dos pontos pertencentes à trajetória de soldagem das membranas, pelas equações 3.10 a 3.14.

$$P4(0, y_4, z_4) = P4(0, y_0, z_0 - c/2) \quad (3.10)$$

$$P5(0, y_5, z_5) = P5(0, y_0 + c/2, z_0 - b/2) \quad (3.11)$$

$$P5'(l, y_5, z_5) = P5'(-l, y_0 + c/2, z_0 - b/2) \quad (3.12)$$

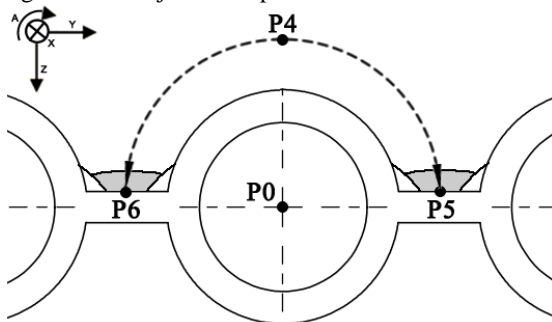
$$P6(0, y_6, z_6) = P6(0, y_0 - c/2, z_0 - b/2) \quad (3.13)$$

$$P6'(l, y_6, z_6) = P6'(-l, y_0 - c/2, z_0 - b/2) \quad (3.14)$$

Na sequência, o operador habilita a execução do revestimento das membranas e a tocha é deslocada, de forma automática pelo manipulador, do ponto  $P4$  até o ponto  $P5$ , como mostra a Figura 25. Neste ponto, a fonte de soldagem é acionada e o cordão de solda é realizado até o ponto  $P5'$ , que corresponde ao ponto final do cordão, situado a uma distância  $l$  no sentido longitudinal ao tubo. A seguir, o manipulador 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 é realizado até o ponto  $P6'$ , que corresponde também ao ponto final deste cordão. Por fim, o manipulador retorna a tocha, até o ponto  $P6$ , e segue para ponto

P4. Neste ponto, o manipulador fica aguardando o operador habilitar a execução da próxima etapa.

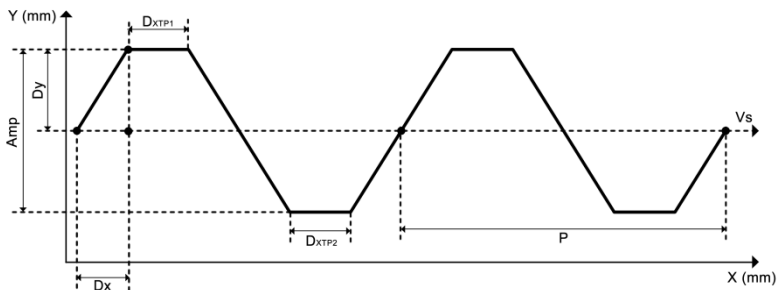
Figura 25 – Trajetória de posicionamento do revestimento da membrana.



Os cordões de solda aplicados na membrana utilizam trajetórias com tecimento, que é um movimento oscilatório e transversal da tocha na direção da soldagem, com o objetivo principal de aumentar a largura do cordão e realizar essa etapa com apenas um cordão de solda por membrana. As duas trajetórias mais utilizadas na soldagem de membrana são a do tipo trapezoidal, Figura 26, e do tipo triangular, Figura 27, sendo que a segunda é obtida a partir da primeira fazendo  $D_{XTP1}$  e  $D_{XTP2}$  iguais a zero.

Os tempos  $TP1$  (tempo de parada 1) e  $TP2$  (tempo de parada 2) proporcionam um período para depositar mais material nas extremidades do cordão, sendo que durante esse tempo, o equipamento se desloca somente no sentido de soldagem, eixo X.

Figura 26 – Tecimento Trapezoidal.



As trajetórias são calculadas com base nos parâmetros de movimento informados pelo operador na interface do equipamento, que são: a velocidade de soldagem  $V_S$ , os tempos de parada  $TP1$  e  $TP2$  nas extremidades do movimento, a amplitude  $Amp$  e a frequência de tecimento  $f$ , do qual é obtido o período  $P$ . 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  $D_y$ .

Durante os tempos  $TP1$  e  $TP2$  a velocidade da tocha coincide com a velocidade  $V_X$  do eixo X e também com a velocidade de soldagem  $V_S$  conforme mostra a equação 3.15. Como o eixo Y fica parado durante esse tempo, sua velocidade é nula, conforme equação 3.16.

$$V_X = V_S = V_t \quad (3.15)$$

$$V_Y = 0 \quad (3.16)$$

As distâncias  $D_{XTP1}$  e  $D_{XTP2}$ , a serem percorridas durante os tempos de parada, são calculadas pelas equações 3.17 e 3.18. Podendo ser diferente para cada lado do tecimento, se utilizado tempos diferentes.

$$D_{XTP1} = V_S * TP1 \quad (3.17)$$

$$D_{XTP2} = V_S * TP2 \quad (3.18)$$

Nos outros intervalos de tempo do ciclo de tecimento, os eixos X e Y são deslocados simultaneamente, conforme mostra a Figura 26. A distância no sentido de soldagem  $D_x$  é calculada conforme equação 3.19 e a distância no sentido de tecimento  $D_y$  é igual à metade da amplitude, conforme equação 3.20.

$$D_x = \frac{V_S * (P - (TP1 + TP2))}{4} \quad (3.19)$$

$$D_y = \frac{Amp}{2} \quad (3.20)$$



A velocidade do eixo Y é calculada com base na amplitude de tecimento e no intervalo de tempo utilizado para o deslocamento da tocha, equação 3.21.

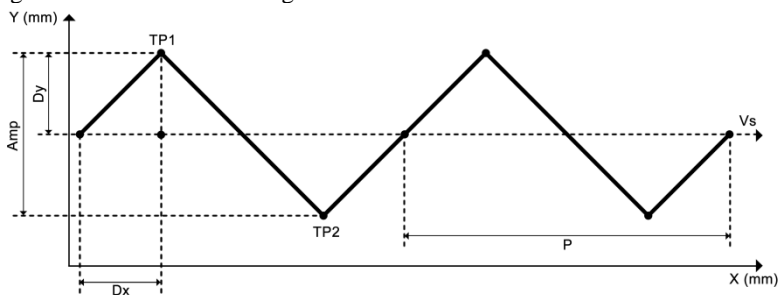
$$V_y = \frac{2 \cdot \text{Amp}}{P - \text{TP1} - \text{TP2}} \quad (3.21)$$

Com as componentes de velocidade dos eixos,  $V_x$  (equação 3.15) e  $V_y$  (equação 3.21), envolvidos nesta trajetória planar de tecimento, é determinada a velocidade da tocha, equação 3.22.

$$V_t = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3.22)$$

O tecimento do tipo triangular é o mais utilizado em revestimento, pois apresenta um menor espaçamento entre os segmentos adjacentes de sua trajetória. Esta característica minimiza o surgimento de falta de fusão nas extremidades laterais do respectivo cordão de solda.

Figura 27 – Tecimento Triangular.



Neste caso, as distâncias a serem percorridas,  $D_x$  e  $D_y$ , em cada eixo e a velocidade da tocha,  $V_t$ , são calculadas respectivamente pelas equações 3.19 e 3.20 fazendo TP1 e TP2 iguais à zero.

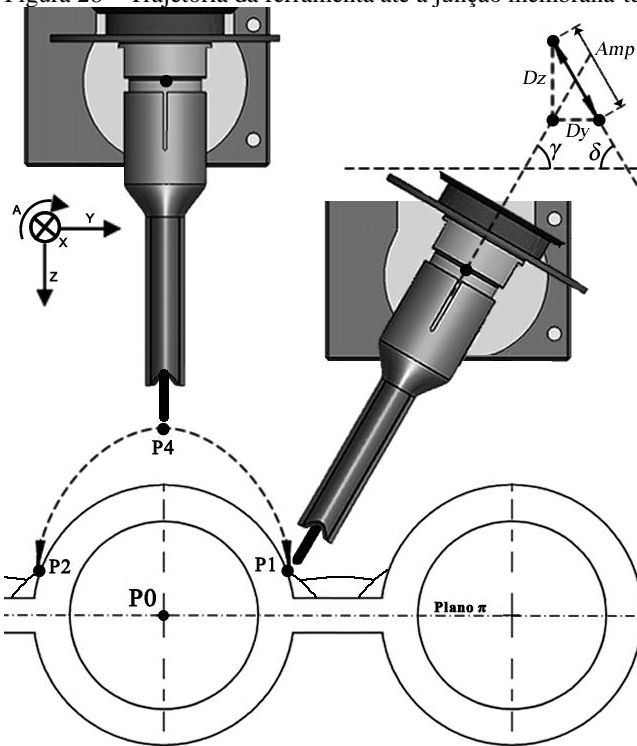
### 3.3.2 Junção membrana-tubo

A segunda etapa de revestimento é referente à junção membrana-tubo, necessária para ancorar os cordões de solda da terceira etapa, e evitando assim, defeitos por falta de fusão. Os cordões de solda desta etapa devem ser executados com uma pequena amplitude de

tecimento, para evitar o excesso de sobreposição com o cordão da membrana. Outro problema é a possibilidade de haver colisão entre a tocha e o tubo adjacente, e por isso não é realizado um tecimento do tipo cilíndrico, no qual a orientação da tocha acompanharia a superfície curva do tubo. Assim, o tecimento realizado nesta etapa é do tipo planar, ou seja, é realizado em linha reta entre as extremidades da trajetória de tecimento.

Ao habilitar o processo, a tocha, localizada no ponto P4 e com orientação perpendicular ao plano  $\pi$ , é simultaneamente rotacionada de  $(90^\circ - \gamma)$  graus no sentido horário e deslocada, de forma automática pelo manipulador, até o ponto P1 como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Trajetória da ferramenta até a junção membrana-tubo.



Inicialmente são definidos a inclinação da tocha e o plano de tecimento. O ângulo  $\gamma$  corresponde à inclinação da tocha, sendo variável de acordo com diâmetro do tubo de cada configuração de parede.

Quanto maior o raio do tubo, maior deve ser o valor de  $\gamma$ , para evitar que a tocha e/ou o equipamento colidam com o tubo adjacente. Para a configuração 1, o valor de  $\gamma$  foi fixado em 60 graus.

Do mesmo modo que o ângulo de inclinação da tocha, o ângulo do plano de tecimento  $\delta$ , em relação ao plano  $\pi$ , também é variável e está relacionado ao raio do tubo para evitar a colisão. Para a configuração 1, o valor de  $\delta$  também foi fixado em 60 graus.

A localização do ponto  $P1$  depende do reforço do cordão de solda usado para fixar o tubo na membrana e é obtida na determinação da posição inicial da tocha. Com a distância,  $l$ , a ser revestida a partir da cota  $x$  da posição inicial, são definidos os pontos  $P1'(-l, y_1, z_1)$  e  $P2'(-l, y_2, z_2)$ , referentes ao ponto final das trajetórias iniciadas nos pontos  $P1$  e  $P2$  respectivamente.

Durante a execução do tecimento, o manipulador move simultaneamente os eixos X, Y e Z. As componentes de distância  $D_x$  e velocidade  $V_x$  do eixo X são calculadas de forma similar à trajetória da membrana, equações 3.19 e 3.15 respectivamente. Para os eixos Y e Z, as distâncias  $D_y$  e  $D_z$  são calculadas com as equações 3.23 e 3.24 respectivamente e representam a projeção da amplitude de tecimento nos eixos correspondentes.

$$D_y = Amp * \cos(\delta) \quad (3.23)$$

$$D_z = Amp * \sin(\delta) \quad (3.24)$$

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 equações 3.25 e 3.26.

$$V_y = \frac{D_y}{P - TP1 - TP2} \quad (3.25)$$

$$V_z = \frac{D_z}{P - TP1 - TP2} \quad (3.26)$$

Com as velocidades ( $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ ), envolvidos nesta trajetória planar de tecimento, é determinada a velocidade da tocha, equação 3.27.

