

Luiz Eduardo dos Santos Paes

**SOLDAGEM TIG ORBITAL – TÉCNICA DE
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DO ARAME VISANDO
AUMENTO NA PRODUTIVIDADE**

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. Régis Henrique Gonçalves e Silva.

Florianópolis, SC
2016

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

Paes, Luiz Eduardo
Soldagem TIG Orbital : Técnica de Alimentação Dinâmica do
Arame Visando Aumento na Produtividade / Luiz Eduardo
Paes ; orientador, Jair Carlos Dutra ; coorientador,
Régis Henrique Gonçalves e Silva. - Florianópolis, SC, 2016.
206 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem orbital de tubos. 3.
Indústria de petróleo e gás . 4. Passe de raiz. 5. GTAW. I.
Dutra, Jair Carlos . II. Gonçalves e Silva, Régis Henrique
. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Luiz Eduardo dos Santos Paes

**SOLDAGEM TIG ORBITAL – TÉCNICA DE
ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DO ARAME VISANDO
AUMENTO NA PRODUTIVIDADE**

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

Florianópolis, 12 de Dezembro de 2016.

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

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva – Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Carlos Enrique Niño Bohérquez
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Eng. Raul Gohr Júnior
IMC – Soldagem

Prof. Dr. Eng. Milton Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Eng. Norton Zanette Kejelin
PETROBRAS

Dedico este trabalho à minha família. Em especial aos meus pais, José Luiz e Cristiane, e à minha irmã Ana Carolina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a elaboração deste trabalho, fruto de um período de grande aprendizado:

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra e ao meu coorientador, Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pelas discussões técnicas e experiência transmitida.

- Ao M. Eng. Cleber Marques, ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr., ao M. Eng. Fernando Costenaro e ao Gerente de Projetos João Facco pelo suporte nas atividades realizadas.

- Ao Tecg^o Gustavo Sousa, ao Eng. Kauê Riffel, e ao Tec. Sold. Cleber Guedes, que atuaram diretamente neste projeto.

- Aos estagiários Alex Guesser, Flávio Berka, Guilherme Bernhard, Nathan Amorin, Gustavo Truppel, Gabriel Fraga e Vitor Zoldan pela participação durante a etapa experimental.

- Ao Designer Marcelo Okuyama, pelo auxílio com as questões gráficas.

- A todos os integrantes do LABSOLDA, pessoas com quem tive a oportunidade de trabalhar e muito influenciaram em minha formação acadêmica e pessoal: Cassiano Godinho, Danilo Vieira, Francisco Sartori, Renan Kindermann, Alberto Bonamigo, Erick Olivares, Luciano Cirino, Ivan Pigozzo, Rafael Barbosa, Daniel Ferrari, Jônathas Alves, Rafael Albino, Larissa Colares, Mateus Skowronski, Thaffarel Ribas, Eduardo Bidese, Everton Werlang, Danilo Ribeiro, Rodrigo Machado, Ramon Meller, Fernando Ruviano, Tiago Calegari, Pedro Pra, Rafael Nunes, Víctor Celva, Pedro Jaeger, Júlia Dornelles, Natália Wendt, Caroliny Kammers, Isabel Mattos, Ricardo Campagnin, Felipe Kalil, Fernando dos Santos, Hemerson Silva, Eduardo Luz, Alberto Borges, Arthur Rodrigues, Mário Nascimento, Márcia Thiel, Hellinton Direne, Giovanna Faraco, Prof. Dr. Eng. Mateus Schwedersky, Prof. Dr. Eng. Carlos Niño e Prof^a M. Eng. Cleide Marqueze.

- Ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

- À fundição Precicast, por colaborar na execução dos ensaios de composição química.

- Ao Prof. Dr. Eng. Sebastião Carlos da Costa e à Prof^a. Dra. Eng. Mírian Motta Melo pelas cartas de referência e recomendação para cursar este mestrado.

- À minha família, pela constante motivação e incentivo.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”.

(Isaac Newton)

RESUMO

No âmbito dos processos de soldagem, a capacidade inerente do ser humano de perceber erros e atuar para corrigi-los torna segura a adoção de processos manuais. Por outro lado, a produtividade destes processos já não é mais compatível com as exigências do mundo atual. O desenvolvimento de equipamentos com implementações que aumentem o grau de automatização e reduzam a influência do operador têm sido um requisito para a busca contínua da melhoria da produtividade. Situação diferente ocorre no Brasil, cuja indústria se caracteriza pelos elevados custos de mão de obra, decorrentes da baixa produtividade, que dificilmente alcança o nível obtido no contexto internacional. No campo da soldagem, melhorias em termos de produtividade vêm sendo conseguidas por países com grande desenvolvimento industrial que souberam elevar o nível de produção por trabalhador utilizando dois princípios básicos: o investimento em equipamentos e o estudo de novas técnicas aliadas a procedimentos de soldagem. Em vista disto, o presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de técnicas para a realização da soldagem TIG orbital de tubos que resultem no aumento da produtividade, visando aplicações do setor de petróleo e gás. Fazem parte do trabalho não somente a definição de procedimentos de soldagem, mas também a realização de melhorias no equipamento, utilizando uma versão do processo TIG com alimentação dinâmica de arame. Neste caso, a alimentação do arame é feita automaticamente, mas de forma análoga às ações de um soldador, com a introdução de um movimento de avanço e recuo em frequência próxima de 1Hz. Para isto, foi desenvolvido um novo modelo de cabeçote alimentador capaz de sincronizar a movimentação do arame com o estágio de pulsação da corrente, um sistema de medição da velocidade de alimentação, e um dispositivo direcionador. Na etapa de caracterização do processo, ensaios comparativos entre a alimentação contínua e dinâmica de arame foram realizados, com avaliação da variação do gradiente térmico em função de diferentes frequências de oscilação. Em seguida, deu-se início aos ensaios de soldagem orbital em seções de tubos de aço ASTM-A139 Grau D, com diâmetro de 16" (406,4 mm) e espessura de 15 mm. Os procedimentos propostos enfatizaram o aumento da produtividade do passe de raiz, com a adoção de um

chanfro tipo “U”, com 3 mm de “nariz”, maior que o utilizado usualmente, de 2 mm. Como resultado, obteve-se penetração total ao longo de 180°, com velocidade média de soldagem de 27,8 cm/min, valor este que é bastante superior aos 10 cm/min do processo TIG com alimentação contínua, e similar à verificada no MIG/MAG, cujo valor médio é de 29,5 cm/min. A dimensão média da solda (altura da área fundida) foi de 4,5 mm, também maior se comparada às dos demais processos (2,9 mm do MIG/MAG e 2,8 mm do TIG convencional). A relação de equilíbrio entre velocidade de alimentação e potência não é um requisito para a estabilidade, o que permitiu adicionar pouco material com o intuito de favorecer a penetração. Os resultados obtidos demonstraram o potencial da versão desenvolvida sob o ponto de vista de produtividade. No entanto, foi constatado o fato de que algumas juntas não cumpriram todos os critérios prescritos pelas normas internacionais de forma repetitiva. Na posição sobre cabeça (8h, 7h e 6h) identificou-se a presença de algumas discontinuidades como concavidade e mordedura. Em função disto, tendo em vista o grande potencial sob o aspecto de produtividade na aplicação de soldagem orbital, entende-se ser oportuno dar sequência ao aprimoramento do processo em outros trabalhos de pesquisa, de forma a superar as limitações observadas até o presente momento.

Palavras-chave: GTAW, Soldagem Orbital, Produtividade, Passe de Raiz, Alimentação Dinâmica.

ABSTRACT

Regarding welding processes, human ability to detect errors and correct them enables manual process execution. On the other hand, productivity is no longer compatible to new world requirements. The development of welding equipments with higher automation level and less operator dependence have been crucial for continuous improvement of productivity. A different scenario is found in Brazil. Its industry has high labor costs due to low productivity, which rarely reaches international levels. In the welding field, productivity have been accomplished in countries with high industrial development. They have raised output per worker through two basic principles: equipments and new techniques combined with welding procedures. Because of this, the main objective of this work is to develop techniques for orbital TIG welding focused on productivity increase in the oil and gas sector. The work covers procedure specifications as well as equipment upgrade, using a TIG process with dynamic wire feeding. In this case, there is an automatic feeding that mimics welder operation, with a forward and backward movement near 1 Hz. We developed a new model of wire feeder, able to synchronize wire movement with current pulse. In the characterization phase, comparative tests were executed between continuous and dynamic wire feeding, with thermal gradient evaluation as a function of oscillation frequency. Then, orbital welding tests were performed in pipe sections of ASTM-A139 Grade D, with 16" diameter (406,4 mm) and 15 mm thickness. Productivity increase of root pass was emphasized through "U" geometry bevel and "nose" thickness of 3 mm, greater the usual one of 2 mm. The results show that penetration was reached over 180°, with average welding speed of 27,8 cm/min, better than 10 cm/min from TIG process with continuous feeding, and similar to MIG/MAG, which average value is 29,5 cm/min. Average weld dimension (fusion zone height) was 4,5 mm, also greater than other processes (2,9 mm from MIG/MAG and 2,8 mm from continuous feeding TIG). The balance between feed speed and power is not required for process stability, and allowed less material deposition to favor penetration. The above outcomes showed considerable potential from productivity perspective. However, we noted that some joints did not satisfy all requirements prescribed in international standards repetitively. In

overhead position (8h, 7h e 6h), there were some discontinuities such as concavity and undercut. Therefore, taking into account the great orbital welding potential to increase productivity, is convenient to start process upgrade through new research projects to overcome present limitations.

Keywords: GTAW, Orbital Welding, Productivity, Root Pass, Dynamic Feeding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção por trabalhador nos Estados Unidos, 1947 a 2014. Adaptado de [9].	42
Figura 2. Despesas básicas nos Estados Unidos (Alimentação, Transporte, Vestuário e Itens Domésticos) como percentual da renda disponível, 1947 a 2014. Adaptado de [9].	43
Figura 3. Produtividade do brasileiro em relação aos de trabalhadores de outras nacionalidades [10].	44
Figura 4. Custo geral típico da solda no processo produtivo. Adaptado de [11].	45
Figura 5. Chanfro tipo “V” utilizado por Chowdary [14] para a execução de um procedimento de soldagem TIG mecanizado. Dimensões em mm.	48
Figura 6. Chanfro tipo “U” utilizado por Pigozzo [16] para a execução de procedimentos de soldagem TIG mecanizada. Dimensões em mm.	49
Figura 7. Chanfro tipo “U” utilizado por Sartori [17] para a execução de um procedimento de soldagem MIG/MAG mecanizada. Dimensões em mm.	49
Figura 8. Dimensão da solda (altura da área fundida).	50
Figura 9. Movimento alternativo de inserção da vareta no processo TIG manual. Adaptado de [22].	52
Figura 10. Técnicas de soldagem do processo TIG que visam o aumento da produtividade [24][25][26].	53
Figura 11. Influência da razão profundidade/largura do cordão no surgimento de trincas. (a) Soldagem autógena. (b) Soldagem com adição de material. Adaptado de [30].	54
Figura 12. (a) Desenho esquemático das variáveis geométricas de alimentação [31]. (b) Modelo comercial de tocha TIG com alimentação [32].	56
Figura 13. (a) Desenho esquemático do processo com alimentação tangencial. Adaptado de [37]. (b) Modelo comercial de tocha TIG com alimentação tangencial [38].	58
Figura 14. Esquema do movimento. (a) Contínuo. (b) Dinâmico.	59
Figura 15. Representação da dinâmica de movimentação do arame.	60

Figura 16. Influência da distância entre a ponta do arame e a extremidade do eletrodo sobre o modo de transferência metálica [16].....	61
Figura 17. Posição de inserção do arame no arco voltaico em função do ângulo de alimentação. Adaptado de [44].....	62
Figura 18. Gráfico de velocidade de alimentação x potência do arco para o processo TIG convencional [1].	64
Figura 19. Representação esquemática dos fluxos de calor no processo TIG com adição de material.	65
Figura 20. Gráfico comparativo da distribuição de energia total entre o processo com alimentação constante e o processo com alimentação dinâmica.....	68
Figura 21. Macrografias transversais dos perfis de penetração e respectiva tendência de comportamento do primeiro passe em um chanfro. Processo com alimentação constante ($V_a = 2,5$ m/min) e com alimentação dinâmica ($V_a = 0,4$ m/min). Corrente de 200 A, tensão de 10 V e velocidade de soldagem de 20 cm/min.	69
Figura 22. Perfis de velocidades na poça de fusão devido às forças de: (a) Flutuação, (b) Eletromagnética, (c) Associada à tensão superficial. Adaptado de [53].....	70
Figura 23. Efeito do perfil de velocidade no fluido sobre a formação de porosidade. (a) Padrão favorável à retenção dos gases. (b) Padrão favorável à liberação dos gases [53].	71
Figura 24. Perfil de temperatura e velocidade na poça de fusão. (a) Processo TIG autógeno. (b) Processo TIG com alimentação contínua <i>cold wire</i> e velocidade de alimentação de 1,0 m/min. Corrente de 200 A e velocidade de soldagem de 15 cm/min. Adaptado de [54].....	72
Figura 25. Macrografia do perfil transversal resultante da soldagem com o processo TIG alimentado continuamente <i>cold wire</i> . Parâmetros: corrente de 200 A, velocidade de alimentação de 1,75 m/min e velocidade de soldagem de 12 cm/min [35].	73
Figura 26. Cordão resultante da soldagem TIG pulsada com alimentação contínua <i>cold wire</i> . Parâmetros: frequência de 1,7 Hz, corrente de pulso de 170 A, corrente de base de 50 A, velocidade de alimentação de 3,0 m/min e velocidade de soldagem de 15 cm/min [57].	75
Figura 27. Manipulador robótico utilizado em procedimentos de soldagem orbital.	76
Figura 28. Representação das posições de soldagem orbital.....	77