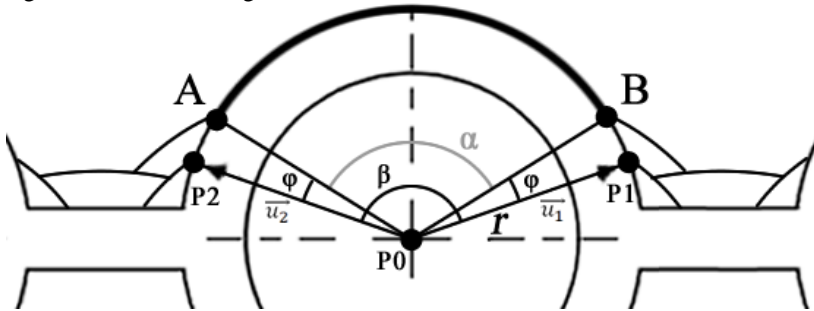
$$V_t = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (3.27)$$

Após determinar os 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.

### 3.3.3 Tubo

Após executar o revestimento da membrana e da junção dos dois lados do tubo, é realizada a terceira e última etapa, que correspondente ao revestimento do tubo. Primeiramente, é necessário definir o comprimento do arco  $AB$  da superfície do tubo que precisa ser revestida, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Pontos e ângulos iniciais do arco a ser revestido.



Para isso, são calculados os vetores  $\vec{u}_1$  e  $\vec{u}_2$ , que representam a distância do ponto central  $P0$  até os pontos  $P1$  e  $P2$ , com as equações 3.28 e 3.29. O ângulo  $\beta$ , que corresponde ao ângulo entre os vetores  $\vec{u}_1$  e  $\vec{u}_2$ , é calculado pela equação 3.30.

$$\vec{u}_1 = [0 \quad y_1 - y_0 \quad z_1 - z_0] \quad (3.28)$$

$$\vec{u}_2 = [0 \quad y_2 - y_0 \quad z_2 - z_0] \quad (3.29)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{u}_1 \cdot \vec{u}_2}{\|\vec{u}_1\| \cdot \|\vec{u}_2\|} \right) \quad (3.30)$$

O ângulo  $\varphi$ , que correspondente à metade da amplitude do cordão de solda da junção membrana tubo, é estimado a partir de sua própria trajetória, conforme mostra a equação 3.31. Com os ângulos  $\beta$  e  $\varphi$  definidos, são calculados o ângulo  $\alpha$  e o respectivo comprimento do arco AB, conforme as equações 3.32 e 3.33.

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Amp}{2 * r}\right) \quad (3.31)$$

$$\alpha = \beta - (2 * \varphi) \quad (3.32)$$

$$AB = \frac{\pi * r * \alpha}{180} \quad (3.33)$$

A amplitude de tecimento, equação 3.34, é calculada com base no número de cordões de solda desejados, a distância entre as extremidades do tecimento *det* e o comprimento do arco AB.

$$Amp = \frac{AB - det * (N_c - 1)}{N_c} \quad (3.34)$$

Para obter um revestimento com mínima altura sem comprometê-lo por uma excessiva ondulação, utiliza-se o critério da mínima superposição dos cordões de solda, ou seja, a distância entre os centros de dois cordões adjacentes é igual à amplitude de tecimento [42]. Entretanto, dependendo dos parâmetros de soldagem e de deslocamento, do material de adição, da posição de soldagem e da mistura de gás utilizada, é possível que cordão resultante tenha uma sobreposição excessiva. Nestes casos, utiliza-se uma distância, entre os centros de cordões adjacentes, maior que à amplitude de tecimento (Figura 30), para evitar o desperdício de material por meio da aplicação de camadas muito espessas de solda.

Cada cordão é representado por três pontos, o ponto de posicionamento, referente ao ponto central do cordão  $M_i$ , e os pontos das extremidades laterais da trajetória de tecimento  $E'_i$  e  $E''_i$ . Eles são compostos por coordenadas nos eixos Y e Z e pelo ângulo  $\delta$  entre o ponto central do cordão e o plano  $\pi$ . As coordenadas polares, ângulos  $\delta_i$ , referentes ao ponto central  $M_i$  de tecimento de cada cordão de solda são determinadas pela equação 3.35. Os ângulos das extremidades do tecimento são calculados subtraindo ou somando  $\theta$  do ângulo central. O

valor de  $\theta$  corresponde ao ângulo entre a extremidade da trajetória, ponto  $E'_i$ , e o centro do cordão, ponto  $M_i$ , e é calculado conforme equação 3.36.

$$\delta_i = 90^\circ + \left( \frac{2i - N_c - 1}{2 \cdot N_c} \right) \cdot \alpha \quad ; \text{Com } i = 1, 2, \dots, N_c \quad (3.35)$$

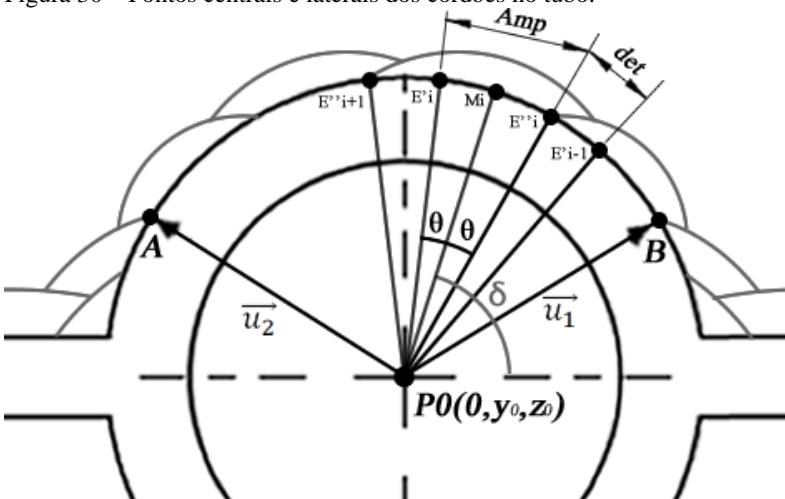
$$\theta = \frac{\alpha}{2 \cdot N_c} \quad (3.36)$$

Por fim, as coordenadas cartesianas dos pontos extremos,  $E'_i$  e  $E''_i$ , e o ponto central  $M_i$  de tecimento de cada cordão de solda são definidos pelas seguintes relações, equação 3.37.

$$\begin{cases} E'_i(0, y_0 + r \cdot \cos(\delta_i + \theta), z_0 + r \cdot \text{sen}(\delta_i + \theta)) \\ M_i(0, y_0 + r \cdot \cos(\delta_i), z_0 + r \cdot \text{sen}(\delta_i)) \\ E''_i(0, y_0 + r \cdot \cos(\delta_i - \theta), z_0 + r \cdot \text{sen}(\delta_i - \theta)) \end{cases} ; \text{Com } i = 1, 2, \dots, N_c \quad (3.37)$$

Cada conjunto de pontos ( $E'_i$ ,  $M_i$  e  $E''_i$ ) define o caminho do tecimento do respectivo cordão de solda. A variação da DBCP no ciclo de tecimento é muito pequena, mesmo utilizando um tecimento planar tangente ao ponto central do cordão, pois a trajetória gerada é muito próxima à da circunferência externa do tubo.

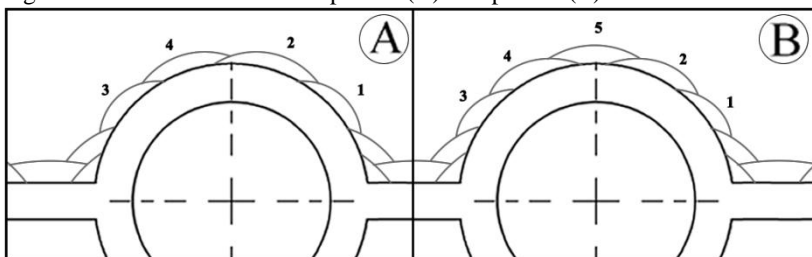
Figura 30 – Pontos centrais e laterais dos cordões no tubo.



O tecimento utilizado nesta etapa também é do tipo planar. A variação da altura entre os pontos extremos e o centro do tecimento é muito pequena, como pode ser observado na Figura 30, e não precisa de uma reorientação da tocha para amplitudes pequenas.

Considerando que a aplicação dos cordões de solda na junção, em ambos os lados do tubo, resultem em cordões com geometria similar, é possível dividir os cordões no tubo de forma que a disposição dos mesmos seja simétrica. Assim, se o número de cordões desejado for par, o algoritmo divide metade dos cordões para um lado do tubo e a outra para o outro lado, sendo o encontro dos cordões superiores localizado exatamente no centro do tubo (Figura 31A). Para um número ímpar de cordões, o último seria aplicado no centro do tubo, finalizando assim o revestimento (Figura 31B).

Figura 31 – Número de cordões par em (A) e ímpar em (B).



A ordem de execução dos cordões também é muito importante, para que haja continuidade do revestimento. Ela deve ser no sentido da membrana para o tubo, no qual é iniciada do lado direito do tubo, com o cordão 1, seguindo em direção ao topo do tubo com o cordão 2 como mostra a Figura 31. Após um lado estar revestido, a mesma sequência é realizada no lado esquerdo do tubo, começando pelo cordão 3 e, em seguida, o cordão 4. Esta sequência foi escolhida visando minimizar o tempo de posicionamento da tocha pelo manipulador.

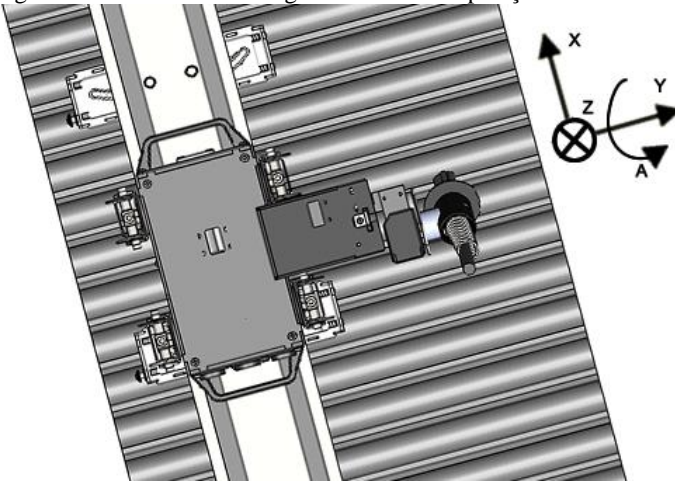
### 3.4 METODOLOGIA PARA TUBOS COM ORIENTAÇÃO HORIZONTAL

Uma parede com tubos horizontais apresenta diversas posições de soldagem quando se deseja revesti-la na direção longitudinal. Na parte superior do tubo, a posição é plana, na região central a posição de soldagem muda para horizontal e no lado inferior para sobrecabeça.

Assim, o revestimento na direção longitudinal dos tubos necessita de um conjunto de parâmetros específicos, tanto de soldagem quanto de trajetória, para cada cordão de solda.

O revestimento aplicado no sentido transversal aos tubos, Figura 32, é uma solução que usa apenas um conjunto de parâmetros robustos de soldagem capaz de proporcionar um revestimento com características similares em toda a superfície dos tubos, devido a força da gravidade auxiliar na formação da poça de fusão.

Figura 32 – Sentido da soldagem dos tubos na posição horizontal.



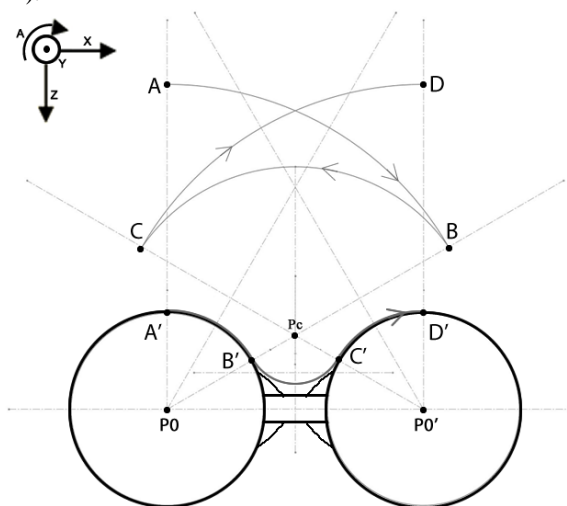
Neste caso, o eixo angular é alterado de posição e, ao invés de de rotacionar em torno do eixo X, ele rotaciona em torno do eixo Y. Com essa alteração, o sentido de soldagem continua sendo no eixo X, o movimento de tecimento da tocha é executado pelo eixo Y e as coordenadas do ponto central do tubo passam a ser:  $P0(x_0, 0, z_0)$ .

Para realizar essa trajetória, é necessário que o eixo angular do manipulador tenha uma dinâmica suficientemente rápida, de modo a possibilitar a variação de orientação da tocha durante a execução de cada cordão de solda.

Para que a ponta da tocha acompanhe o perfil da parede (caminho  $A' - B' - C' - D'$  na Figura 33), o eixo angular necessita girar no sentido horário durante a parte correspondente ao tubo (caminhos  $A - B$  e  $C - D$ ), e girar no sentido anti-horário durante a junção e membrana (caminho  $B - C$ ).

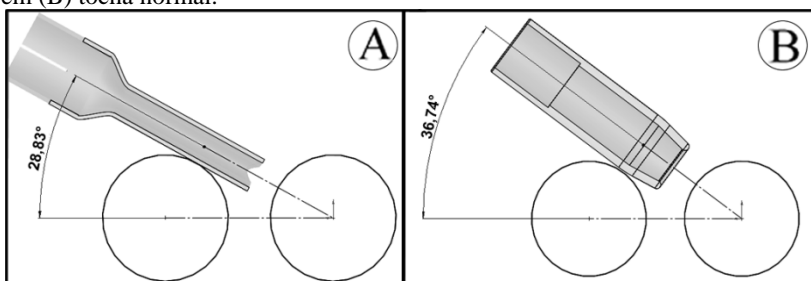


Figura 33 – Caminho do ponto central do eixo angular do manipulador (**A – B – C – D**) e da origem do sistema de coordenadas da tocha (**A' – B' – C' – D'**).



Outra questão importante é a inclinação máxima da tocha, para evitar a colisão da tocha com os tubos durante a execução do revestimento. Utilizando um bocal achatado, Figura 34A, é possível ter um ganho de quase  $8^\circ$  de inclinação em relação a uma tocha padrão, Figura 34B.

Figura 34 – Limite máximo da inclinação das tochas: Em (A) Tocha achatada e em (B) tocha normal.



Para realizar essa trajetória ao redor dos tubos, é necessário definir os pontos  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  e  $D'$ . O ponto  $A'$  é calculado com base no centro do tubo, ponto  $P_0$  ( $x_0, 0, z_0$ ), conforme a equação 3.38.

$$A' = (x_0, 0, z_0 - r) \quad (3.38)$$

O ponto  $B'$  foi definido com base na limitação de inclinação da tocha, ou seja,  $30^\circ$  em relação ao plano  $\pi$ , conforme equação 3.39.

$$B' = (x_0 + r * \cos 30^\circ, 0, z_0 + r * \sin 30^\circ) \quad (3.39)$$

Os pontos  $C'$  e  $D'$  são calculados com base no centro do próximo tubo, que está afastado a uma distância equivalente ao centro dos tubos  $c$ , no sentido do eixo X. Assim, as coordenadas  $C'_x$  e  $C'_z$  do ponto  $C'$  são calculadas com base no raio do tubo, com inclinação de  $150^\circ$ , conforme equação 3.40. As coordenadas  $D'_x$  e  $D'_z$  do ponto  $D'$  possuem os mesmos valores que o ponto  $A'$ , deslocada a distância  $c$ , conforme equação 3.41.

$$C' = (r * \cos 150^\circ + c, 0, r * \sin 150^\circ) \quad (3.40)$$

$$D' = (x_0 + c, 0, z_0 - r) \quad (3.41)$$

Com os pontos definidos, o próximo passo é calcular as velocidades angulares para o caminho  $A' - B' - C' - D'$ , sendo a velocidade do trecho  $C' - D'$ , igual a do trecho  $A' - B'$ .

Inicialmente, é calculado o ponto central  $P_c$  do raio do caminho  $B' - C'$ . As coordenadas  $P_{cx}$  e  $P_{cz}$  correspondem, respectivamente, à metade da distância entre os tubos  $c$  e a altura em relação ao plano  $\pi$ , conforme equação 3.42.

$$P_c = \left(x_0 + \frac{c}{2}, 0, z_0 - \frac{c}{2} * \tan 30^\circ\right) \quad (3.42)$$

Em seguida são calculados os comprimentos de arco  $A' - B'$  e  $B' - C'$ , conforme equações 3.43 e 3.44, onde  $r$  é o raio do tubo e  $r'$  a distância entre o ponto  $P_c$  e o ponto  $B'$ .

$$AB = \frac{\pi * r * 60^\circ}{180^\circ} \quad (3.43)$$

$$BC = \frac{\pi * r' * 120^\circ}{180^\circ} \quad (3.44)$$

O período é calculado em função do comprimento do arco e da velocidade de soldagem  $V_S$ , conforme equações 3.45 e 3.46.

$$P_{AB} = \frac{AB}{V_S} \quad (3.45)$$

$$P_{BC} = \frac{BC}{V_S} \quad (3.46)$$

As velocidades do eixo angular, em graus por minuto, para os dois arcos são definidas, respectivamente, pelas equações 3.47 e 3.48.

$$GpM_{AB} = \frac{60^\circ}{P_{AB}} \quad (3.47)$$

$$GpM_{BC} = \frac{120^\circ}{P_{BC}} \quad (3.48)$$

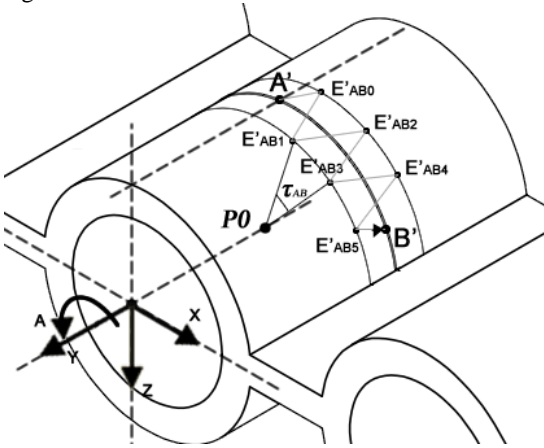
Para calcular o tecimento, foi dividido o período total pelo período de um tecimento  $P$ , que está relacionado à frequência de tecimento. Assim, é obtido o número de ciclos de tecimento com as equações 3.49 e 3.50.

$$Nc_{AB} = \frac{P_{AB}}{P} \quad (3.49)$$

$$Nc_{BC} = \frac{P_{BC}}{P} \quad (3.50)$$

O ciclo inicial parte do centro do cordão ( $A'$ ) até a extremidade da trajetória ( $E'_{AB0}$ ), enquanto que o ciclo final parte da extremidade até o centro do cordão ( $B'$ ). Para os demais ciclos intermediários, a trajetória é definida por 3 pontos, começando em uma extremidade, passando pela outra e retornando para o lado da primeira extremidade, sendo o ponto inicial igual ao ponto final do ciclo anterior, conforme Figura 35. O ângulo  $\tau$  entre os pontos laterais da trajetória no plano X e Z é calculado com base no número de ciclos de tecimento e o ângulo entre o ponto inicial  $A'$  e final  $B'$ , conforme equações 3.51 e 3.52.

Figura 35 - Pontos do tecimento no arco AB.



$$\tau_{AB} = \frac{60^\circ}{Nc_{AB}} \quad (3.51)$$

$$\tau_{BC} = \frac{120^\circ}{Nc_{BC}} \quad (3.52)$$

As coordenadas dos pontos são calculadas em sequência, sendo as coordenadas referentes ao ponto inicial definida na equação 3.53, as coordenadas do ciclo intermediário, que é calculada  $n$  vezes com a equação 3.54, e do ponto final, equação 3.55. A distância no eixo Y é igual ao valor da amplitude para os ciclos intermediários e a metade da amplitude para os ciclos inicial e final.

$$E'_{AB0} (x_0 + r * \cos(90^\circ - \tau_{AB}/2), 0, z_0 + r * \text{sen}(90^\circ - \tau_{AB}/2)) \quad (3.53)$$

$$E'_{ABi} \left( x_0 + r * \cos(90^\circ - i * \tau_{AB}), \begin{cases} -\frac{\text{Amp}}{2}, & \text{se } i = \text{ímpar} \\ +\frac{\text{Amp}}{2}, & \text{se } i = \text{par} \end{cases}, z_0 + r * \text{sen}(90^\circ - i * \tau_{AB}) \right) \quad (3.54)$$

; Com  $i = 1, 2, \dots, Nc_{AB} - 1$

$$E'_{AB Nc_{AB}} (x_0 + r * \cos(30^\circ + \tau_{AB}/2), 0, z_0 + r * \text{sen}(30^\circ + \tau_{AB}/2)) \quad (3.55)$$

As componentes da velocidade da tocha no arco AB e da velocidade de tecimento são calculadas respectivamente com as equações 3.56 e 3.57 e a velocidade resultante, pela equação 3.58.

$$V_{xz} = \frac{AB}{P_{AB}} \quad (3.56)$$

$$V_y = \frac{2 * Amp}{P} \quad (3.57)$$

$$V_t = \sqrt{V_{xz}^2 + V_y^2} \quad (3.58)$$

O mesmo procedimento é utilizado para calcular os pontos e a velocidade no trecho *BC* e *CD*.

O espaçamento entre os cordões depende da sobreposição resultante dos parâmetros de soldagem utilizados e por isso é variável. Para o material de adição escolhido foi utilizado um espaçamento igual à amplitude de tecimento, para obter um pouco de sobreposição.



## 4 IMPLANTAÇÃO DAS METODOLOGIAS

Este capítulo trata da elaboração e da instalação das telas do programa no manipulador cartesiano Tartúlope V4, para a geração de trajetórias de revestimento em paredes tubulares com orientação vertical e horizontal.

### 4.1 INTERFACE DO USUÁRIO

A interface do usuário, Figura 36, é o terminal de programação utilizado pelo operador para carregar, salvar ou ainda programar uma nova trajetória de soldagem no Tartúlope V4. Este terminal possui uma tela sensível ao toque, onde a seleção das telas de configuração e a parametrização da trajetória de soldagem são realizadas pelo acionamento de botões.

Figura 36 – Terminal de programação do Tartúlope V4.