Figura 29. Diagrama de posições de soldagem em tubos. Adaptado de [58].	78
Figura 30. Desenho esquemático representando a influência da posição de soldagem sobre o perfil do cordão de solda, e sobre a força eletromagnética (E), gravitacional (g) e induzida pelo gradiente de tensão superficial (M). Adaptado de [59].	79
Figura 31. Imagens obtidas após a filmagem das quatro posições de soldagem analisadas [47].	80
Figura 32. Bancada de ensaios: (a) cabeçote alimentador de arame, (b) unidade portátil de refrigeração, (c) fonte de energia, (d) manipulador robótico e tocha TIG, (e) cilindro de gás, (f) controlador do cabeçote alimentador e IHM.	86
Figura 33. Sistema Tracionador de Arame (STA). (a) Movimento dos roletes. (b) Visor.	87
Figura 34. (a) Conjunto manipulador robótico, tocha TIG e direcionador de arame. (b) Posição de inserção de arame em relação à tocha.	88
Figura 35. Representação esquemática da seção transversal e definições geométricas.	92
Figura 36. Configuração utilizada para a medição do deslocamento.	93
Figura 37. Quadros selecionados para a medição dos movimentos de avanço e recuo.	94
Figura 38. Divisão da escala milimetrada.	94
Figura 39. Configuração utilizada para monitoração com filmagem em alta velocidade durante a soldagem.	96
Figura 40. Configuração utilizada para monitoração com filmagem termográfica durante a soldagem. (a) Bancada experimental. (b) Medição da temperatura máxima da poça.	97
Figura 41. Exemplos de dispositivos para a medição da velocidade de arame disponíveis no mercado [65][66].	99
Figura 42. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com um transdutor comercial. Seu funcionamento é descrito por Delgado [1], que estudou o processo TIG convencional com velocidade de alimentação constante. Frequência de oscilação de 1 Hz.	99
Figura 43. Módulos funcionais do sistema de medição.	100
Figura 44. Características construtivas de um encoder.	101
Figura 45. Fluxograma referente à lógica de programação utilizada.	102

Figura 46. Sistema de medição desenvolvido com seus respectivos módulos indicados. (1) Transdutor. (2) Unidade de tratamento de sinais. (3) Dispositivo registrador.	103
Figura 47. Configuração utilizada para estudar a influência da disposição do conduíte sobre a velocidade resultante (a) Linha reta. (b) 90°. (c) 180°.	104
Figura 48. Bancada de ensaios de soldagem orbital: (a) Cabeçote alimentador de arame, (b) Unidade portátil de refrigeração, (c) Fonte de energia, (d) Manipulador robótico e Tocha TIG, (e) Cilindro de gás, (f) Controlador do cabeçote alimentador e IHM, (g) Corpo de prova.	106
Figura 49. Geometria do chanfro utilizado nos ensaios preliminares e no primeiro ensaio (1A e 1B) em 180°. Dimensões em mm. Área transversal de 139 mm ²	107
Figura 50. Geometria do chanfro utilizado no segundo ensaio (2A) em 180°. Dimensões em mm. Área transversal de 95 mm ²	108
Figura 51. Geometria do chanfro utilizado no segundo ensaio (2B) em 180°. Dimensões em mm. Área transversal de 75 mm ²	109
Figura 52. Sistema de alinhamento, fixação e apoio (acopladeira) para o passe de raiz desenvolvido pelo LABSOLDA.	110
Figura 53. Acompanhamento do procedimento durante a soldagem.	115
Figura 54. Relação linear entre velocidade de alimentação e energia, segundo os parâmetros utilizados por Pigozzo [16]. ...	120
Figura 55. Representação esquemática da seção transversal do passe de raiz e definições geométricas em duas situações: uma com saliências do metal de solda (a) e outra com reentrâncias (b). (c) Desalinhamento entre os tubos (<i>High-Low</i>). Adaptado de [74].	122
Figura 56. Comando da pulsação na fonte de soldagem a partir dos tempos regulados na IHM do manipulador.	124
Figura 57. Representação do sincronismo entre a oscilação do arame e o pulso de corrente.	126
Figura 58. Alinhamento entre o eletrodo de tungstênio e o arame no interior do chanfro.	128
Figura 59. Modelo 3D do dispositivo direcionador de arame desenvolvido. Eixo de rotação RY e eixos de translação X, Y e Z.	129

Figura 60. Dispositivo direcionador de arame desenvolvido real.	130
Figura 61. (a) Configuração utilizando a transmissão de movimento por correia. (b) Variação do perímetro: correia nova e correia após sofrer deformação.....	131
Figura 62. Configuração utilizando a transmissão de movimento por engrenagem.	131
Figura 63. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Frequência de 0 Hz.	133
Figura 64. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Frequência de 1 Hz.	134
Figura 65. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Frequência de 2 Hz.	135
Figura 66. Gráficos comparativos de velocidade média resultante e suas respectivas incertezas. (a) Sistema de medição desenvolvido. (b) Imagem.	136
Figura 67. Gráfico de velocidade x tempo, plotado com os resultados do sistema desenvolvido. Frequência de 1 Hz. Disposição: linha reta, 90° e 180°.	137
Figura 68. Gráfico de velocidade x tempo, plotado com os resultados do sistema desenvolvido. Frequência de 2 Hz. Disposição: linha reta, 90° e 180°.	137
Figura 69. Filmagem em alta velocidade. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua (0 Hz), ângulo de inserção do arame de 70° e transferência em ponte.....	139
Figura 70. Filmagem em alta velocidade. Intervalo de 0,04 s entre as imagens analisadas. Ângulo de inserção do arame de 70°. Processo com alimentação dinâmica. (a) 1 Hz. (b) 2 Hz.....	140
Figura 71. Filmagem em alta velocidade. Intervalo de 0,02 s entre as imagens analisadas. Ângulo de inserção do arame de 80°. Processo com alimentação contínua.	140
Figura 72. Filmagem em alta velocidade. Intervalo de 0,04 s entre as imagens analisadas. Ângulo de inserção do arame de 80°. Processo com alimentação dinâmica. (a) 1 Hz. (b) 2 Hz.....	141
Figura 73. Filmagem termográfica: medição da temperatura máxima. (a) Processo autógeno – 951 °C. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte – 878 °C. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz – 858 °C. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz – 850° C.....	142
Figura 74. Valores médios de temperatura, resultantes da filmagem termográfica.	143

Figura 75. Superfícies dos cordões resultantes dos ensaios de soldagem. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz.	143
Figura 76. Macrografias longitudinais. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz.	144
Figura 77. Macrografias transversais. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz.	145
Figura 78. Sobreposição das macrografias transversais.	145
Figura 79. (a) Gráfico comparativo de penetração. (b) Gráfico comparativo de largura.	146
Figura 80. Macrografias transversais referentes à soldagem das posições 10h, 9h e 8h com alimentação dinâmica e progressão descendente.	148
Figura 81. Parte interna da raiz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaios 2 e 3. (c) Ensaio 4.	149
Figura 82. Oscilograma de corrente. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	150
Figura 83. Oscilograma de tensão. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	151
Figura 84. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	152
Figura 85. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 1A.	154
Figura 86. Macrografias transversais. Ensaio 1A.	155
Figura 87. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 1B.	157
Figura 88. Macrografias transversais. Ensaio 1B.	158
Figura 89. Oscilograma de corrente. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	160
Figura 90. Oscilograma de tensão. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	161
Figura 91. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	162

Figura 92. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 2A.	163
Figura 93. Macrografias transversais. Ensaio 2A.	164
Figura 94. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 2B.	166
Figura 95. Macrografias transversais. Ensaio 2B.	167
Figura 96. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio com o processo convencional respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia.	170
Figura 97. Macrografias transversais. Ensaio com o processo convencional respeitando-se a relação V_a/Pot	171
Figura 98. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio com o processo convencional com $V_a = 0,37$ m/min.	174
Figura 99. Macrografias transversais. Ensaio com o processo convencional com $V_a = 0,37$ m/min.	175
Figura 100. Formato de onda com um pico de corrente no início da fase de pulso [31].	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área da seção transversal dos chanfros utilizados em procedimentos de soldagem mecanizada TIG e MIG/MAG. Espessura de parede e = 15 mm, adotada para a comparação. ...	50
Tabela 2. Dimensão da solda resultante dos procedimentos de soldagem mecanizada TIG e MIG/MAG.	50
Tabela 3. Variáveis do processo utilizadas para a comparação da energia destinada à peça entre os sistemas com alimentação constante e alimentação dinâmica.	67
Tabela 4. Propriedades do arame utilizadas para a comparação da energia destinada à peça entre os sistemas com alimentação constante e alimentação dinâmica.	67
Tabela 5. Estimativa da distribuição de energia.	68
Tabela 6. Relação de equivalência entre posição horária e posição de soldagem, conforme a norma AWS 3.0 [58].	78
Tabela 7. Composição química do metal de base e do arame de adição (%.p).....	89
Tabela 8. Parâmetros elétricos regulados nos ensaios de caracterização.	90
Tabela 9. Parâmetros físicos referentes aos ensaios de caracterização.	90
Tabela 10. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador. .	90
Tabela 11. Deslocamento ideal calculado com base nos parâmetros especificados.	91
Tabela 12. Velocidade ideal calculada com base nos parâmetros especificados.....	91
Tabela 13. Parâmetros regulados na câmara de alta velocidade para a monitoração da oscilação do arame.	93
Tabela 14. Parâmetros regulados na câmara de alta velocidade para a monitoração da transferência metálica.	96
Tabela 15. Parâmetros regulados na câmara termográfica.	98
Tabela 16. Composição química do metal de base e do arame de adição (%.p).....	107
Tabela 17. Parâmetros elétricos regulados referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).....	111
Tabela 18. Parâmetros físicos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).	111

Tabela 19. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão descendente (10h, 9h e 8h).	112
Tabela 20. Parâmetros elétricos regulados referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).....	113
Tabela 21. Parâmetros físicos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).....	113
Tabela 22. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão ascendente (5h).....	114
Tabela 23. Parâmetros elétricos regulados referentes ao primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	115
Tabela 24. Parâmetros físicos regulados referentes ao primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	116
Tabela 25. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão descendente (primeiro ensaio 180° com alimentação dinâmica).	116
Tabela 26. Parâmetros elétricos regulados referentes ao segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	117
Tabela 27. Parâmetros físicos regulados referentes ao segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.	117
Tabela 28. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão descendente (segundo ensaio 180° com alimentação dinâmica).	118
Tabela 29. Parâmetros utilizados por Pigozzo [16] para a soldagem TIG orbital com o processo convencional.	119
Tabela 30. Parâmetros regulados para a execução do ensaio orbital 180° com o processo convencional e progressão descendente.	120
Tabela 31. Critérios de aceitação referente à soldagem do passe de raiz.	123
Tabela 32. Valores médios e a respectiva incerteza expandida para deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 0 Hz... 134	

Tabela 33. Valores médios e a respectiva incerteza expandida para deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1 Hz. .	135
Tabela 34. Valores médios e a respectiva incerteza expandida para deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 2 Hz. .	136
Tabela 35. Parâmetros elétricos medidos referentes aos ensaios de caracterização.	138
Tabela 36. Parâmetros elétricos medidos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).....	147
Tabela 37. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).....	147
Tabela 38. Parâmetros elétricos medidos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).	148
Tabela 39. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).	149
Tabela 40. Parâmetros elétricos medidos referentes ao primeiro ensaio orbital com alimentação dinâmica e progressão descendente.....	150
Tabela 41. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.....	152
Tabela 42. Medição do perfil geométrico. Ensaio 1A.	156
Tabela 43. Medição do perfil geométrico. Ensaio 1B.	159
Tabela 44. Parâmetros elétricos medidos referentes ao segundo ensaio orbital com alimentação dinâmica e progressão descendente.....	160
Tabela 45. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.....	161
Tabela 46. Medição do perfil geométrico. Ensaio 2A.	165
Tabela 47. Medição do perfil geométrico. Ensaio 2B.	168
Tabela 48. Parâmetros elétricos medidos referentes ao ensaio orbital com o processo convencional e progressão descendente.	169
Tabela 49. Valores médios de velocidade de alimentação nos diferentes setores. Primeiro ensaio orbital 180° com o processo convencional e progressão descendente.	169