Os botões, menus e toda a parte gráfica da interface do usuário foram elaborados no ambiente de programação gráfico *Flash*, enquanto que os algoritmos de geração de trajetória foram escritos em *Visual Basic*, linguagem de programação que possui a função de gerar os

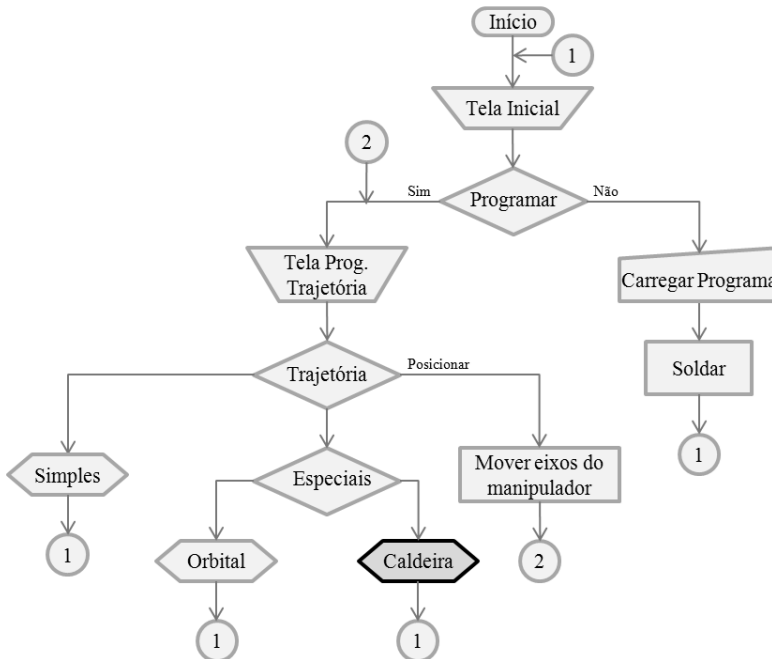
comandos em código G. Todas essas linguagens de programação foram utilizadas por serem padrões já utilizados na customização do controlador MACH 3.

Cada linha deste código G contém as informações de posição, orientação e velocidade da tocha em cada ponto da trajetória de soldagem. Por sua vez, o controlador CNC baseado em PC Mach3, descrito no Anexo A, executa de forma sequencial estas linhas de código G, gerando os sinais de comando para os motores elétricos de cada eixo do Tartílope V4.

#### 4.2 O PROGRAMA DO TARTÍLOPE V4

O software do manipulador foi desenvolvido de forma estruturada, Figura 37, visando uma programação rápida e intuitiva, além de permitir a fácil implementação de novas funcionalidades. Neste trabalho, a funcionalidade inserida na programação do Tartílope V4, foi a rotina chamada de caldeira.

Figura 37 – Diagrama de blocos do programa do Tartílope V4.

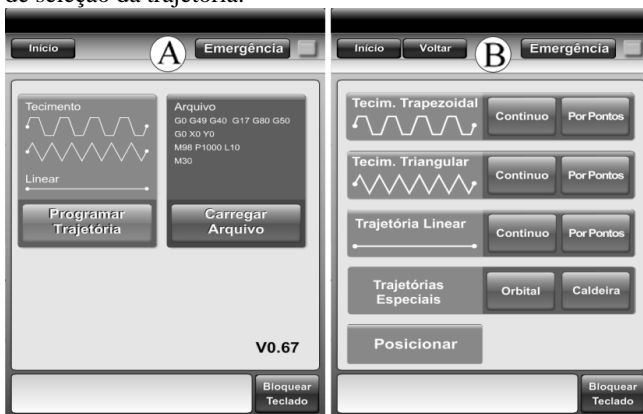




A tela inicial, Figura 38A, permite a escolha entre programar uma nova trajetória ou carregar uma trajetória salva. O botão de emergência indica se existe algum erro externo ao programa e, quando acionado, impede que o programa seja executado enquanto o problema não for solucionado. O botão “Bloquear Teclado” serve para bloquear e liberar o acesso aos outros botões da tela, com exceção do botão “emergência”.

Na tela de programar trajetória, Figura 38B, o operador escolhe entre trajetória linear, com tecimento triangular ou trapezoidal, consideradas como trajetórias simples. É possível criar trajetória com um tamanho pré-definido, de 2000 mm, pressionando o botão “Contínuo” ou marcar pontos para definir a distância com o botão “Por Pontos”. A parte de trajetórias especiais é subdividida em Orbital, destinado à união de dutos, e Caldeira, onde se encontram as telas referentes aos algoritmos implementados. Além da programação de trajetórias é possível posicionar o equipamento através do botão “Posicionar”.

Figura 38 – Em (A) tela inicial de programação do manipulador e em (B) tela de seleção da trajetória.



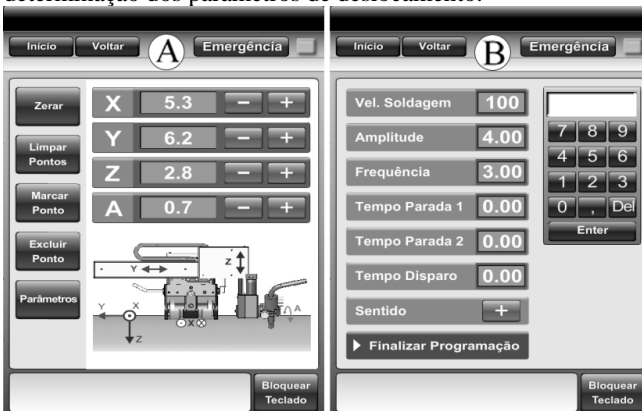
A marcação de pontos é idêntica para qualquer tipo de trajetória. Nesta tela, Figura 39A, estão dispostos diversos botões para auxiliar o posicionamento e a marcação dos pontos. Primeiramente é posicionado o manipulador até o ponto inicial e são zeradas as coordenadas de posição com o botão “Zerar”. Depois de posicionado no ponto inicial, é marcado o primeiro ponto com o botão “Marcar Ponto”. Em seguida, é posicionado o manipulador até o próximo ponto a ser

marcado e assim sucessivamente. Caso o ponto marcado não esteja de acordo com o desejado é possível excluir o ponto através do botão “Excluir Ponto”. Assim que todos os pontos foram devidamente marcados é selecionado o botão “Parâmetros”, no qual leva para a próxima tela para determinação dos parâmetros da trajetória. É importante citar que o tecimento realizado na marcação de ponto é sempre apenas com o eixo Y. Assim, a marcação de pontos não permitiria realizar as trajetórias propostas neste trabalho.

A definição dos parâmetros do deslocamento, Figura 39B, é realizada através da seleção da variável desejada e com o auxílio do teclado virtual é definido o valor. As variáveis disponíveis para configuração dependem do tipo de tecimento utilizado. Para uma trajetória linear, por exemplo, são configurados a velocidade e o sentido de soldagem.

As trajetórias com tecimento triangular e trapezoidal possuem como parâmetros a velocidade de soldagem, a amplitude e a frequência de tecimento, bem como o tempo de disparo da fonte. O referido tempo de disparo é uma variável medida em segundos, e determina o intervalo de tempo entre o disparo da fonte de soldagem e o início do deslocamento do manipulador. Esta variável visa garantir a estabilidade do arco elétrico antes que a trajetória seja iniciada. Os valores deste tempo dependem diretamente do processo e da fonte de soldagem que estão sendo utilizados. Ao ajustar todos os parâmetros, o operador clica no botão “Finalizar Programação” e o sistema segue para a última tela da IHM do manipulador.

Figura 39 – Em (A) tela para a marcação de pontos e em (B) tela para determinação dos parâmetros de deslocamento.



A tela para o acompanhamento da soldagem, Figura 40, apresenta os parâmetros de soldagem configurados, o programa em Código G gerado e botões para iniciar, pausar e parar a execução da trajetória. Além disso, existem botões que possibilitam o usuário abrir, editar ou salvar o código gerado.

Figura 40 – Tela de operação da trajetória.

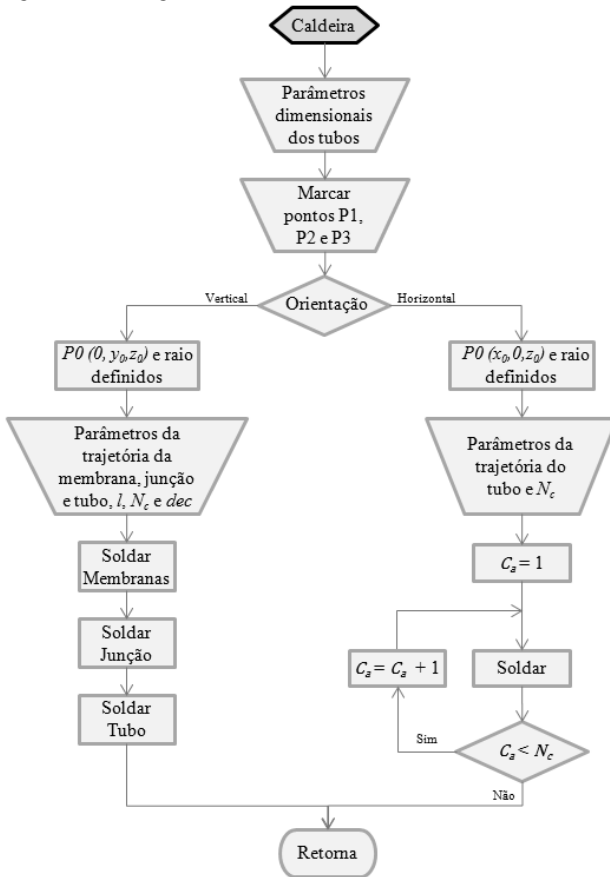


#### 4.3 A ROTINA CALDEIRA

A rotina Caldeira foi desenvolvida também de forma estruturada, Figura 41. Inicialmente o operador informa os parâmetros dimensionais dos tubos da parede. Em seguida são marcados os três pontos para definir o centro do tubo e o raio aproximado. O terceiro passo é informar qual a orientação dos tubos, que pode ser horizontal, caracterizando uma trajetória transversal aos tubos, ou vertical, com trajetória longitudinal aos tubos. Por fim, são informados os parâmetros da trajetória para realizar o deslocamento da tocha em torno do tubo.

Os parâmetros em comum entre as duas orientações são: a distância  $l$  a ser revestida, o número de cordões do tubo  $N_c$  e a distância entre os cordões  $dec$ . Para a orientação dos tubos na horizontal, a mesma etapa é repetida enquanto o número do cordão atual  $C_a$  for menor que o número total de cordões  $N_c$ .

Figura 41 – Diagrama de blocos da rotina Caldeira.



Ao pressionar o botão “Caldeira”, do campo das trajetórias especiais, é mostrada a tela referente à programação das trajetórias das paredes de caldeira, Figura 42. Os dois tipos de tecimento disponíveis são o triangular e o trapezoidal.

Nesta tela é possível escolher a orientação com a qual os tubos a serem revestidos estão dispostos. Uma figura aparece no canto inferior direito da tela para mostrar ao operador qual o sentido de soldagem dos tubos. Para a soldagem dos tubos na vertical, o sentido da trajetória é longitudinal aos tubos, Figura 42A, e o operador informa a distância total  $l$  a ser revestido no tubo. Já para os tubos na horizontal, o sentido da trajetória é transversal aos tubos, Figura 42B, e o operador informa o

número de cordões adjacentes a serem revestidos. O número de tubos, para os tubos com orientação horizontal, foi fixado em três, em virtude do alcance máximo do eixo Y do Tartflope V4.

Figura 42 – Em (A) detalhe do sentido longitudinal selecionado e em (B) detalhe do sentido transversal selecionado.



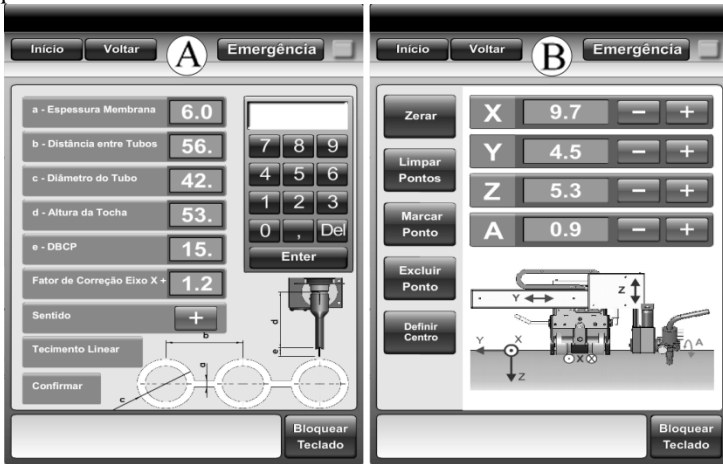
Existe a possibilidade de escolher qual será o cordão inicial para soldar. No caso da membrana e da junção existem dois cordões, o primeiro referente lado direito e o segundo referente ao lado esquerdo do tubo.