Tabela 50. Medição do perfil geométrico. Ensaio com o processo convencional respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia.....	172
Tabela 51. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Segundo ensaio orbital 180° com o processo convencional e progressão descendente.....	172
Tabela 52. Medição do perfil geométrico. Ensaio com o processo convencional e velocidade de arame inferior à exigida pela relação entre velocidade de alimentação e energia.	175
Tabela 53. Critérios utilizados para quantificar a produtividade e seus respectivos valores.	176

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- A_1 – Área abaixo do gráfico de velocidade x tempo correspondente ao deslocamento de avanço
- A_2 – Área abaixo do gráfico de velocidade x tempo correspondente ao deslocamento de recuo
- A_{arame} – Área da seção transversal do arame
- API – *American Petroleum Institute*
- Ar – Argônio
- ASME – *American Society of Mechanical Engineers*
- ASTM – *American Society of Testing Materials*
- AVC – *Arc Voltage Control*
- AWS – *American Welding Society*
- c – calor específico
- CCC – Curto-Circuito Controlado
- CMD – Campo referente ao comando do dispositivo
- CMT – *Cold Metal Transfer*
- DADO – Campo de tamanho variável
- DBCP – Distância Bico de Contato Peça
- DEP – Distância Eletrodo Peça
- e – Espessura
- E – Energia / Força eletromagnética
- F_{in} – Força mínima para retirar o arame da bobina
- F_{out} – Força necessária para tracionar o arame
- H_2 – Hidrogênio
- g – Força gravitacional
- I_A – Corrente do arco
- ID – *Internal Diameter* / Campo referente à identificação do dispositivo
- IHM – Interface Homem Máquina
- ISO – *International Organization for Standardization*
- L – Calor latente de fusão
- LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina
- LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
- LED – *Light Emitting Diode*
- M – Força induzida pelo gradiente de tensão superficial
- MIG/MAG – *Metal Inert Gas / Metal Active Gas*
- n – Espessura de “nariz”

Pot – Potência do arco voltaico
PP – Posição Plana
PV – Posição Vertical Descendente
 Q_{arco} – Energia por unidade de comprimento do arco voltaico
 Q_{arame} – Energia por unidade de comprimento necessária à fusão do arame
 Q_{perdas} – Energia por unidade de comprimento perdida para o ambiente
 $Q_{\text{peça}}$ – Energia por unidade de comprimento destinada à peça
R – Raio de curvatura
RY – Posicionamento angular do direcionador de arame
SAE – *Society of Automotive Engineers*
SAP – Sistema de Aquisição Portátil
SC – Posição Sobre cabeça
SAP – Sistema de Aquisição Portátil
STA – Sistema Tracionador de Arame
STT – *Surface Tension Transfer*
 t_0 – Tempo correspondente ao início do avanço
 t_1 – Tempo correspondente ao término do avanço e início do recuo / tempo de referência na IHM do manipulador
 t_2 – Tempo correspondente ao término do recuo / tempo de referência na IHM do manipulador
 t_a – Tempo de avanço de arame
 T_a – Temperatura ambiente
 T_f – Temperatura de fusão
TIG – *Tungsten Inert Gas*
 t_r – Tempo de recuo de arame
 U_A – Tensão do arco
USB – *Universal Serial Bus*
 $v(t)$ – Função velocidade
 (v_a/Pot) – Relação entre velocidade de arame e potência do arco
 V_a – Velocidade de alimentação de arame (avanço)
 V_{alim} – Velocidade de alimentação
 V_r – Velocidade de alimentação de arame (recuo)
 V_s – Velocidade de soldagem
X – Eixo de translação do direcionador de arame
Y – Eixo de translação do direcionador de arame
Z – Eixo de translação do direcionador de arame
 α – Ângulo de alimentação de arame
 ΔT – Diferença de temperatura

μ – Coeficiente de atrito do conduíte
 ρ – Massa específica
 τ – Quantidade de calor por volume
 Φ – Grau de dobramento do conduíte
3D – Três dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	35
1.1	JUSTIFICATIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	36
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	38
1.2.1	Objetivo geral.....	38
1.2.2	Objetivos específicos.....	38
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	41
2.1	PRODUTIVIDADE EM SOLDAGEM.....	41
2.1.1	Definição.....	41
2.1.2	Justificativas para a implementação de sistemas mecanizados: aporte de capital.....	45
2.1.3	Fatores que contribuem para o aumento da produtividade: aporte de conhecimento	46
2.1.3.a	Redução do tempo total de operação.....	46
2.1.3.b	Redução da quantidade de matéria prima e do tempo total de operação.....	47
2.1.3.c	Eliminação de custos adicionais.....	51
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM TIG	51
2.2.1	Adição de material e técnicas de alimentação ...	54
2.2.1.a	Arame frio (<i>cold wire</i>) e arame quente (<i>hot wire</i>).....	55
2.2.1.b	Disposição geométrica radial e tangencial	57
2.2.1.c	Movimentação contínua e dinâmica.....	58
2.2.2	Transferência metálica e transferência de calor	61
2.2.2.a	Efeitos da pulsação de corrente	74
2.3	SOLDAGEM TIG ORBITAL: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS	75
2.3.1	Passe de raiz	80

2.3.2	Tecnologia existente relativa aos processos a arco voltaico	81
2.3.2.a	Versões do processo MIG/MAG aplicadas ao passe de raiz	82
2.3.2.b	Versão do processo TIG aplicada ao passe de raiz.....	83
3	MATERIAIS E MÉTODOS	85
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA.....	85
3.1.1	Bancada experimental	85
3.1.2	Corpos de prova e material de adição	89
3.1.3	Parâmetros de soldagem.....	89
3.1.4	Análise macrográfica e avaliação das características geométricas.....	91
3.1.5	Monitoração.....	92
3.1.5.a	Sistema de aquisição de dados.....	92
3.1.5.b	Filmagem em alta velocidade: oscilação do arame e transferência metálica	92
3.1.5.c	Filmagem termográfica.....	97
3.1.6	Necessidades tecnológicas levantadas: desenvolvimento de um sistema de medição da velocidade de arame dedicado aos processos com alimentação dinâmica	98
3.1.6.a	Sistema de medição	100
3.2	ENSAIOS DE SOLDAGEM ORBITAL	104
3.2.1	Bancada experimental	105
3.2.2	Corpos de prova e material de adição	106
3.2.3	Parâmetros de soldagem: ensaios preliminares com alimentação dinâmica	110
3.2.3.a	Progressão descendente (10h, 9h e 8h).....	111
3.2.3.b	Progressão ascendente (5h).....	112
3.2.4	Parâmetros de soldagem: ensaios orbitais 180° com alimentação dinâmica (1A / 1B e 2A / 2B).....	114

3.2.5	Parâmetros de soldagem: ensaio orbital 180° com o processo convencional	118
3.2.5.a	Parametrização respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia	119
3.2.5.b	Parametrização com velocidade de arame constante e inferior à exigida pela relação entre velocidade de alimentação e energia	121
3.2.6	Análise macrográfica e avaliação das características geométricas	121
3.2.7	Monitoração	123
3.2.8	Necessidades tecnológicas levantadas: implementação do sincronismo entre corrente e velocidade de alimentação.....	124
3.2.8.a	Sincronismo entre o pulso de corrente e o avanço do arame	124
3.2.8.b	Projeto de um dispositivo direcionador de arame.....	127
3.2.8.c	Substituição do sistema de transmissão do manipulador robótico.....	130
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	133
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA	133
4.1.1	Validação do transdutor desenvolvido.....	133
4.1.2	Ensaio de soldagem	138
4.2	ENSAIOS DE SOLDAGEM ORBITAL.....	146
4.2.1	Ensaio preliminares com alimentação dinâmica.....	146
4.2.1.a	Progressão descendente (10h, 9h e 8h).....	146
4.2.1.b	Progressão ascendente (5h)	148
4.2.2	Ensaio orbitais 180° com alimentação dinâmica.....	150
4.2.2.a	Ensaio 1 (A e B).....	150
4.2.2.b	Ensaio 2 (A e B).....	160

4.2.3	Ensaio orbital 180° com o processo convencional	169
4.2.3.a	Parametrização respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia.....	169
4.2.3.b	Parametrização com velocidade de arame constante e inferior à exigida pela relação entre velocidade de alimentação e energia.....	172
4.2.4	Avaliação dos resultados sob o aspecto de produtividade	176
4.2.5	Avaliação dos resultados sob o aspecto de qualidade.....	178
5	CONCLUSÕES.....	181
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	181
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	184
	REFERÊNCIAS.....	187
	APÊNDICE A - MEMORIAL DE CÁLCULO REFERENTE AO BALANÇO DE INCERTEZAS	199
	A.1 - MEDIÇÃO A PARTIR DOS DADOS DA FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE.....	199
	A.2 - MEDIÇÃO COM O TRANSDUTOR.....	206

1 INTRODUÇÃO

Existem diversos tipos de processos de soldagem que foram desenvolvidos ao longo de muitos anos, como o MIG/MAG, o TIG, o LASER, dentre outros. Estes processos vêm sendo aperfeiçoados, sobretudo numa busca contínua de melhoria da produtividade.

No meio técnico, existe um pensamento de que a maior produtividade é obtida por aquele processo que produz a maior taxa de fusão de material de adição. Por exemplo, é quase consenso de que o processo MIG/MAG possui uma diferença significativa em taxa de fusão de material de adição em relação ao processo TIG. Esta afirmativa é contestada a partir de dois argumentos. Primeiro, a taxa de fusão é maior no MIG/MAG apenas no caso em que a mesma corrente é imposta. Quando a relação é dada para a mesma potência, os processos TIG e MIG/MAG são semelhantes [1]. Segundo, sob este aspecto de taxa de fusão, não justificaria o fato do processo LASER ser produtivo para a aplicação de raiz, pois ele o é, mesmo no caso de, se desejado, não inserir qualquer material de adição.

Em função disto, a questão da produtividade não deveria ser julgada somente à luz de taxas de fusão. Ela deveria ser julgada sob aspectos muito mais amplos e não sob uma análise tão restrita. O que importa, de fato, não é o quanto um processo produz de taxa de fusão, nem o quanto ele tem de capacidade de penetração, e sim o quanto se tem de quantidade de produto acabado com a qualidade e os requisitos requeridos. Para tanto, é necessário a junção da taxa de fusão, quando ela é requerida, com o perfil de penetração desejável.

Outro aspecto importante para a produtividade diz respeito aos tempos mortos das operações. No caso da soldagem orbital, este último aspecto é de fundamental relevância, pois a variação das posições relativas da tocha de soldagem impõe restrições diferenciadas a cada processo. Por exemplo, o processo MIG/MAG não possui propriedades de atender geometricamente o cordão de solda se a órbita seguir a mesma direção de soldagem, pois ora se estará na posição vertical descendente e ora na vertical ascendente. Isto produz soldas com geometrias muito diferenciadas para o citado processo. Entretanto, isto já não acontece da mesma maneira para o processo TIG, o que

vislumbra a possibilidade de seguir com a soldagem sem parar, executando uma órbita completa.

Portanto, apesar da ampla gama de opções e do avançado estágio de desenvolvimento dos processos de soldagem, a busca pelo aperfeiçoamento que possa dar maior produtividade, robustez e redução do índice de falhas é um assunto de grande interesse da indústria no contexto brasileiro e internacional. No presente trabalho apresenta-se o desenvolvimento de uma versão de soldagem TIG orbital, com especial atenção à avaliação da produtividade.

1.1 JUSTIFICATIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

De acordo com o escritor Walter Lippman, “quando todos estão pensando o mesmo, ninguém está pensando”. Esta afirmativa parece exagerada e encontra mais sentido no campo da política e das relações humanas. Entretanto, pode fazer sentido no campo das denominadas Ciências Exatas. Muitos paradigmas acabam se estabelecendo por terem sido escritos em veículos de elevado prestígio. Conceitualmente, um paradigma se constitui em um padrão a ser seguido [2].

No contexto dos processos de soldagem, existe uma dificuldade de aproximação entre quem executa as operações (soldadores ou operadores) e os responsáveis técnicos pelo projeto e especificação das soldas. Em grande parte dos casos que envolve tecnologia da soldagem, nota-se que o engenheiro é um mero espectador do que acontece no chão de fábrica.

Um dos equívocos em toda esta problemática acontece na interpretação do que é realmente produtividade. E é neste momento que se observa, no contexto da soldagem, a questão levantada por Walter Lippman. Existe um pensamento reinante de que a maior produtividade é obtida por aquele processo que produz maior taxa de fusão de material de adição.

No entanto, deve-se observar que quando a taxa de fusão aumenta, a penetração diminui. Seria normal pensar que uma elevação da potência do processo conduzisse a um aumento de penetração. Entretanto, nos processos com eletrodos consumíveis, à medida que a potência é aumentada, aumenta também a taxa de material de adição. Então, o aumento da potência só atua para o preenchimento do chanfro e não para conseguir aquilo que é

fundamental na soldagem de união, a penetração ao longo da espessura das peças.

Se o que se busca fundamentalmente é a fusão ao longo da espessura das peças e a taxa de fusão se torna um fator negativo, então, é possível pensar que os processos com eletrodos não consumíveis, como o TIG, fossem a solução do problema, porque em um extremo não teríamos nada de material de adição. Haveria também a possibilidade de dosar a quantidade de material de adição em proporções de acordo com a necessidade. Entretanto, esta é mais uma situação em que todos pensam igual, mas, na realidade, ninguém está pensando correto, pois somente é verdadeira no caso de operações manuais. Nestas, o soldador controla a adição de arame em um movimento alternativo de inserção da vareta de adição e parada, até o seu recuo. É algo baseado no fato de que existe intrinsecamente um elevado controle operativo. Tal controle ainda não existe nos sistemas mecanizados com alimentação automática de soldagem TIG e, por isto, a taxa de fusão de material de adição permanece atrelada à potência do processo.

Ao dissociar a potência do arco do material adicionado, torna-se possível favorecer a penetração. O operador pode escolher a quantidade de arame que julgar necessária, destinando a maior parte da energia do arco para a peça. Assim, o tempo total de operação é reduzido mediante o uso de chanfros com menor volume. Menor volume significa menor quantidade de material a ser depositada e, portanto, exige menos passes.

O desenvolvimento de novos sistemas e procedimentos de soldagem com esta finalidade é essencial diante do crescimento do consumo de combustíveis [3]. O petróleo constitui a principal fonte de energia do mundo moderno, e está presente em uma série de produtos. É inicialmente extraído dos poços produtores, com água, impurezas e gás. As plataformas separam os fluidos para que estes sejam transportados até terminais no litoral e, em seguida, para as refinarias, onde dão origem a derivados como diesel e gasolina [4]. Existem várias alternativas para o transporte. Dentre elas, pode-se citar os navios petroleiros e o transporte terrestre. Contudo, estas soluções apresentam elevadas dificuldades operacionais e acentuado impacto ambiental. O escoamento por meio de dutos consiste na forma mais apropriada. São capazes de conduzir grande volume de fluidos de um ponto de oferta a um ponto de consumo, com alto grau de

confiabilidade por não se sujeitarem a incertezas meteorológicas ou congestionamentos [5]. As linhas dutoviárias atualmente são soldadas em atividades de construção, montagem, reparo e manutenção. Tudo é feito em campo, com processos manuais, e demandam elevados custos de produção. Em 2014, o Brasil possuía 601 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos, totalizando 19,7 mil km [6]. No entanto, para atender à demanda, a indústria de petróleo e gás deverá expandir a malha de dutos.

A escolha do processo TIG para a união das seções das tubulações advém do fato de apresentar a menor susceptibilidade a defeitos se comparado com o MIG/MAG, o que é essencial em um passe de raiz. Procura-se provar que, apesar dos paradigmas, que atribuem uma baixa produtividade ao TIG, é possível considerá-lo como alternativa viável à redução dos custos, desde que a mecanização atue em conjunto com o aporte de conhecimento.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de técnicas para a realização da soldagem TIG orbital de tubos que resultem no aumento da produtividade mediante o incremento na penetração, visando aplicações do setor de petróleo e gás.

1.2.2 Objetivos específicos

Para a consecução deste objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver um sistema dinâmico automático que simule as ações de um soldador no tocante ao controle do avanço, parada e recuo do arame de adição. Isto visará a obtenção do máximo de ação de arco sem a objeção do material de adição, alcançando a independência entre potência e velocidade de alimentação;

- caracterizar a soldagem pelo processo TIG com alimentação dinâmica e verificar os aspectos operacionais mais relevantes;
- desenvolver e validar um sistema de medição da velocidade de arame dedicado aos processos com alimentação dinâmica;
- implementar melhorias no equipamento para que tenha condições de ser utilizado em ambientes industriais;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRODUTIVIDADE EM SOLDAGEM

2.1.1 Definição

O termo produtividade é constantemente utilizado nos diferentes processos de fabricação para indicar a capacidade de produzir. No entanto, esta capacidade muitas vezes é mencionada sem o conhecimento de sua definição formal, o que dificulta a obtenção de resultados satisfatórios que culminem em seu aumento.

Segundo Campos [7], produtividade é a relação entre o valor produzido e o valor consumido, que resulta em taxa de valor agregado, conforme mostrado abaixo:

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Valor Produzido}}{\text{Valor Consumido}} = \text{Taxa de valor agregado}$$

Logo, um método de otimização da produtividade deve maximizar o valor produzido e minimizar o valor consumido. Atenta-se ao fato de que o valor produzido está relacionado não apenas com a quantidade, mas também com a qualidade. A qualidade é alcançada quando as necessidades do cliente são conferidas com um produto que atenda aos requisitos estabelecidos, sem a incidência de defeitos, a baixo custo e respeitando-se os cronogramas estipulados. O valor consumido se associa com a matéria prima e com a mão de obra.

A relevância econômica da produtividade é enfatizada por Krugman [8]:

“A produtividade não é tudo, mas a longo prazo é quase tudo. A capacidade de um país para melhorar seu padrão de vida ao longo do tempo depende quase inteiramente da sua capacidade de aumentar a sua produção por trabalhador.”

O gráfico da Figura 1 apresenta a evolução da produção por trabalhador nos Estados Unidos. A elevação gradativa observada é consequência dos avanços e investimentos em tecnologia. Atualmente, com menor quantidade de empregados, é

possível produzir mais, desde que equipamentos adequados sejam utilizados.



Figura 1. Produção por trabalhador nos Estados Unidos, 1947 a 2014. Adaptado de [9].

O principal efeito deste crescimento foi a redução nos preços dos bens de consumo, e consequente aumento do padrão de vida. Verifica-se na Figura 2 que as despesas básicas em 1947 correspondiam a mais de 40% da renda do trabalhador, enquanto hoje representam apenas 15%.

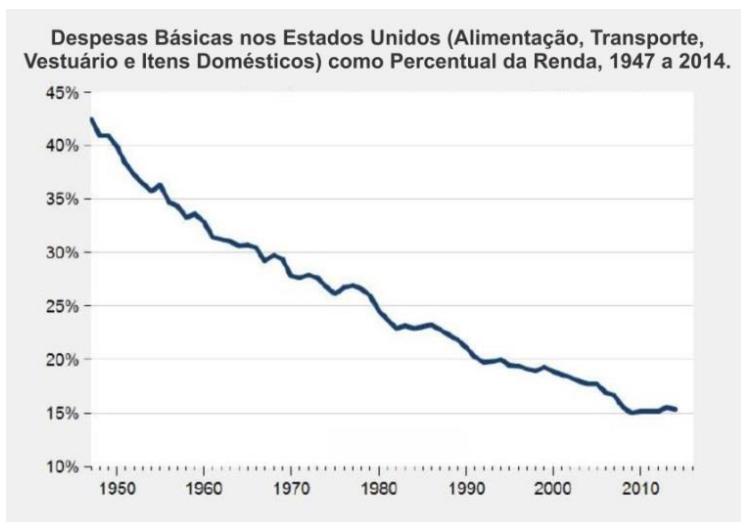


Figura 2. Despesas básicas nos Estados Unidos (Alimentação, Transporte, Vestuário e Itens Domésticos) como percentual da renda disponível, 1947 a 2014. Adaptado de [9].

O cenário do Brasil é muito diferente do mostrado nos gráficos acima. São necessários quatro brasileiros para igualar a produtividade de um americano, de acordo com a Figura 3. O baixo nível educacional é apontado como a principal causa desta defasagem. Enquanto o brasileiro estuda em média sete anos, o americano estuda treze. Além disso, as empresas brasileiras oferecem anualmente apenas 30 horas de treinamento, contra 140 horas dos americanos [10].

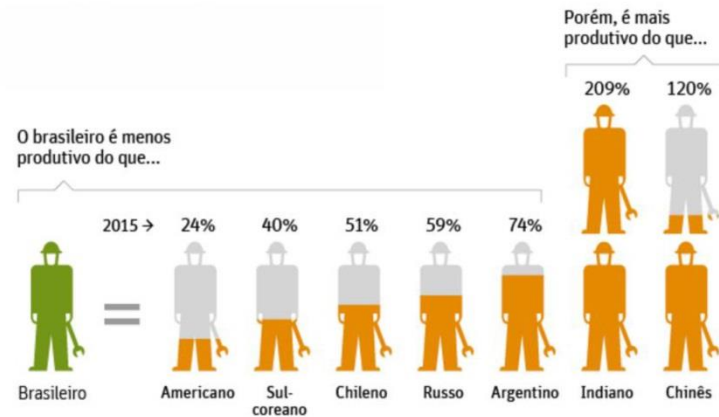


Figura 3. Produtividade do brasileiro em relação aos de trabalhadores de outras nacionalidades [10].

Os fatos apresentados reiteram a importância do investimento em equipamentos, em procedimentos e em treinamento de pessoas. Isto se traduz em aporte de capital e aporte de conhecimento. Havendo capital, pode-se adquirir equipamentos sofisticados. O retorno obtido é a curto prazo, porém baixo e variável. Por outro lado, o aporte de conhecimento possui um retorno elevado, mas de difícil avaliação a longo prazo. É limitado pela velocidade de aprendizado do ser humano. Verifica-se com isto que uma máquina nova por si só não é garantia de sucesso. Os engenheiros devem saber quais configurações proporcionam os melhores resultados e os soldadores devem operar seguindo as recomendações propostas. O estudo de novas técnicas atua neste sentido.

No presente trabalho, o aumento da produtividade será tratado como resultado do desenvolvimento de um equipamento que ocorrerá simultaneamente ao desenvolvimento de técnicas e procedimentos de soldagem. Isto contempla a metodologia de aporte de capital e conhecimento apresentada com o objetivo de alcançar a maior produtividade possível por intermédio do aumento da quantidade em conjunto com a qualidade e redução da matéria prima.

2.1.2 Justificativas para a implementação de sistemas mecanizados: aporte de capital

A capacidade inerente do ser humano de perceber erros e mudanças e atuar para corrigi-los o qualifica para a execução da soldagem. Apesar do produto final ser aprovado na etapa de inspeção, os procedimentos manuais demandam muito tempo, o que reduz a quantidade e contribui no sentido contrário ao cumprimento dos prazos. Além disto, um resultado repetitivo ocorre em função da habilidade do soldador e depende das condições em que o trabalho é realizado. Estas limitam o conforto em virtude da exposição a ambientes pouco ergonômicos, com presença de fumos [23].

O gráfico da Figura 4 apresenta a composição do custo geral típico da soldagem. Nota-se que a mão de obra corresponde à parcela mais significativa, e não os custos com eletricidade, equipamento e consumíveis. Logo, o sucesso competitivo depende do investimento em sistemas mecanizados que reduzam os custos com mão de obra.

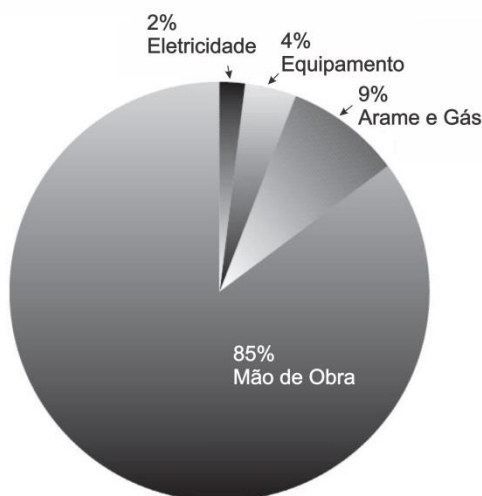


Figura 4. Custo geral típico da solda no processo produtivo. Adaptado de [11].

A norma API 1104 [12] define um processo mecanizado como um processo no qual os parâmetros e orientação da tocha são controlados mecânica ou eletronicamente, mas podem ser alterados manualmente durante a soldagem para manter as condições especificadas. Estas correções são realizadas de forma remota. Considerando a aplicação de soldagem orbital, o sistema é composto por uma fonte de soldagem integrada com um cabeçote de alimentação automática de arame e um manipulador robótico. O conjunto possui fácil operação se comparado com a habilidade requerida por um soldador certificado, e é capaz de obter resultados superiores em pouco tempo de treinamento.