O botão “Configurações” abre a tela de configurações, Figura 43A, onde o operador informa as características da parede, o sentido de soldagem e o tipo de tecimento, que pode ser planar ou cilíndrico. No caso do tecimento do tipo planar estar selecionado; a oscilação da tocha é realizada no plano tangente ao ponto central do cordão, sendo possível inclinar esse plano nos programas da junção e da membrana. Já no tecimento do tipo cilíndrico, não planar, a tocha fica sempre normal ao centro do tubo durante a oscilação, rotacionando o eixo angular A durante a trajetória.

O botão “Definir Centro”, localizado acima da imagem dos tubos na Figura 42, é utilizado para definir o centro do tubo. Ao pressionar o botão, é mostrada a tela referente à marcação dos três pontos, Figura 43B. Nesta tela, o operador pode movimentar os eixos do manipulador, marcar, limpar e excluir os pontos. Após marcar os três

pontos distintos na superfície do tubo, o operador pressiona no botão “Definir Centro” para voltar para a tela anterior.

Figura 43 – Em (A) tela de configurações e em (B) tela de marcação dos pontos para definir o centro do tubo.



Após configurar os parâmetros globais, no qual grande parte o operador não precisará mais alterar, é realizada a programação das trajetórias da membrana, junção membrana-tubo e do tubo.

A programação da membrana, Figura 44A, apresenta os mesmos parâmetros dos programas normais com tecimento, pois a trajetória também é realizada no plano XY do manipulador. Assim, as variáveis envolvidas nessa trajetória são a velocidade de soldagem, amplitude, frequência e tempos de parada.

Para a trajetória da junção membrana-tubo, Figura 44B, é necessário informar também o ângulo de inclinação de ataque da tocha e o ângulo do plano de tecimento. Para a configuração de parede utilizada, foram definidos os ângulos de 60 graus para a tocha e 30 graus para o plano de tecimento, a fim de evitar possíveis colisões da tocha ou do manipulador com os tubos.

Figura 44 – Em (A) tela de programação da membrana e em (B) tela de programação da junção membrana-tubo.



Por fim, a programação da trajetória no tubo, Figura 45, necessita de três parâmetros adicionais à programação da membrana: o número de cordões para revestir o tubo, a distância entre os cordões e o ângulo de inclinação do plano de tecimento. Os parâmetros de deslocamento resultantes são exibidos na tela de acompanhamento da soldagem, Figura 40, onde é possível ver a amplitude de tecimento gerada.

Figura 45 – Tela de programação do tubo.







## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são descritos os principais equipamentos utilizados e as características de cada ensaio para avaliar experimentalmente as metodologias de revestimento em paredes tubulares verticais e horizontais.

### 5.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA

Os ensaios de trajetória e de revestimento foram realizados na bancada de soldagem implementada no projeto de pesquisa vinculado à empresa de geração de energia elétrica Tractebel [13]. Os principais equipamentos desta bancada, Figura 46, são: (1) a mini-fonte chaveada de soldagem microprocessada IMC de 300 A com alimentador automático de arame e interface de programação, em (2) o manipulador cartesiano de quatro graus de liberdade, Tartilope V-4, com uma tocha de soldagem MIG/MAG fixada em sua extremidade, em (3) o gabinete eletrônico de acionamento e controle de movimento da tocha, em (4) a interface gráfica de programação do manipulador e em (5) o suporte de fixação dos corpos de prova. Cabe ressaltar que a base deste suporte é do tipo basculante, permitindo, assim, a soldagem nas posições plana, horizontal, vertical e, também, sobrecabeça.

Figura 46 – Bancada de soldagem para ensaios de revestimentos.



Seções de paredes tubulares de aço 16Mo3, com dimensões idênticas à primeira configuração da Tabela 1, foram utilizadas como corpos de prova nos ensaios de revestimento tanto na posição vertical quanto na horizontal [43]. Este material, de composição química apresentada na Tabela 2, é resistente para operação à alta temperatura. Entretanto, é necessário, inicialmente, remover sua camada de óxido através do esmerilhamento da superfície a ser revestida, para evitar possíveis defeitos de soldagem e garantir a fusão do material de base com o material de adição.

Tabela 2 - Composição química do aço 16Mo3.

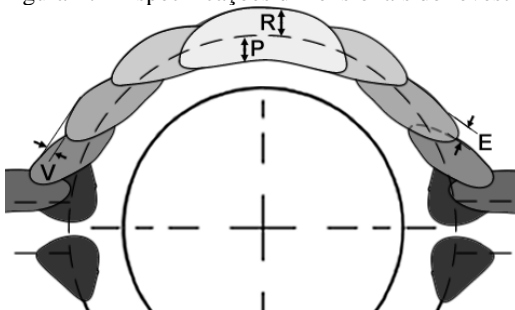
C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
0.12-0.20	0,35	0,40-0,90	0,025	0,010	0,30	0,30	0,30	0,25-0,35

Fonte: Masteel (2011).

## 5.2 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM

Pela inspeção visual de um revestimento é possível verificar se há ocorrência de mordeduras ou respingos de solda, como também estimar a sobreposição e o vale entre os cordões. Pela análise metalográfica da secção transversal dos cordões de solda deste revestimento é possível quantificar algumas características como a penetração, a diluição, o reforço e o vale entre os cordões, Figura 47.

Figura 47 - Especificações dimensionais do revestimento.



Os critérios de avaliação do revestimento utilizados foram baseados na diretriz do EPRI, que definem os limites aceitáveis, Tabela 3, e os defeitos que reprovam a soldagem [41]. Segundo esta diretriz, tubos com espessura menor que 2,5 mm não devem ser revestidos, apenas substituídos.

Tabela 3 – Critérios de avaliação da secção transversal dos cordões de solda.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Faixa tolerável</b>
P (mm)	Penetração	$0,35 < P < 0,56$
R (mm)	Reforço	$R < 3,18 (1/8")$
D (%)	Diluição	$10,0 < D < 15,0$
V (mm)	Vale entre cordões	$V < 0,79 (1/32")$
M (mm)	Mordedura	$M < 0,79 (1/32")$
E (mm)	Espessura da sobreposição	$1,78 < E < 2,29$

Fonte: Brumbaugh (2005).

As trincas, os poros e a falta de fusão e de penetração também 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 [41].

### 5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS

O primeiro passo é informar as dimensões da parede na tela de configurações e algumas variáveis globais, como a distância  $l$  a ser percorrida, DBCP e sentido de deslocamento do manipulador.

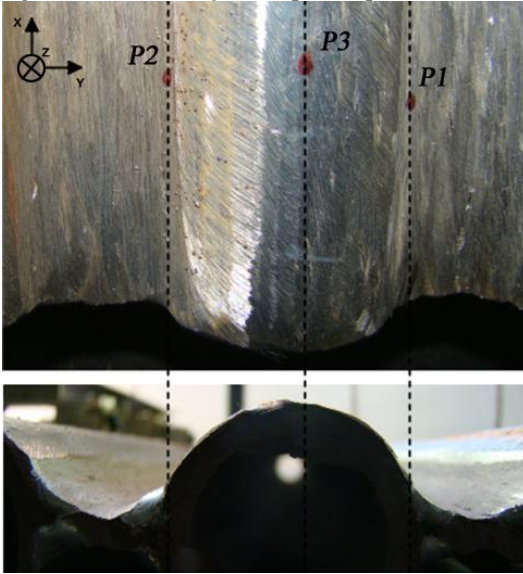
Em seguida, é realizada a medição dos três pontos  $P1$ ,  $P2$  e  $P3$ . O sistema de coordenadas é inicialmente zerado no ponto  $P1$  e na sequência, o operador posiciona a tocha, via a interface do usuário do manipulador, para a medição dos demais pontos  $P2$  e  $P3$ , Tabela 4.

Tabela 4 – Coordenadas dos três pontos medidos.

<b>Ponto</b>	<b>Coordenada x (mm)</b>	<b>Coordenada y (mm)</b>	<b>Coordenada z (mm)</b>
$P1$	0	0	0
$P2$	0	-33,0	0,5
$P3$	0	-14,7	9,4

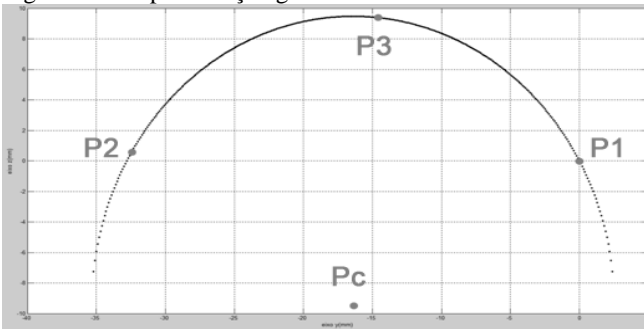
Os pontos  $P1$  e  $P2$  são obtidos na extremidade do cordão de união entre a membrana e o tubo. O ponto  $P3$  é medido na superfície do tubo, conforme mostra a Figura 48. A estimativa inicial das coordenadas  $y_0$  e  $z_0$  do ponto central e o raio  $r$  do tubo foram definidos de acordo com a equação 3.2, ou seja:  $y_0 = 16,5$  mm,  $z_0 = 35,5$  mm e  $r = 19,0$  mm.

Figura 48 – Localização dos pontos para definir e referenciar o centro do tubo.



Com os três pontos definidos e uma estimativa inicial dos parâmetros, foram calculados, via as equações do método dos mínimos quadrados para sistemas não lineares com sucessivas iterações, os valores das coordenadas do ponto central e o raio do tubo, Figura 49. São eles:  $y_0 = -16,65$  mm,  $z_0 = -9,85$  mm e  $r = 18,92$  mm.

Figura 49 - Representação gráfica da circunferência do tubo calculada.



A seguir, o novo centro é definido e a tocha é posicionada no ponto P4,

Figura 28, e o equipamento aguarda o operador escolher a orientação dos tubos.

O programa precisa ser referenciado apenas na primeira vez, quando o equipamento é ligado. A referência do centro dos demais tubos é apenas somada à distância entre tubos  $c$ .

### 5.3.1 Parede Tubular na Vertical

A posição de soldagem usada para esta orientação dos tubos foi a vertical descendente. O material de adição utilizado foi o arame de aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro. O processo de soldagem foi o MIG/MAG pulsado misto, com uma DBCP nominal de 15 mm. O gás empregado foi uma mistura composta de 96% argônio e 4% de dióxido de carbono, com vazão de 12 l/min.

O revestimento dos tubos na vertical seguiu a ordem de execução dos cordões de solda iniciando nas membranas, seguindo para as junções e finalizando com três cordões no tubo. Após diversos ensaios, foram levantados parâmetros de soldagem que foram usados em todos os cordões deste ensaio de revestimento: 34 V de tensão de pulso, 90 A de corrente de base, 4 ms de tempo de pulso, 8 ms de tempo de base e 6 m/min de velocidade de alimentação do arame. Todos os cordões de solda foram executados com 100 mm de comprimento com os parâmetros de movimento de cada etapa definidos pela Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de movimento na posição vertical descendente.

<b>Etapa</b>	<b>Vs (cm/min)</b>	<b>Amp (mm)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>Eixos de Tecimento</b>
Membrana	35	4,00	2	Y
Junção	37	8,00	2	Y e Z
Tubo	45	9,22	2	Y e Z

Com os pontos iniciais definidos pelo operador, o programa calcula os ângulos e os pontos das trajetórias. Assim, são calculados inicialmente os ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\varphi$ , apresentados anteriormente na Figura 29, que resultaram nos ângulos  $95,48^\circ$ ,  $118,80^\circ$  e  $11,66^\circ$  respectivamente.