Como exemplo de situação na qual a mecanização foi essencial, pode-se mencionar a soldagem de tubos durante a construção da usina nuclear de Angra II. Os engenheiros relataram grande resistência diante da mudança dos procedimentos manuais para os mecanizados. No entanto, no final, os benefícios foram evidentes [13]. Outro caso teve lugar em Trinidad e Tobago, em uma empresa prestadora de serviços para a indústria química. Diante da ausência de soldadores certificados, optou-se pela mecanização da soldagem de tubos [14].

Atualmente, um dos principais desafios da soldagem mecanizada é atribuído à falta de robustez dos equipamentos e consequente baixo desempenho em campo. No processo TIG, constata-se o risco de contaminação do eletrodo de tungstênio, caso aconteça alguma irregularidade inesperada. Isto pode invalidar economicamente uma tentativa de mecanização. Portanto, para aumentar a aceitação desses sistemas no mercado, o fabricante deve investir na melhoria dos equipamentos.

2.1.3 Fatores que contribuem para o aumento da produtividade: aporte de conhecimento

A seguir serão descritas técnicas aplicadas ao processo TIG orbital que resultam no aumento do valor produzido e na redução do valor consumido.

2.1.3.a Redução do tempo total de operação

A quantidade produzida pode ser aumentada a partir da implementação de procedimentos que permitam maiores

velocidades de soldagem, reduzindo o tempo total de operação. Uma das formas de se alcançar este objetivo consiste na adição de determinados percentuais de hidrogênio à mistura. As misturas Ar – H₂, por exemplo, possuem uma eficiência de fusão muito mais elevada se comparada com Ar puro, fato atribuído principalmente à maior condutividade térmica do hidrogênio [15]. Contudo, aconselha-se precaução, uma vez que o material pode apresentar susceptibilidade a trincas e porosidades. Menciona-se também o risco incorporado por se tratar de um gás altamente inflamável.

Outra forma de alcançar a redução dos tempos consiste na soldagem em órbita completa. Comparando-se os cordões obtidos com o processo TIG com os do processo MIG/MAG em soldagem orbital, verifica-se experimentalmente uma dificuldade com relação à homogeneidade da geometria neste último quando o procedimento é executado em um passe de 360°. Este procedimento atualmente é viável apenas com o processo TIG [16], enquanto que no MIG/MAG convencionou-se soldar o tubo em duas etapas de 180°. Isto introduz a vantagem de redução dos tempos mortos, uma vez que não há necessidade de reposicionar o manipulador robótico até a posição inicial nem de esmerilhar o final do cordão para preparar a transição da junta (“unha”). Por outro lado, o processo MIG/MAG dispensa a afiação do eletrodo, já que se trata de um arame-eletrodo.

2.1.3.b Redução da quantidade de matéria prima e do tempo total de operação

A geometria da junta determina a quantidade de material requerido para a união. Procedimentos manuais utilizam junta do tipo “V” em decorrência de sua abertura, que facilita o acesso do soldador. Neste caso, também é usual utilizar espaçamento entre as peças (*gap*). Além de resultar em um elevado volume de material a ser adicionado, o chanfro “V” com espaçamento demanda habilidade por parte do soldador, que deve criar uma “ponte” de material fundido para ligar um lado ao outro do chanfro [17]. Apesar das desvantagens relacionadas a este tipo de junta e sua maior frequência no procedimento manual, Chowdary et al. [14] obtiveram resultados satisfatórios, em duas etapas de 180°, para o passe de raiz em tubos com o processo TIG

mecanizado. O desenho do chanfro é mostrado na Figura 5. O *gap* utilizado foi de 3,20 mm.

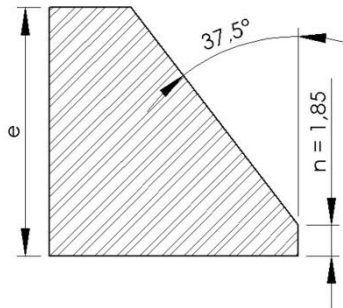


Figura 5. Chanfro tipo “V” utilizado por Chowdary [14] para a execução de um procedimento de soldagem TIG mecanizado. Dimensões em mm.

Quanto maior a quantidade de material para preencher a junta, mais passes são exigidos e maior é o tempo de arco aberto. Como consequência, além do aumento dos custos de produção, tem-se maior tensão residual na junta, oriunda dos efeitos térmicos. Procedimentos mecanizados permitem o uso de geometria tipo “U”, cujo principal benefício diz respeito ao menor volume. Com isso, contribui significativamente para o aumento da produtividade. A soldagem é realizada encostando-se a junta, sem aberturas. Pode-se ainda otimizar a geometria com ângulos mais fechados e maiores dimensões da face de raiz (“nariz” n) [16][18]. Em tubos de parede espessa, este tipo de junta é conhecido como *Narrow Gap*. Porém, as dificuldades operacionais aumentam em virtude do acesso da tocha no interior da junta. A menor eficiência da proteção gasosa torna o processo mais sensível à porosidade, e o pequeno espaço entre as paredes do chanfro exige maior habilidade por parte do operador de soldagem em alinhar a tocha e evitar defeitos como a falta de fusão.

A Figura 6 apresenta o desenho do chanfro utilizado por Pigozzo [16], que realizou a soldagem de tubos em 360° com o processo TIG mecanizado, sem parada.

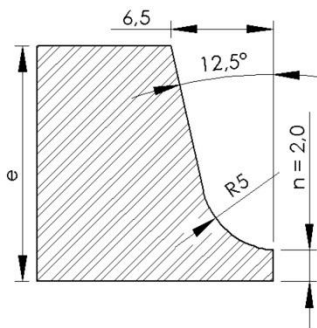


Figura 6. Chanfro tipo “U” utilizado por Pigozzo [16] para a execução de procedimentos de soldagem TIG mecanizada. Dimensões em mm.

A geometria em “U” também pode ser utilizada no processo MIG/MAG mecanizado. Sartori [17] empregou o chanfro da Figura 7 para soldar tubos com a versão CCC (Curto-Circuito Controlado) em duas partes de 180°.

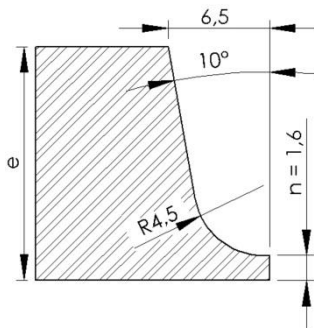


Figura 7. Chanfro tipo “U” utilizado por Sartori [17] para a execução de um procedimento de soldagem MIG/MAG mecanizada. Dimensões em mm.

Comparando-se as áreas das seções transversais das juntas acima, verifica-se, com base na Tabela 1, que o chanfro tipo “U” é, de fato, mais apropriado quando se deseja aumentar a produtividade em relação ao chanfro tipo “V”. O chanfro utilizado por Pigozzo apresentou uma economia de material de 31% em relação ao chanfro de Chowdary, e de 9% em relação ao de Sartori. Isto também influenciou diretamente no tempo de

execução do processo, devido à menor quantidade de passes exigida. Apesar de ser do tipo “U”, o chanfro empregado por Sartori possuía menor espessura de “nariz”. Por envolver o processo MIG/MAG, parte significativa da potência do arco é destinada à fusão do arame, limitando assim a penetração.

Tabela 1. Área da seção transversal dos chanfros utilizados em procedimentos de soldagem mecanizada TIG e MIG/MAG. Espessura de parede $e = 15$ mm, adotada para a comparação.

Chanfro	Área restante para preenchimento [mm ²]
Tipo “V” TIG – Chowdary [14]	181
Tipo “U” TIG – Pigozzo [16]	125
Tipo “U” MIG/MAG – Sartori [17]	137

Para quantificar a produtividade de um passe, o critério mais adequado está associado à medição da dimensão da solda (altura da área fundida), mostrada na Figura 8.

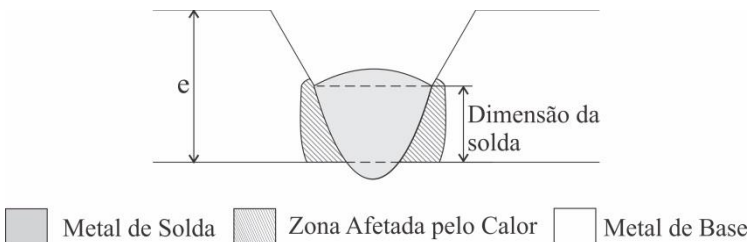


Figura 8. Dimensão da solda (altura da área fundida).

No caso do passe de raiz, a junta também deve ter penetração total. A Tabela 2 exibe os valores médios de dimensão da solda obtidos a partir dos procedimentos de Sartori [17] e Pigozzo [16] no passe de raiz.

Tabela 2. Dimensão da solda resultante dos procedimentos de soldagem mecanizada TIG e MIG/MAG.

Chanfro	Dimensão da solda [mm]
Tipo “U” TIG / $n = 2,00$ mm – Pigozzo [16]	2,8
Tipo “U” MIG/MAG / $n = 1,60$ mm – Sartori [17]	2,9

Portanto, existem duas formas de aumentar a produtividade. No MIG/MAG, usualmente é utilizada uma espessura de “nariz” menor, com elevada velocidade de alimentação (de 3 a 4 m/min [17]). No TIG, é possível aumentar a espessura de “nariz”, desde que a quantidade de arame seja suficiente para a obtenção de penetração total. Isto tende a resultar em maiores valores de dimensão da solda. Contudo, a independência entre a potência do arco e a velocidade de arame é verificada apenas na versão manual.

2.1.3.c Eliminação de custos adicionais

Em determinados procedimentos de passe de raiz, principalmente quando existe espaçamento entre as peças, recomenda-se o uso de anteparo da poça de fusão (*backing*). Este dispositivo é posicionado no lado interno do duto e seu objetivo é sustentar a poça. Apesar de ser eficiente ao evitar a ocorrência de defeitos como *Burn-Through*, apresenta a desvantagem de propiciar a formação de inclusões, além de ser um custo adicional. O processo TIG, juntamente com os modernos processos MIG/MAG, permite a soldagem sem a utilização de *backing*, quando não há espaçamento entre as peças [16][18].

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O conceito de soldagem tem como premissa a continuidade das propriedades físicas e químicas dos materiais [19], que por sua vez envolve uma elevada densidade de energia em um pequeno volume. Tais condições, se não forem bem definidas, podem propiciar o surgimento de descontinuidades. Consequências de diferentes magnitudes são oriundas de descontinuidades indesejáveis, variando de atrasos nas metas estipuladas, até perda de vidas, em casos extremos. Desde seu surgimento, em 1942 [20], o processo TIG é reconhecido industrialmente por proporcionar qualidade em aplicações de elevado requisito, ou seja, é capaz de garantir uma união pouco susceptível a defeitos [21]. O arco voltaico é resultante da emissão de elétrons a partir de um eletrodo não consumível, de tungstênio. A versão manual possui a vantagem de controlabilidade da poça de fusão, conferindo liberdade para que o soldador atue com o calor do arco e o material de adição de

forma independente. Assim, é possível obter resultados satisfatórios mesmo com a presença de desalinhamentos e imperfeições oriundas da montagem. A Figura 9 mostra como o soldador conduz a tocha e o material de adição. Nota-se que o processo oferece a flexibilidade de manipulação da fonte de calor juntamente com a presença de material nas proporções necessárias.

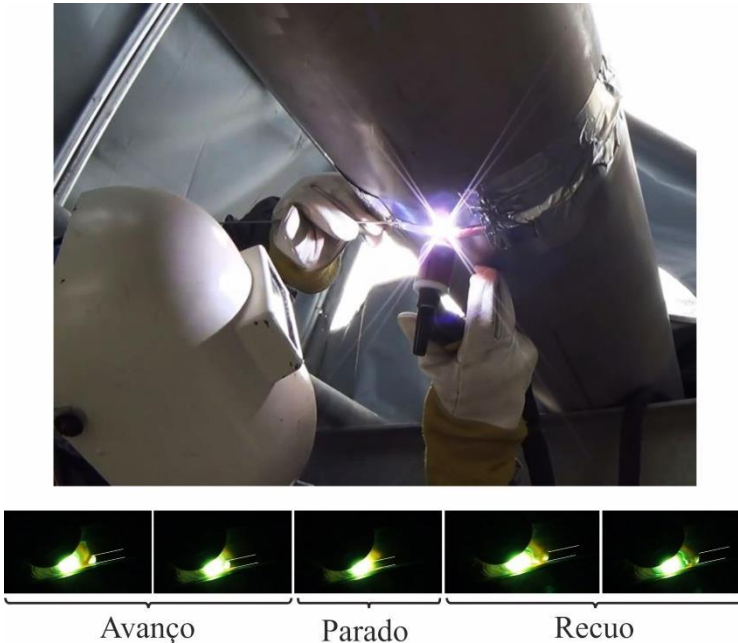


Figura 9. Movimento alternativo de inserção da vareta no processo TIG manual. Adaptado de [22].