A amplitude dos cordões da terceira etapa é definida com base na equação 31, sendo o número de cordões ( $N_c$ ) igual a 3, a distância entre cordões ( $dec$ ) igual a 2 mm e o arco  $AB$  calculado igual a 31,66 mm. Assim, a amplitude de tecimento resultante foi de 9,22 mm para cada um dos três cordões no tubo.

Inicialmente foram realizados ensaios de trajetória sem a deposição de material, com o objetivo de verificar a trajetória resultante. Foi definida uma DBCP nominal de 15 mm para todos os ensaios.

Foram realizados dois cordões na membrana, dois na junção e três no topo, sendo este último dividido em dois cordões na lateral e um no topo. O tempo de parada utilizado em todos os cordões foi de 0,1 s em ambos os lados do movimento de tecimento. O cordão de solda da membrana, Figura 50, e o da junção membrana tubo, Figura 51, apresentaram boa geometria superficial e são isentos de descontinuidades.

Figura 50 – Cordão de revestimento da membrana.

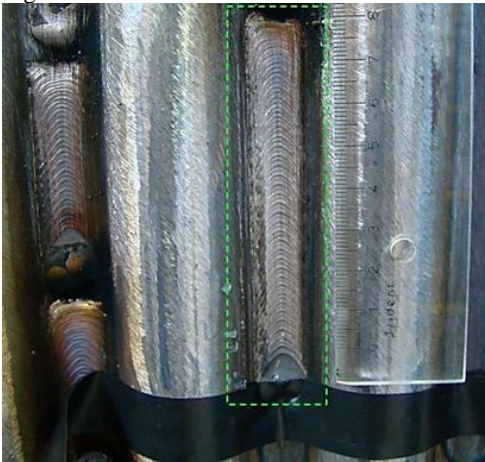
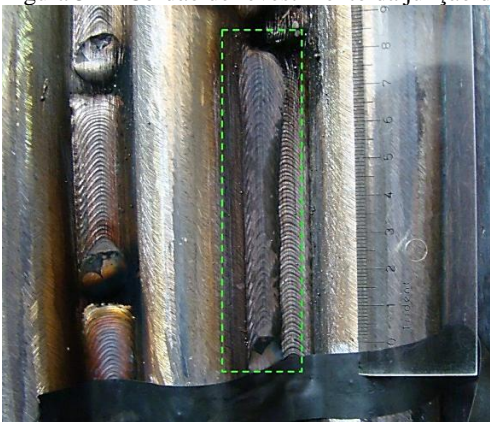
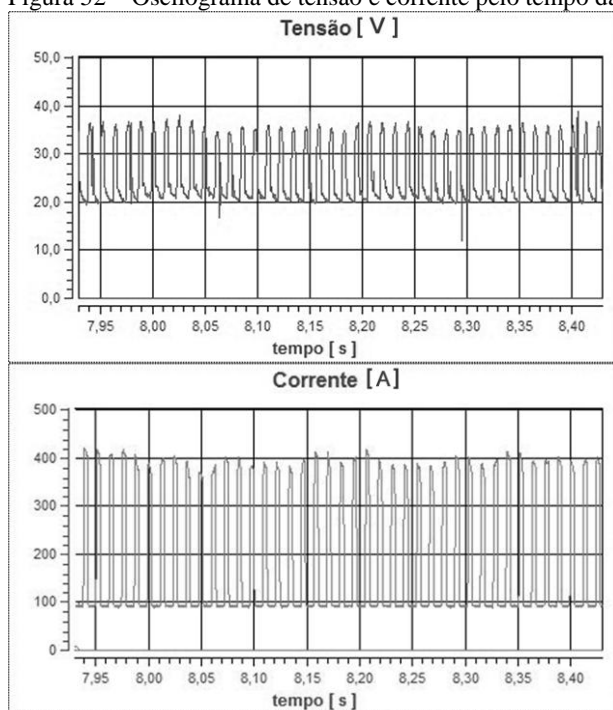


Figura 51 – Cordão de revestimento da junção do tubo.



Foi realizada a aquisição das formas de onda da tensão e da corrente do arco elétrico com o objetivo de verificar a estabilidade do processo de soldagem durante a execução do cordão de solda da junção membrana tubo, Figura 52. Observa-se neste oscilograma que não há ocorrência de curtos-circuitos e nem variação significativa de amplitudes entre os ciclos do processo MIG/MAG pulsado misto, caracterizando desta forma, um funcionamento estável com pouca alteração do comprimento do arco elétrico.

Figura 52 – Oscilograma de tensão e corrente pelo tempo da junção.



O primeiro, Figura 53, o segundo e o terceiro cordões de solda depositados sobre o tubo, Figura 54, são mais largos que os anteriores devido a maior amplitude utilizada, isentos de defeitos de soldagem e possuem bom aspecto visual.

Figura 53 – Primeiro cordão de revestimento do tubo.

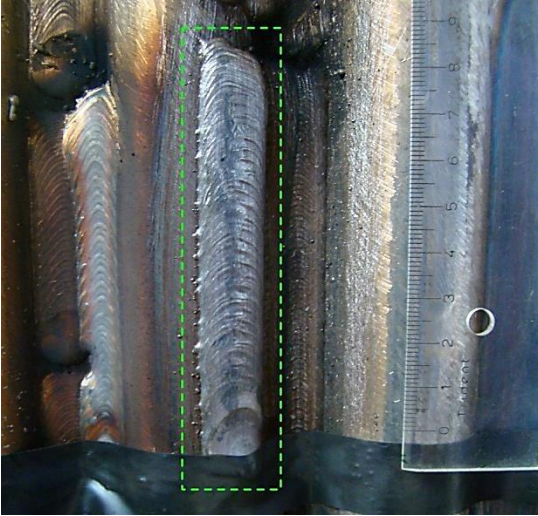
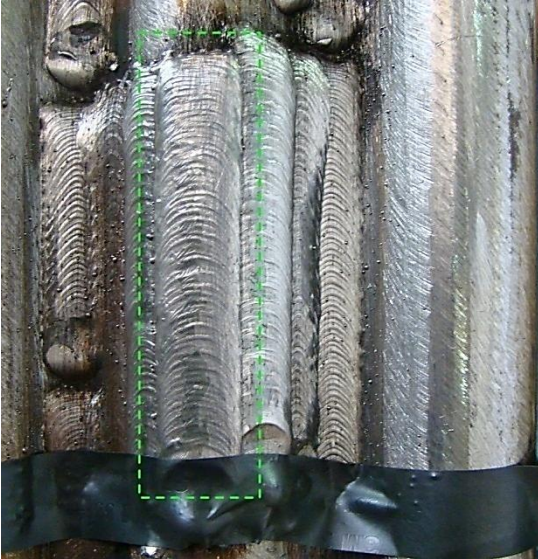


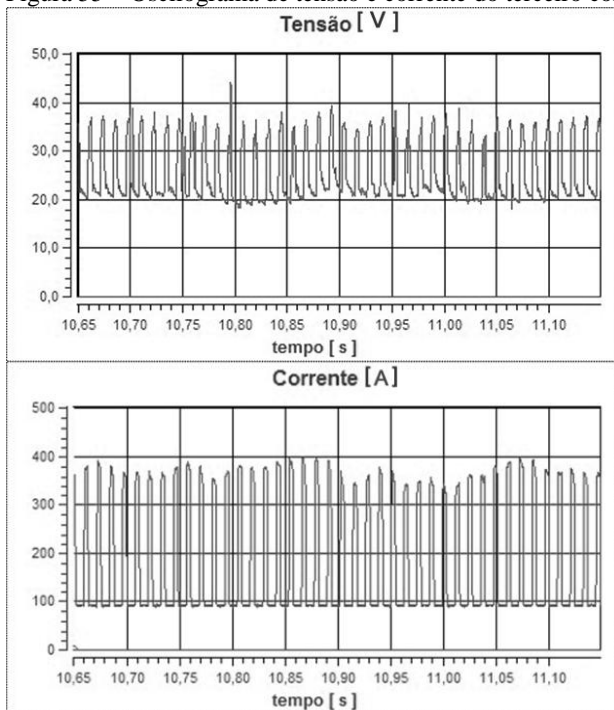
Figura 54 – Terceiro e último cordão de revestimento do tubo.



Pela análise visual dos oscilogramas de tensão e corrente no tempo, Figura 55, referente à execução do cordão de solda da Figura 54, é possível constatar a estabilidade do processo.

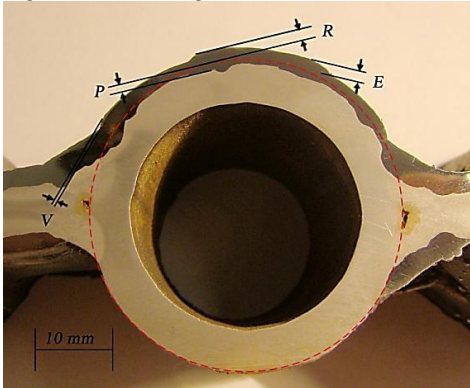


Figura 55 – Oscilograma de tensão e corrente do terceiro cordão do tubo.



A respectiva macrografia do tubo revestido, Figura 56, possui um reforço (R) máximo de aproximadamente 1,52 mm, uma penetração (P) mínima de 0,25 mm e máxima de 1,47 mm, uma diluição de aproximadamente 30%, um vale (V) máximo entre cordões de 0,44 mm e uma espessura da sobreposição (E) mínima de 0,62 mm e máxima de 1,27 mm.

Figura 56 – Macrografia do tudo revestido com os valores máximos medidos.



### 5.3.2 Tubos na Horizontal

O programa para revestimento dos tubos na horizontal foi implementado seguindo a metodologia desenvolvida. Entretanto, o eixo angular do manipulador Tartílope V4 não possui dinâmica suficiente para realizar a orientação da tocha requerida na respectiva trajetória de soldagem.

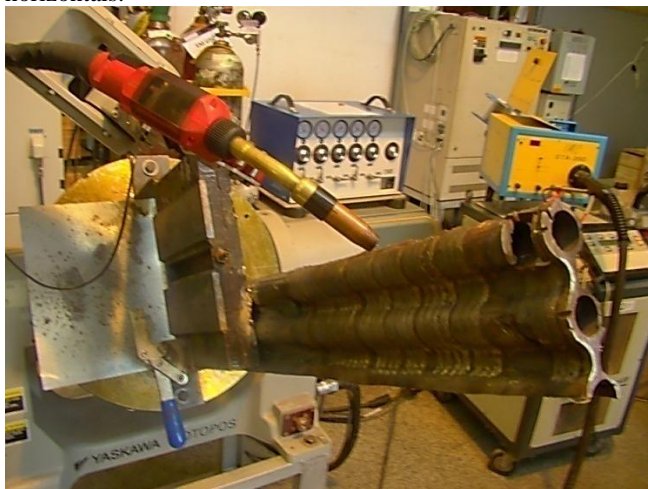
O motor do eixo angular apresenta velocidade máxima sem carga de 230,0 rpm. Com a redução existente de 50:1, a velocidade máxima no flange do suporte da tocha é de 4,6 rpm ou de 1656,0 °/min.

Para uma velocidade de soldagem de 40 cm/min, por exemplo, a velocidade rotação necessária seria de 1507,8 °/min e 2149,1 °/min nos trechos AB e BC respectivamente, chegando a ultrapassar o valor máximo da velocidade deste eixo desconsiderando ainda o peso da tocha e do mangote.

Assim, para realizar este tipo de revestimento foi utilizado o robô HP20 da Motoman e o processo CMT Pulse, disponível na fonte de soldagem da FRONIUS, Figura 57.

Os tubos apresentam uma inclinação de 15 graus no sentido anti-horário. O material de adição e o gás de proteção usado neste tipo de parede tubular foram o arame de aço inoxidável ER 309L Si de 1.0 mm de diâmetro e à mistura de 95% de argônio, 3% de dióxido de carbono e 2% de nitrogênio respectivamente.

Figura 57 – Bancada robotizada para o revestimento de paredes tubulares horizontais.