Não há formação de escória, como nos Eletrodos Revestidos, nem de respingos, encontrados tanto em Eletrodos Revestidos quanto em diversas versões do MIG/MAG. A presença de fumos é reduzida, diminuindo assim o desconforto e consequente dano à saúde do operador.

A principal limitação do processo TIG relaciona-se com a produtividade, denotada usualmente como baixa quando é utilizado em sua forma tradicional. Por isto, em aplicações nas quais as tolerâncias de qualidade não são tão estreitas e o material

apresenta boa soldabilidade, outros processos são preferidos. No entanto, pesquisas destinadas à melhoria dos processos de fabricação de soldagem possibilitaram a evolução tecnológica dos processos manuais. Muitas das restrições inicialmente observadas, como a baixa taxa de fusão em relação à corrente média e a baixa velocidade de soldagem, hoje não são encontradas nos processos mecanizados e automatizados. Novas técnicas aliadas a equipamentos obtiveram sucesso em melhorar a produtividade e manter o reduzido índice de defeitos. Pode-se citar como exemplo a utilização da oscilação longitudinal da tocha (*Switch Back*) [24], a implementação do duplo eletrodo [25] e o modo operacional *Keyhole* [26].

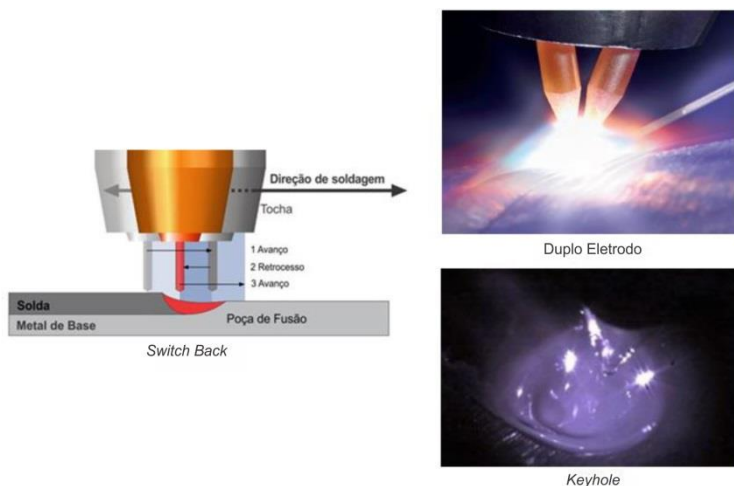


Figura 10. Técnicas de soldagem do processo TIG que visam o aumento da produtividade [24][25][26].

Pequenos aperfeiçoamentos do sistema tradicional mostraram-se industrialmente mais eficazes em termos de produtividade do que a utilização de outros processos, incluindo-se os de fonte de calor focada como o LASER [27]. A seguir, são apresentadas as diversas versões do processo TIG com adição de material, que contemplam desde a concepção convencional até as mais recentes implementações propostas. Reitera-se o fato de que cada versão possui benefícios diretamente associados a uma determinada aplicação.

2.2.1 Adição de material e técnicas de alimentação

Um dos atributos diferenciais do processo TIG em relação ao MIG/MAG e ao Eletrodo Revestido está relacionado à possibilidade de realizar a soldagem sem a adição de material, ou seja, de modo autógeno. Apesar de possuir a vantagem de maior disponibilização de energia à poça de soldagem, sem absorção de calor por parte do arame, requisitos de projeto e de qualidade podem demandar o emprego de adição. O preenchimento de uma junta ou a alteração da composição química do material com o intuito de melhorar as propriedades de resistência mecânica e a corrosão constituem algumas das justificativas [28]. Soma-se a estas o fato de que, em alguns casos, o material adicionado atua de forma a reduzir a tendência de formação de defeitos. A susceptibilidade ao “*humping*”, uma descontinuidade caracterizada por regiões de crateras e regiões de protuberâncias, de maneira alternada [15], pode ser reduzida a partir da utilização de arames com alto teor de desoxidantes [29]. Outro problema que se manifesta na soldagem autógena diz respeito às trincas de solidificação. Quando não há material adicionado, a razão profundidade/largura do cordão aumenta, e faz com que haja crescimento de grãos colunares em direções opostas. Este é um fator que aumenta a susceptibilidade à formação de trincas, conforme mostrado na Figura 11.

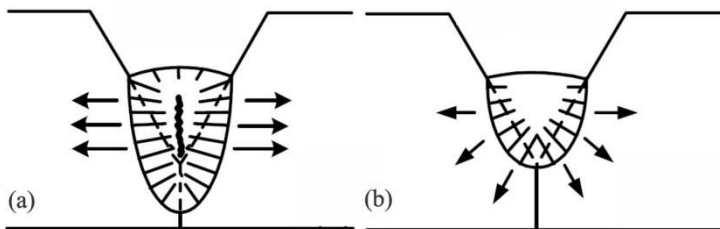


Figura 11. Influência da razão profundidade/largura do cordão no surgimento de trincas. (a) Soldagem autógena. (b) Soldagem com adição de material. Adaptado de [30].

Diante do exposto, verifica-se que a adição de material em alguns casos é necessária. Para isto, a correta escolha da técnica

de alimentação impacta diretamente na produtividade. Em aplicações de revestimento e preenchimento, deseja-se depositar material. Por outro lado, tratando-se de passe de raiz, o objetivo da adição relaciona-se à redução da susceptibilidade a defeitos. Portanto, neste caso, a metodologia escolhida deve favorecer a penetração e adicionar material na quantidade apenas necessária.

Existem diversas técnicas de alimentação que podem ser efetuadas por meios manuais ou automáticos. Tendo em vista o aumento de produtividade, o presente trabalho se propõe a investigar as técnicas automáticas. As vertentes de pesquisa diferem em relação à temperatura do arame, à sua disposição geométrica e ao seu modo de movimentação. É possível combinar as diferentes estratégias com o intuito de conciliar seus benefícios. No tópico abaixo, são descritas as mais utilizadas, assim como as que foram recentemente desenvolvidas.

2.2.1.a Arame frio (*cold wire*) e arame quente (*hot wire*)

Considerando a temperatura em que o arame é adicionado, existem duas possibilidades. Em aplicações que exigem elevada taxa de deposição, como em soldagem de revestimento ou preenchimento, o processo com arame quente (*hot wire*) prevalece. Por outro lado, em aplicações com adição de material à temperatura ambiente, técnica conhecida como arame frio (*cold wire*), predomina a execução do passe de raiz. A Figura 12 exhibe esquematicamente o processo TIG alimentado, que pode funcionar em uma das duas versões apresentadas. Estão indicados os principais parâmetros geométricos, assim como um exemplo de tocha que opera a partir deste princípio.

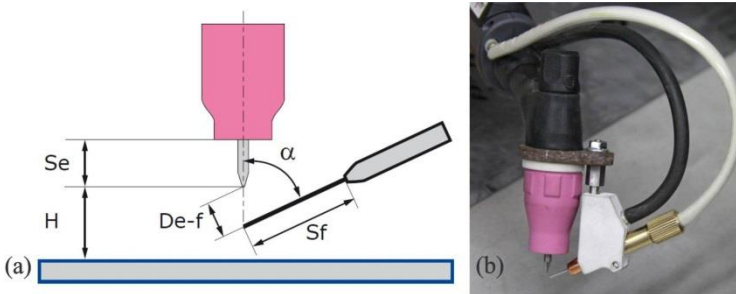


Figura 12. (a) Desenho esquemático das variáveis geométricas de alimentação [31]. (b) Modelo comercial de tocha TIG com alimentação [32].

Na técnica com arame quente existe um pré-aquecimento do metal de adição por efeito Joule, que aproxima sua temperatura da necessária para a fusão. A resistência elétrica do arame é função de seu comprimento e de seu diâmetro, além da resistividade do material utilizado. Cobre e alumínio não são recomendados, uma vez que seria necessária uma alta corrente no arame para gerar um nível de pré-aquecimento significativo, o que resulta em deflexão excessiva do arco. Para contornar este problema, sugere-se o uso de corrente alternada [21]. Lv et al. [33] utilizaram o processo TIG com arame quente para a soldagem de revestimento (*cladding*) e verificaram um aumento da molhabilidade do cordão em comparação com o arame frio. Neste caso, o processo se destaca por permitir a redução do nível de corrente na tocha TIG, já que esta não mais é responsável por conferir todo o calor necessário à fusão do arame. Desta forma, há menor imposição de calor na peça, com conseqüente redução no grau de diluição e manutenção das propriedades anticorrosivas. Shinozake et al. [34] alcançaram uma velocidade de soldagem de 3 m/min ao pré-aquecer o arame, porém, relataram dificuldades como a definição do posicionamento do arame ao ser inserido, assim como a escolha dos parâmetros que resultem em um cordão com a qualidade requerida.

Quando a aplicação não exige elevada taxa de deposição, mas sim penetração total da junta, como durante a execução do passe de raiz, o pré-aquecimento do arame pode ser dispensado. Com isto, o material é adicionado à temperatura ambiente. Pode-

se citar como exemplo o trabalho de Pigozzo [16], no qual verificou-se que o processo é uma alternativa viável para procedimentos de soldagem orbital 360° .

Uma das principais diferenças do processo com arame frio em relação àquele com arame quente remete à posição de entrada na poça. A parte frontal é denominada de frente de fusão, onde acontece a fusão do metal base e do metal de adição. A parte traseira é chamada de frente de solidificação, na qual o metal está no estágio de resfriamento e solidificação [35]. Usualmente, no processo com adição à temperatura ambiente, o arame é inserido na parte frontal da poça e, quando existe pré-aquecimento, na parte traseira. Com o intuito de justificar esta prática, Delgado [1] realizou ensaios em ambas posições relativas arco-aramé e constatou que a alimentação por trás com arame frio cria uma perturbação da poça fundida. Como consequência disto, observou a incidência de defeitos ao longo de toda a extensão do cordão, na forma de sulcos, poros e descontinuidades longitudinais. Tal fato pode ser explicado devido ao arame sólido incidir na região mais fria da poça, em solidificação. O fenômeno descrito não ocorre quando o arame é pré-aquecido, já que, neste caso, a temperatura imposta pelo efeito Joule aumenta a fluidez do material adicionado, facilitando sua fusão.

2.2.1.b Disposição geométrica radial e tangencial

A disposição geométrica do arame exerce influência significativa sobre o processo. Tradicionalmente, utiliza-se a disposição radial em relação ao eixo do eletrodo de tungstênio, de acordo com a Figura 12. No entanto, verificou-se que, ao adicionar o metal de forma tangencial, como mostrado na Figura 13, o arame incide na região de maior temperatura da coluna de plasma [36]. A adição é realizada através do bocal, com um ângulo de 20° em relação ao eletrodo de tungstênio. Esta configuração proporciona um aumento da taxa de fusão, que beneficia as aplicações de revestimento e preenchimento. Além disto, permite a redução das dimensões da tocha, fato importante na soldagem de peças com geometrias complexas [37].

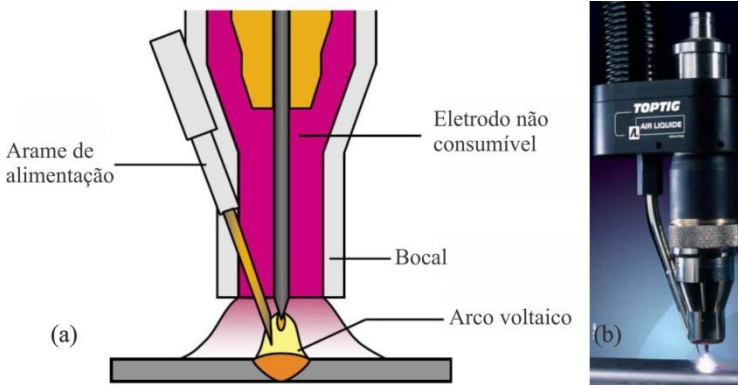


Figura 13. (a) Desenho esquemático do processo com alimentação tangencial. Adaptado de [37]. (b) Modelo comercial de tocha TIG com alimentação tangencial [38].

2.2.1.c Movimentação contínua e dinâmica

Os equipamentos convencionais de soldagem TIG com alimentação automática adotam um padrão contínuo, ou seja, o movimento é realizado em um sentido apenas, com velocidade designada pelo usuário. Na alimentação dinâmica, o usuário determina as velocidades e os tempos de avanço e recuo, que resultam em uma velocidade média positiva (isto é, de avanço). As configurações descritas estão ilustradas esquematicamente na Figura 14.

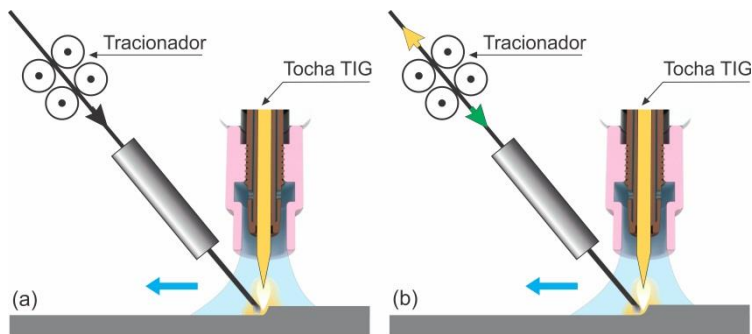


Figura 14. Esquema do movimento. (a) Contínuo. (b) Dinâmico.

Os equipamentos disponíveis no mercado permitem uma oscilação de até 16 Hz (TigSpeed [32]), 15 Hz (TIP TIG [39]) e 10 Hz (Dabber TIG [40]). Neste trabalho, convencionou-se caracterizar como baixa frequência a faixa de valores menores que 2 Hz, já que o processo é similar à soldagem manual. Nesta, o soldador realiza o movimento de avanço da vareta para adicionar material e, em seguida, a retira, de modo a proporcionar melhor absorção de energia do arco pela poça de soldagem. Pode-se dizer que o arame pulsa. Por outro lado, em altos valores de oscilação, o comportamento se assemelha a uma vibração, que contribui para o aumento da velocidade de soldagem [41]. Herbert et al. [42] compararam a soldagem manual com a soldagem semiautomática e alimentação dinâmica em alta frequência na variante *hot wire*. Constataram que o tempo de execução de uma junta de topo em chapa chanfrada de 12,7 mm de espessura, posição vertical com progressão ascendente no processo manual, foi cinco vezes superior ao processo semiautomático. Ensaios destrutivos e não destrutivos atestaram grande semelhança em termos de propriedades mecânicas e qualidade da junta. Apesar disso, verificou-se que a soldagem manual não pode ser substituída em todas as aplicações, uma vez que a tocha semiautomática não se mostrou adequada para o caso de juntas de difícil acesso.

Aplicando-se ao processo com alternância de arame os conceitos da física relativos à cinemática, torna-se possível uma análise detalhada e a obtenção de dados essenciais para o estudo

comparativo das diferentes frequências. A Figura 15 representa o sistema em questão.

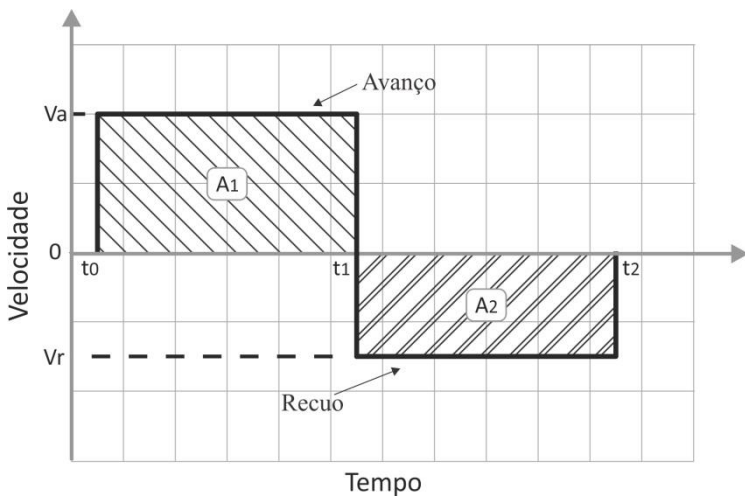


Figura 15. Representação da dinâmica de movimentação do arame.

Quatro variáveis são fundamentais: tempo de avanço (t_a), calculado por $t_1 - t_0$, tempo de recuo (t_r), calculado por $t_2 - t_1$, velocidade de avanço (V_a) e velocidade de recuo (V_r). A velocidade de avanço deve ser superior à de recuo, de modo que a resultante seja uma velocidade positiva. A área abaixo do gráfico indica o deslocamento do arame que avança (A_1) e que recua (A_2). Matematicamente, o deslocamento é determinado segundo a relação apresentada na equação abaixo [43], onde $v(t)$ corresponde à função velocidade.

$$\text{Deslocamento} = \int_{t_0}^{t_2} v(t)dt = A_1 - A_2 \quad \text{Equação 1}$$

É possível calcular a velocidade média resultante dividindo-se o deslocamento resultante ($A_1 - A_2$) pelo tempo total ($t_2 - t_0$).

2.2.2 Transferência metálica e transferência de calor

A possibilidade de contaminação do eletrodo de tungstênio limita a robustez do processo TIG. Para entender melhor esta questão, torna-se necessária uma análise dos modos de transferência metálica presentes. Este estudo também auxilia na avaliação da estabilidade do processo e na interpretação de possíveis defeitos no cordão de solda.

Existem fundamentalmente dois modos: a transferência em ponte (não interrompida) e a transferência intermitente (destacada, goticular ou interrompida). Em ambos os casos, tanto os parâmetros geométricos (ângulo entre a tocha e o arame, e distância eletrodo-peça (DEP)), como os parâmetros do processo (velocidade de alimentação e energia), são decisivos.

A influência da distância entre a ponta do arame e a extremidade do eletrodo no processo TIG com alimentação contínua na versão *cold wire* é mostrada na Figura 16. Esta distância é alterada mediante a modificação do ângulo de alimentação no dispositivo direcionador de arame.

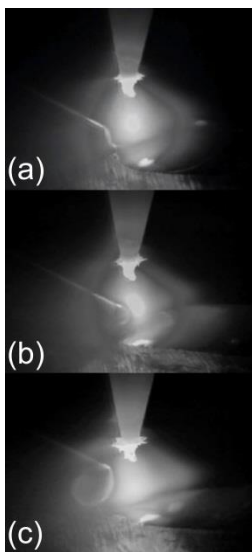


Figura 16. Influência da distância entre a ponta do arame e a extremidade do eletrodo sobre o modo de transferência metálica [16].

Na imagem (a), com o ângulo ajustado em 65° , típico da disposição radial, o material foi inserido diretamente na poça, no modo filamentar. Ao aumentar o ângulo em apenas $1,5^\circ$, o modo de transferência é alterado, fato verificado em (b). Observa-se a formação e o destacamento de uma gota antes de atingir a poça. Por fim, com $68,5^\circ$, tem-se uma transferência intermitente grosseira, exibida em (c). O arco voltaico é formado por um gradiente de temperaturas, e o ângulo determina se o arame entrará em uma região de maior ou de menor temperatura. O perfil da Figura 17 foi obtido numericamente [44] e pode ser utilizado como exemplo. Nota-se que, quando o arame entra com ângulo de 70° , atinge a isoterma de 13917°C , na parte inferior do arco. Porém, quando o arame entra com ângulo de 80° , ele incide no centro do arco, na isoterma de 15823°C . Se a temperatura da isoterma for superior à necessária para o equilíbrio entre alimentação e potência, a transferência metálica se altera para o modo intermitente.

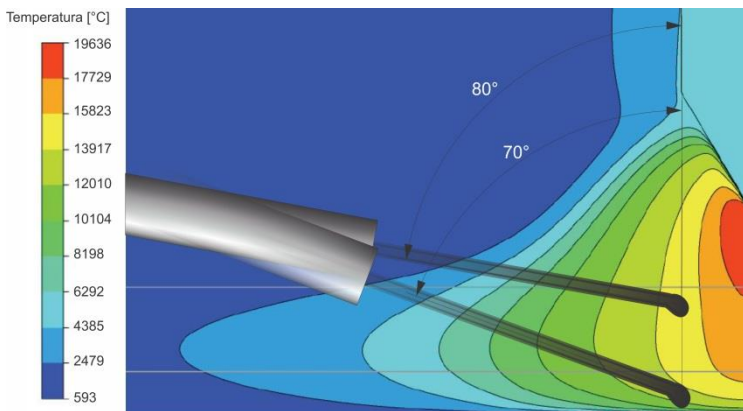


Figura 17. Posição de inserção do arame no arco voltaico em função do ângulo de alimentação. Adaptado de [44].

Esta constatação foi possível uma vez que a DEP manteve-se constante em virtude da utilização do *Arc Voltage Control* (AVC). Este dispositivo garante a manutenção da altura do arco dentro de certas tolerâncias diante de irregularidades, que por sua vez podem induzir uma variação da energia disponível e,

consequentemente, a alteração do estado de equilíbrio característico de um processo estável.

Segundo Shipilov [45], enquanto uma velocidade de alimentação excessiva pode resultar em fusão incompleta do arame e no decorrente surgimento de defeitos no cordão de solda, uma velocidade insuficiente promove a formação de gotas e, portanto, a transferência intermitente. Nesta última situação, o calor fornecido pelo arco impede que o arame chegue à poça de fusão, fazendo com que a gota cresça e se destaque com auxílio da gravidade.

Os modos de transferência em questão apresentam características que podem favorecer ou não o processo. Na transferência em ponte, o arame e a poça de fusão estabelecem um contato contínuo, que é benéfico, principalmente para a soldagem na posição sobre cabeça. Neste caso, a tensão superficial atua de maneira a minimizar a possibilidade de escorrimento, sustentando a poça, o que torna o procedimento menos instável [46]. Quando a velocidade de fusão excede a velocidade de alimentação, a transferência ocorre no modo intermitente. Este, além de perder as vantagens relativas à tensão superficial, é mais propício à formação de respingos e à contaminação do eletrodo de tungstênio, que, caso ocorra, reflete em perdas de produtividade [16].

Com o objetivo de manter a estabilidade do processo, Delgado [1] e Figuerôa et al. [47] sugeriram uma metodologia que utiliza a relação velocidade de arame / potência (v_a/Pot) que garante a transferência em ponte na poça de fusão. O gráfico da Figura 18 exibe uma forte tendência do comportamento linear entre potência do arco e velocidade de arame. Para cada valor de potência desenvolvida no arco voltaico, existe uma condição ideal de estabilidade que permite a fusão contínua.

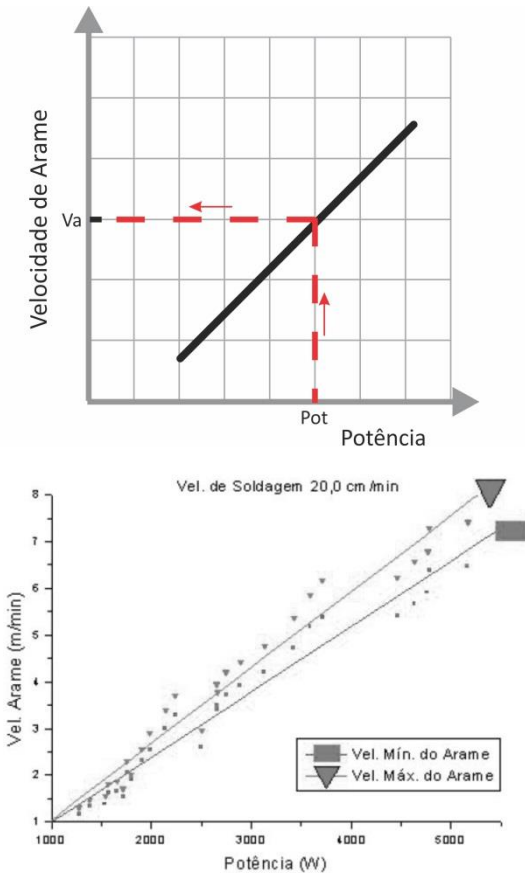


Figura 18. Gráfico de velocidade de alimentação x potência do arco para o processo TIG convencional [1].

Embora seja uma boa estratégia, este princípio demanda a utilização de velocidades de arame elevadas. Em procedimentos de passe de raiz, um processo cujo funcionamento não dependa da relação v_a/Pot é adequado para o aumento da produtividade por intermédio da redução da quantidade de arame empregada, com maior energia destinada à peça e favorecimento da penetração. Desta forma, é possível aumentar a dimensão do “nariz” e reduzir o volume do chanfro para que menos passes sejam necessários durante a etapa de preenchimento.

Para atingir este objetivo, Rudy [48] sugere a alimentação dinâmica. A rápida aproximação do arame em relação à poça de fusão é eficiente para prevenir a formação prematura de gotas. O arame percorre as isoterms com uma velocidade de avanço elevada, retornando em seguida. Isto permite atingir a estabilidade sem a necessidade de elevados valores de velocidade de alimentação. Acrescenta-se a isto uma maior flexibilidade na regulação do ângulo entre a tocha e o arame, além de maior adaptabilidade do processo diante de irregularidades geométricas.

Com base nas equações de Tatman et al. [49], pode-se estimar as parcelas de energia do arco voltaico (Q_{arco}) por unidade de comprimento necessária à fusão do arame (Q_{arame}), perdida para o ambiente (Q_{perdas}) e destinada à peça ($Q_{\text{peça}}$). A Figura 19 apresenta um esquema da soldagem TIG com os respectivos fluxos de calor, sendo V_s a velocidade de soldagem e V_{alim} a velocidade de alimentação do arame.