Para realizar a trajetória na parede com orientação horizontal, foram medidos os pontos de acordo com a metodologia proposta, porém de forma manual pela interface de ensinamento do robô. Os parâmetros de movimento utilizados no robô e os de soldagem na fonte de soldagem estão na Tabela 6 e o revestimento obtido com esses parâmetros são apresentados na Figura 58. O espaçamento usado entre os centros dos cordões de solda foi de 11 mm, garantindo uma boa sobreposição.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados para o revestimento da secção de parede tubular horizontal.

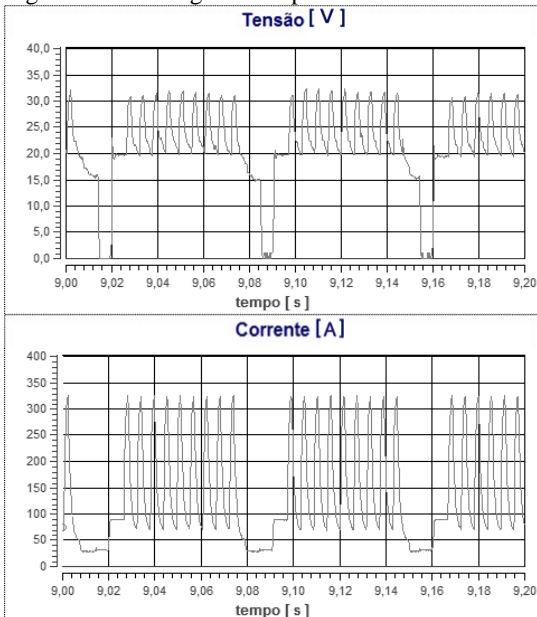
<b>Fonte</b>		<b>Robô</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Corrente média (A)	138,0	Vs membrana (cm/min)	50,0
Tensão média (V)	19,5	Vs tubo (cm/min)	60,0
Velocidade de alimentação (m/min)	6,7	Amplitude (mm)	10,0
DBCP (mm)	12,0	Frequência (Hz)	3,5
Inclinação parede (°)	15,0	Tempo de parada 1 (s)	0,1
Inclinação tocha (°)	10,0	Tempo de parada 1 (s)	0,1

Figura 58 – Revestimento da parede na posição horizontal.



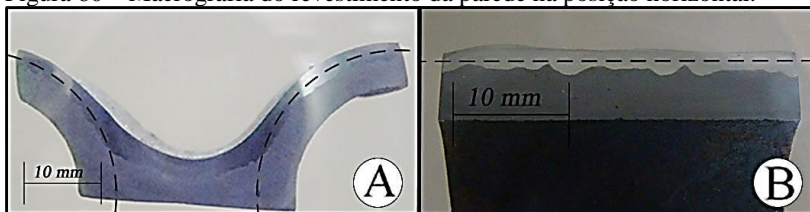
O oscilograma resultante do processo utilizado é mostrado na Figura 59.

Figura 59 - Oscilograma do processo CMT Pulse.



As macrografias de uma secção do tubo cortado no sentido longitudinal (Figura 60A) e no sentido transversal (Figura 60B) apresentaram um reforço máximo de 2,4 mm, penetração mínima de 0,3 mm e máxima de 1,31 mm e diluição de aproximadamente 26%. Não foram encontrados vales significativos e a espessura de sobreposição mínima medida foi de 0,55 mm e máxima de 1,11 mm.

Figura 60 – Macrografia do revestimento da parede na posição horizontal.



#### 5.4 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS

Uma das metas deste trabalho de dissertação foi o de reduzir o número de cordões de solda necessários para revestir paredes tubulares verticais e horizontais. As trajetórias desenvolvidas utilizam o tecimento transversal ao sentido de soldagem para produzir cordões de solda mais largos e de menor altura, características essas desejáveis para as tarefas de revestimento de superfícies. Entretanto, existem diversos fatores que limitam o aumento da largura destes cordões de solda.

O primeiro fator é a frequência de tecimento estar adequada com a velocidade de soldagem. O uso de velocidades de soldagem muito elevadas para frequências de tecimento baixas resultam em falta de fusão e mordeduras nas laterais do cordão de solda, Figura 61. Este tipo de defeito de soldagem ocorre em ambas às orientações de paredes.

Figura 61 – Defeitos de soldagem devido à inadequada relação entre velocidade de soldagem e frequência de tecimento.



Excesso de respingos e variação na penetração ocorrem quando se deseja executar cordões de solda com largura superior a 10 mm na orientação vertical. Estes problemas são gerados pela instabilidade do arco elétrico, Figura 62, devido a não perpendicularidade, na maior parte da trajetória de soldagem, entre a tocha e a superfície do tubo, Figura 63.

Figura 62 – Oscilograma de tensão e corrente pelo tempo da lateral do tubo com tecimento apenas no eixo y.

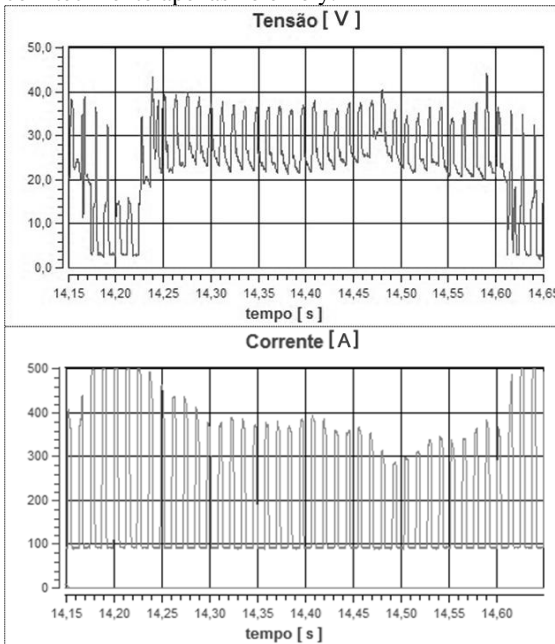


Figura 63 – Comportamento do arco elétrico na superfície do tubo.



Assim, a solução para possibilitar cordões com amplitudes maiores seria orientar a tocha perpendicularmente à superfície do tubo (tecimento cilíndrico), acompanhando o perfil cilíndrico e estabelecer uma relação correta entre a velocidade de soldagem e a frequência de tecimento.

## 6 CONCLUSÕES

O trabalho, aqui apresentado, é o resultado dos conhecimentos aplicados de várias áreas do conhecimento em engenharia. Com base nos resultados e discussões sobre as metodologias propostas é possível concluir:

- O tecimento com perfil triangular é mais aconselhável para revestimento, devido à distribuição mais uniforme do material de adição na área a ser revestida, em comparação ao perfil trapezoidal.
- O processo de soldagem MIG/MAG Pulsado no modo misto apresentou ótimos resultados e se mostrou menos sensível à variação da DBCP entre o centro e as laterais dos cordões de revestimento do tubo na posição vertical.
- O processo de soldagem CMT Pulse também apresentou ótimos resultados. Entretanto, o mesmo não pode ser aplicado no manipulador, devido ao maior peso da tocha.
- Os resultados dos revestimentos nos corpos de provas estão muito próximos dos critérios de aceitabilidade estabelecidos e certamente muito superiores ao revestimento obtido de forma manual. Entretanto é necessário diminuir a penetração e o reforço para ambas as orientações dos tubos para que o procedimento seja completamente aprovado de acordo com a diretriz de referência.
- O tempo de arco aberto calculado para revestir um metro quadrado de parede para as orientações vertical e horizontal foi de 5 horas e 20 minutos e de 6 horas e 42 minutos respectivamente.
- As implementações das metodologias propostas mostraram a flexibilidade e as limitações de velocidade dos eixos do manipulador em executar novas tarefas específicas de soldagem.
- O sistema de marcação dos pontos para definir o centro e o raio do tubo é de fácil operação.
- A automação do posicionamento e orientação da tocha no início de cada cordão de solda proporcionou um aumento na produção do revestimento.

- Apesar das limitações de dinâmica do manipulador foi possível implementar os algoritmos de revestimento realizando revestimentos com um número reduzidos de cordões de solda.
- O tecimento planar possui limitações na amplitude devido à geometria cilíndrica do tubo, sendo o ideal um tecimento utilizando o eixo angular para orientar a tocha sempre de forma perpendicular à superfície do tubo.
- A trajetória de soldagem com tecimento, utilizada no revestimento dos tubos com orientação horizontal, se mostrou muito promissora, apresentando na respectiva macrografia uma boa continuidade na linha de fusão entre o material de adição e o material da secção da parede.



## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A implementação das metodologias apresentadas neste trabalho possibilitou a automatização do processo de orientação e posicionamento da tocha de soldagem no revestimento de paredes de caldeiras. Assim, no decorrer do trabalho, juntamente com os conhecimentos adquiridos, foram identificadas vertentes para futuras pesquisas, a saber:

- Automatizar a marcação dos pontos iniciais que definem o centro do tubo utilizando a própria tocha de soldagem. Para isso, poderia ser aplicada uma tensão baixa no arame, para não abrir o arco voltaico, e quando esse arame tocar no tubo, a tensão irá tender a zero devido ao curto-circuito, detectando assim a peça;
- Incrementar a potência dos motores ou adaptar uma redução menor para que seja possível uma maior dinâmica de movimentação da tocha. Assim seria possível aplicar um tecimento completamente cilíndrico ao redor do tubo, possibilitando o revestimento da parte do tubo em apenas um único passe;
- Desenvolver um sistema de correção automática da trajetória em dois eixos ou mais, via a leitura das variáveis do arco ou com a utilização de outros sensores. Assim, qualquer variação da tocha poderia ser corrigida automaticamente durante a trajetória espacial ao redor do tubo;
- Com a utilização de um sistema de correção da altura do arco é possível investir no processo MIG/MAG Convencional com transferência goticular projetada, a fim de aumentar a taxa de deposição e as velocidades de soldagem;
- Expandir a quantidade de eixos do manipulador para cinco eixos, a fim de evitar a necessidade de inverter o eixo angular para gerar as trajetórias nas paredes com orientação vertical e horizontal.



## REFERÊNCIAS

- [1] EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2011**. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20111213\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20111213_1.pdf) Acesso em: 10 de julho de 2011.
- [2] TILLEY, R. **Inherently Reliable Boiler Component Design – Waterwall Fireside Corrosion**. Electric Power Research Institute – EPRI. Final Report 1004324, p. 4-28, Mar. 2003.
- [3] CARVALHO, R. S. **Robô CNC para a Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [4] DOOLEY, B. **Manual of Investigation and Correction of Boiler Tube Failures**. Electric Power Research Institute – EPRI. CS 3945, p. 4-14.
- [5] COLEMAN, K. **Application and Repair of Overlay Welds**. Electric Power Research Institute – EPRI. Report 1009755, April 2005.
- [6] HESTON, T. **Cladding Operation Doubles Life of Boiler Tubing**. Welding Journal Julho de 2000 45 a 47.
- [7] BROERING, C. E. **Desenvolvimento de Sistemas para a Automação da Soldagem e do Corte Térmico**. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [8] MAGNATECH. **Autoclad System: for Overlay Cladding of Large Surface Areas**. [flyer]. Elburg, Holanda. Magnatech Europe.2011.
- [9] FANUC. **ARC Mate 100iC**. Disponível em: <http://www.robotize.com.au/robot-finder/robots/9c946b/Fanuc-ARC-Mate-100iC/> Acesso em: 20 de julho de 2011.
- [10] EPSON. **EZ Modules RU-HMSz**. Disponível em: [http://www.robots.epson.com/downloads/brochurefiles/EPSON\\_EZ\\_Modules.pdf](http://www.robots.epson.com/downloads/brochurefiles/EPSON_EZ_Modules.pdf) Acesso em: 25 de julho de 2011.

- [11] GULLCO. **Gullco Overlay / Cladding System**. Disponível em: <http://www.gullco.com/Cladding-Systems.html>. Acesso em: 21 de agosto de 2011.
- [12] BUG-O SYSTEMS. **All position overlay system**. Disponível em: <http://www.bugo.com/pdf/overlay%20system.pdf>. Acesso em: 4 de agosto de 2011.
- [13] FELIPPE, L., DUTRA, J. C. **Sistema Robótico de Quatro Graus de Liberdade para o Revestimento e Fabricação por Soldagem de Tubos de Caldeiras e Tecnologias de Soldagem Associadas – Cabeça-de-Série**. P&D ANEEL 0403-0004/2008.
- [14] FELIPPE, L., DUTRA, J. C. **Desenvolvimento de uma Tecnologia Nacional Automatizada para o Revestimento e Fabricação por Soldagem de Tubos de Caldeira e Tecnologias de Soldagem Associadas**. P&D ANEEL 0403-006/2005. 2008.
- [15] ESAB. **Eletrodos Revestidos OK**. Disponível em: [http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901097rev0\\_ApostilaEletrodosRevestidos.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901097rev0_ApostilaEletrodosRevestidos.pdf). Acesso em: 3 de abril de 2011.
- [16] WAINER, E., BRANDI, S. D. & MELLO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. Editora Edgard Blücher Ltda, 1992.
- [17] DELGADO, L.C. **Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame**. 2000. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [18] MULTIALLOY. **Processo WELD OVERLAY HOT WIRE – TIG**. Disponível em: <http://www.multialloy.com.br/br/overlay.html>. Acesso em: 23 de abril de 2011.
- [19] 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.

- [20] GP Industrial Contractors Inc. **Boiler Tube Weld Overlay/Build-up**. Disponível em: <[http://www.gpic2000.com/boiler\\_tubes.htm](http://www.gpic2000.com/boiler_tubes.htm)>. Acesso em: 13 de abril de 2011.
- [21] REZAKHANI, D. **Corrosion behaviours of several thermal spray coating s used on boiler tubes at elevated temperatures**. 2007. Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran.
- [22] POLAK, R. et al. **Thermal Spraying between erosion and corrosion challenges**. 2008. Terolab Surface Ltd. (TSL), Vienna.
- [23] CARVALHO, R. S. et al. **Sistema Robótico de Quatro Graus de Liberdade para o Revestimento e Fabricação por Soldagem de Tubos de Caldeiras e Tecnologias de Soldagem Associadas**. 2010. Relatório Interno, 40f p. 18. Florianópolis
- [24] SILVA, R. H. G. **Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P)**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [25] REIS, R.; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma**. Artliber Editora, 1ª ed., 2007. ISBN 978-85-88098- 39-8. 147p.
- [26] 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.
- [27] MODENESI, P. J.; MARQUES P. V. **Introdução aos Processo de Soldagem**. 2005. Disponível em < <http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/textos/processo.pdf> >. Acessado em 16 de setembro de 2011.
- [28] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. 1. ed. São Paulo Artliber Editora Ltda, 2008, 284p
- [29] Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.C. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 2005, 362 p.

[30] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicado ao passe de raiz**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[31] 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.

[32] ABDALA, F. E. S. **Aplicação das Variantes MAG Pulsado e MAG Pulsado Térmico com Arame Maciço em Soldas de Revestimento do Tipo “Lining”**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[33] GOHR JR, R. **Manual de Instruções DIGIPlus A7**. 2011. 75 f. Disponível em: <[http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/manual\\_Digiplus\\_2aEd.pdf](http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/manual_Digiplus_2aEd.pdf)>. Acesso em: 3 de agosto de 2011.

[34] FRONIUS. **CMT: Cold Metal Transfer**. Disponível em: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-3F577B6D-16236EAF/fronius\\_brasil/CMT\\_cold\\_metal\\_transfer\\_pt.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-3F577B6D-16236EAF/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf)>. Acesso em: 5 de outubro de 2011.

[35] 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.

[36] COSTA, A. R. **Desenvolvimento de um Sistema de Seguimento de Junta que Utiliza o Próprio Arco como Sensor**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, 2003.

[37] SILVA, F. C., CARVALHO, R. S., DUTRA, J. C., BONACORSO, N. G. **Nova Técnica de Tecimento Aplicado na Soldagem Automatizada de Revestimento das Paredes Tubulares das Caldeiras de Termoeletricas**. XXXVI CONSOLDA, Recife, Out. 2010.

[38] 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.

[39] LABSOLDA. **Informações Sobre os Tubos das Paredes dos Evaporadores das Caldeiras**. 2009. Relatório Interno, Dept. Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[40] NASH, S. G.; SOFER, Ariela, **Linear and Nonlinear Programming**, McGraw-Hill Companies, Inc, New York, 1996.

[41] BRUMBAUGH, R., NEWELL, W. **Application and Repair of Overlay Welds**. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1009755.

[42] PUHL, E. P.; DUTRA, J. C.; BONACORSO, N. G. **Soldagem Automatizada de Revestimentos Empregando o Novo Processo MIG/MAG com Inversão de Polaridade Sincronizada com a Trajetória de Tecimento dos Cordões de Solda**. XXXVI CONSOLDA, Recife, Out. 2010.

[43] MASTEEL. **EN 10028: 2: 2006 – 16Mo3**. Disponível em: <<http://www.masteel.co.uk/16mo3.htm>>. Acesso em: 16 de agosto de 2011.

[44] MURUGAN, N.; PARMAR, R. S. **Stainless Steel Cladding Deposited by Automatic Gas Metal Arc Welding**. Welding Journal, v.76, p 391-s-403-s, Out. 1997.

[45] MACH 3. **Purchase**. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/purchase.php>>. Acesso em: 10 de março de 2011.

[46] DESKPROTO. **Price Information**. Disponível em: <<http://www.deskproto.com/order/priceinformation.htm>>. Acesso em: 10 de março de 2011.





## ANEXO A – Mach 3

O programa utilizado para a edição e controle de trajetórias é o controlador CNC Mach 3, sendo este executado no sistema operacional Windows XP. O programa é livre, se for utilizado até 500 linhas de código G, e caso haja necessidade de programas maiores, o custo da versão completa é de US\$ 175,00 [45]. É considerado de baixo custo quando comparado com os concorrentes mais complexos como o DeskProto, que custa € 995 [46].

O controlador CNC Mach3 é destinado à execução de código G criado pelo usuário ou por outro programa do tipo CAM e não possui uma programação de trajetória automática inclusa. Mas, é possível adicionar funções que gerem código G por intermédio de interfaces customizadas.

Ele proporciona o controle de um equipamento do tipo CNC de até seis eixos, como tornos, mesas de corte plasma, equipamentos customizados, entre outros. É de fácil utilização e permite a configurar diversos parâmetros e reprogramar algumas funções que em programas de CNC mais complexos são fechados.

A comunicação com os drivers dos motores e com a placa de isolamento de sinais é feita através da porta paralela. Existe um limite inicial de 5 sinais de entrada e 12 sinais de saída, porém é possível aumentar este número adicionando mais portas paralelas ao PC.

A função de cada pino da porta paralela pode ser facilmente configurada, sendo dividido em basicamente três tipos sinais, de acionamento de motor, de entrada e de saída. Os sinais de saída são utilizados para comandar os 4 motores, sendo 4 sinais de passo (*Step*) e 4 de direção (*Dir*). Outro sinal de saída é utilizado para disparar a fonte de soldagem. Os sinais de entrada são utilizados para os sensores de home, fim de curso e o sinal de parada de emergência.

A configuração das acelerações e desacelerações, rampas de velocidade, velocidades máximas e das relações de transmissão de cada eixo é realizada de forma simples e rápida.

Uma função existente no controlador é a *THC (Torch Height Control)*, que corresponde ao controle da altura da tocha. Ela resolve o problema da variação da DBCP em superfícies planas, porém como não existe uma função semelhante para atuar no sentido do tecimento, o controlador não possibilita a correção direta da trajetória durante a execução do programa.

É possível utilizar sinais externos para realizar interrupções no programa e assim realizar a correção em qualquer eixo. Entretanto, foi

visto que o programa não realiza sua operação programada simultaneamente com a interrupção, ele pára a operação normal para realizar o comando externo. Esta parada na rotina original não é interessante na soldagem, pois a tocha fica parada enquanto que o material continua sendo adicionado, podendo causar o escorrimento por excesso de material depositado ou penetração exagerada.

A interface padrão do *Mach 3*, Figura 64, é uma *IHM* genérica destinada normalmente às operações de torneamento ou fresamento e, por isso, apresenta diversos recursos que são de difícil entendimento para um operador sem conhecimento na área de usinagem.

Figura 64 – Interface padrão do Mach3.



O Mach3 permite a utilização de uma interface desenvolvida pelo usuário contendo apenas os comandos necessários para a aplicação de soldagem. Com isso, o treinamento e operação da interface se tornam mais simples e não requerem um conhecimento de CNC por parte do operador.

## **ANEXO B – Principais Funções do Código G Usadas na Soldagem**

A linguagem em código G utilizada pelo programa CNC segue o padrão ISO 1056. Nesta programação, cada linha corresponde basicamente às coordenadas e as velocidades entre os pontos de uma trajetória. Para as tarefas de usinagem, existem diversas funções específicas que não se aplicam na soldagem, que basicamente necessita dos códigos relacionados ao controle de movimento. Assim, são apresentadas as principais funções desta linguagem necessárias para a programação do TARTÍLOPE V4 [3]:

**G0** – Deslocamento linear rápido: o equipamento efetua o percurso entre dois pontos com a velocidade máxima ajustada nas configurações do controlador CNC Mach3;

**G1** – Deslocamento linear com velocidade determinada: realiza a mesma forma de deslocamento do G0, entretanto com a velocidade estipulada pelo operador;

**G2 e G3** – Deslocamento em arco: com o uso destas funções o operador determina dois pontos e um raio de curvatura entre eles, conseqüentemente o movimento descreverá um arco. A função G2 é relativa a deslocamentos em sentido horário e a G3 em anti-horário;

**G4** – Habilita tempo de espera: com esta função o usuário tem a possibilidade de introduzir um tempo de espera na execução do programa. No caso da soldagem é utilizado para garantir que o arco elétrico fique estável antes que o deslocamento seja iniciado;

**G20 e G21** – Unidade de medição: seleção da unidade de medição em que o sistema irá operar. G20 corresponde a polegadas e G21 a milímetros;

**G90 e G91** – Modo de trabalho: determinação de operação de deslocamento em modo absoluto, G90, ou incremental, G91.

Juntamente com as funções supracitadas, existem códigos auxiliares empregados para a elaboração de rotinas mais complexas e acionamento de periféricos, dentre os quais se destacam:

**M3** – Habilita eixo árvore: usado, em fresadoras, para ligar o eixo árvore no sentido horário. No caso do manipulador para soldagem, este sinal é empregado para o disparo da fonte de soldagem;

**M5** – Desabilita eixo árvore: no caso do TARTÍLOPE V4, inibi a fonte de soldagem;

M7 e M8 – Controle de dispositivos de auxiliares: sinais digitais de saída que podem ser usados para controlar periféricos de soldagem;

M30 – Final do programa: indica o término do programa;

M98 – Chamada de sub-rotina: para facilitar a execução da mesma trajetória diversas vezes, esta deve ser programada como uma sub-rotina. Deste modo, para realizá-la deve-se utilizar o M98, bem como seu nome;

M99 – Retorno de sub-rotina: indica o final da sub-rotina e retorna ao programa principal;

O – Identificador de sub-rotina: nome da sub-rotina;

L – Contador: indica o número de vezes que uma sub-rotina será realizada;

N – Número de linha: apresenta a linha do código G em execução;

F – Velocidade de deslocamento da ferramenta: determina a velocidade de deslocamento da ferramenta quando utilizada a função G1, G2 ou G3;

P – Tempo de espera: corresponde ao tempo de espera, em segundos, habilitado pela função G4.