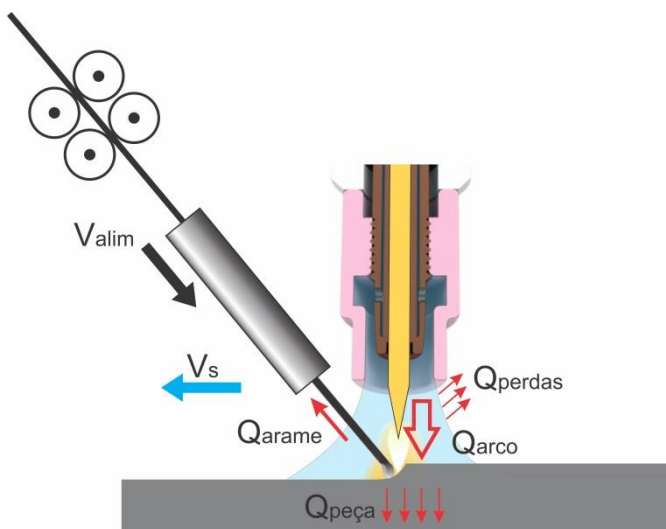


Figura 19. Representação esquemática dos fluxos de calor no processo TIG com adição de material.

Dentre os fatores que influenciam no aumento da penetração, pode-se citar os efeitos térmicos. A energia destinada à peça é calculada subtraindo-se, da energia do arco, as perdas

para o ambiente e a energia necessária à fusão do arame, de acordo com a Equação 2.

$$Q_{peça} = Q_{arco} - Q_{perdas} - Q_{arame} \quad \text{Equação 2}$$

Obtém-se a energia do arco dividindo-se a potência do processo (multiplicação da tensão do arco U_A e corrente do arco I_A) pela velocidade de soldagem, conforme a Equação 3.

$$Q_{arco} = \frac{U_A I_A}{V_s} \quad \text{Equação 3}$$

As perdas são estimadas em função da eficiência do arco (rendimento térmico), que, segundo a literatura, pode variar. Para efeito de simplificação, o valor de 0,85 será adotado [50]. Como o objetivo do cálculo é comparativo, isto não representa um problema. As perdas, portanto, totalizam 15% da energia do arco, de acordo com a Equação 4.

$$Q_{perdas} = 0,15 Q_{arco} \quad \text{Equação 4}$$

Por fim, a energia por unidade de comprimento necessária para elevar a temperatura do metal de adição da temperatura ambiente até a temperatura de fusão é dada pela Equação 5.

$$Q_{arame} = \frac{\tau V_{alim} A_{arame}}{V_s} \quad \text{Equação 5}$$

A variável A_{arame} corresponde à área da seção transversal do arame, e a variável τ , à quantidade de calor por volume, de acordo com a Equação 6.

$$\tau = \rho c \Delta T + \rho L \quad \text{Equação 6}$$

Acima, ρ diz respeito à massa específica do material do arame, c refere-se ao seu calor específico e L corresponde ao seu calor latente de fusão. A diferença de temperatura ΔT é calculada mediante a diferença entre a temperatura de fusão e a temperatura ambiente.

Com as equações acima, pode-se traçar um comparativo entre os processos de alimentação constante e os de alimentação dinâmica. Ao utilizar a alimentação constante, o operador deve respeitar o equilíbrio entre velocidade de arame e potência que resulte em uma transferência metálica em ponte. Por exemplo, para uma corrente de 200 A e uma tensão de 10 V, tem-se uma potência de 2000 W, que, segundo a Figura 18 exige em torno de 2,5 m/min de velocidade de arame. Já na alimentação dinâmica, o usuário determina a quantidade de material necessária para a aplicação, que para o caso pode ser de 0,4 m/min. A Tabela 3 contém as variáveis do processo.

Tabela 3. Variáveis do processo utilizadas para a comparação da energia destinada à peça entre os sistemas com alimentação constante e alimentação dinâmica.

Variáveis do Processo			
Parâmetro	Unidade	Alim. Constante	Alim. Dinâmica
Corrente de soldagem	A	200	200
Tensão	V	10	10
Velocidade de soldagem	cm/min	20	20
Velocidade de arame	m/min	2,5	0,4

A Tabela 4 exhibe as propriedades do arame de aço carbono [51].

Tabela 4. Propriedades do arame utilizadas para a comparação da energia destinada à peça entre os sistemas com alimentação constante e alimentação dinâmica.

Propriedades do Arame	Unidade	Valor
Calor latente de fusão (L)	kJ/kg	230
Calor específico (c)	J/kg °C	486
Massa específica (ρ)	kg/m ³	7850
Temperatura de fusão (Tf)	°C	1500
Temperatura ambiente (Ta)	°C	25
Diâmetro (cálculo da área A_{arame})	mm	1,2

A estimativa da distribuição da energia do arco voltaico com os processos que utilizam alimentação constante e alimentação dinâmica encontra-se na Tabela 5. Nota-se que no processo convencional grande parte da energia, 17,5%, é destinada à fusão do arame, diminuindo assim a energia destinada à peça, e dificultando a obtenção de penetração. Por outro lado,

no processo com alimentação dinâmica, como o usuário verificou que sua aplicação exigia pouco material, a energia destinada à fusão do arame foi de apenas 2,8%. Desta forma, a penetração total da junta é conferida com maior facilidade. A Figura 20 exhibe estes resultados de forma gráfica.

Tabela 5. Estimativa da distribuição de energia.

Energia por comprimento [J/m]	Alim. Constante	Alim. Dinâmica
Q_{arco}	600 (100%)	600 (100%)
Q_{perdas}	90 (15%)	90 (15%)
Q_{arame}	105 (17,5%)	17 (2,8%)
$Q_{\text{peça}}$	405 (67,5%)	493 (82,2%)

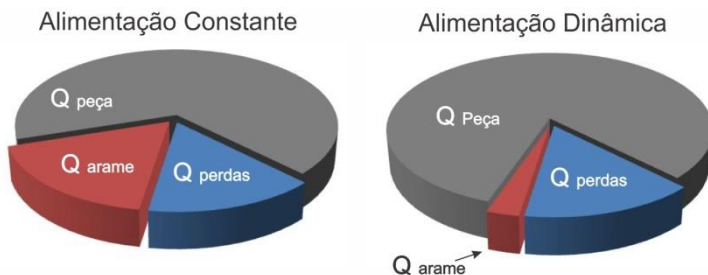


Figura 20. Gráfico comparativo da distribuição de energia total entre o processo com alimentação constante e o processo com alimentação dinâmica.

O perfil transversal das soldas é mostrado na Figura 21. O cordão resultante do processo com alimentação constante apresentou uma geometria inadequada para o primeiro passe de uma aplicação de união. Devido à elevada velocidade de alimentação, a energia no centro do cordão foi absorvida pelo arame, limitando assim a profundidade do metal fundido (0,9 mm). Além disto, o reforço em excesso aumenta a possibilidade de ocorrência de discontinuidades como falta de fusão durante a etapa de preenchimento. Quando a alimentação dinâmica é utilizada, a penetração resultante é significativamente superior (1,7 mm), com perfil mais conveniente para o recebimento dos passes seguintes.

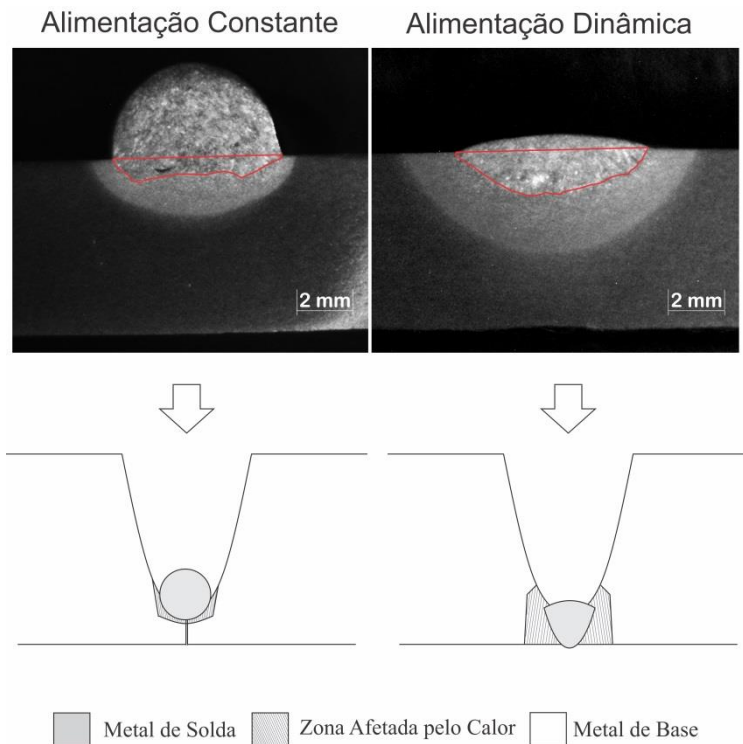


Figura 21. Macrografias transversais dos perfis de penetração e respectiva tendência de comportamento do primeiro passe em um chanfro. Processo com alimentação constante ($V_a = 2,5$ m/min) e com alimentação dinâmica ($V_a = 0,4$ m/min). Corrente de 200 A, tensão de 10 V e velocidade de soldagem de 20 cm/min.

A relevância do equacionamento apresentado reitera que o estudo da transferência de calor é fundamental para a compreensão de como os parâmetros escolhidos influenciam na poça de fusão e, conseqüentemente, na geometria dos cordões produzidos. A modelagem matemática dos fenômenos físicos presentes tem se mostrado uma ferramenta muito útil em virtude de dificuldades associadas à monitoração do escoamento da poça fluida durante a soldagem.

Os modelos desenvolvidos são capazes de prever o perfil de temperatura e de velocidade do fluido após resolver as

equações diferenciais da continuidade, do movimento e da energia. Estas equações, juntamente com suas respectivas condições de contorno, foram propostas com base nos três principais mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Na condução, a transferência acontece das partículas mais energéticas para as menos energéticas, como resultado da presença de um gradiente de temperatura. A convecção ocorre quando um fluido em movimento, a uma dada temperatura, entra em contato com uma superfície sólida com temperatura diferente. A radiação, por sua vez, é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula [52].

A poça de fusão do processo TIG autógeno sofre a ação combinada da força eletromagnética, da gravitacional, de flutuação, da induzida pelo gradiente de tensão superficial e da induzida pelo arrasto do jato de plasma [30]. Cada uma promove um perfil de velocidades que afeta diretamente as características geométricas do cordão. Mediante simulações computacionais, KOU [53] concentrou seu estudo em três delas: a força de flutuação, a eletromagnética e a associada à tensão superficial. Conforme mostrado na Figura 22, verifica-se que a força eletromagnética favorece a penetração, enquanto as outras beneficiam a largura da solda.

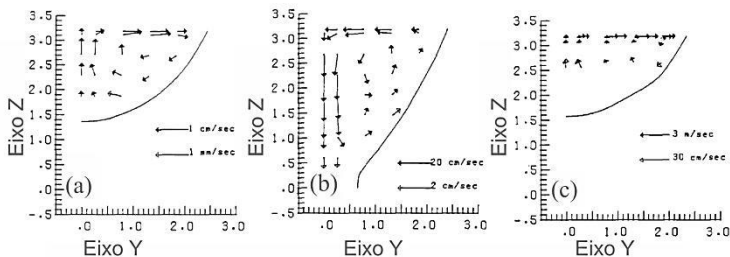


Figura 22. Perfis de velocidades na poça de fusão devido às forças de: (a) Flutuação, (b) Eletromagnética, (c) Associada à tensão superficial. Adaptado de [53].

Esta análise também é válida para constatar que o nível de agitação imposto nem sempre atua de modo a facilitar a liberação de gases, e conseqüentemente reduzir a porosidade. O

sentido do *loop* de circulação pode provocar um movimento descendente, como no caso das forças de flutuação e tensão superficial, ou sentido ascendente, como no caso da força eletromagnética. Na Figura 23, percebe-se que o sentido descendente favorece a retenção dos gases, enquanto que o ascendente, a sua expulsão.

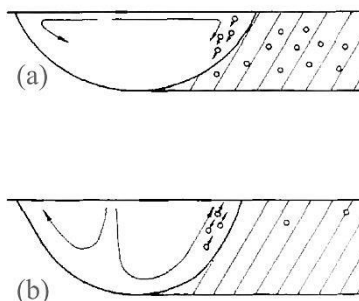


Figura 23. Efeito do perfil de velocidade no fluido sobre a formação de porosidade. (a) Padrão favorável à retenção dos gases. (b) Padrão favorável à liberação dos gases [53].

Além do perfil de velocidade, a solução das equações mencionadas também fornece o gradiente de temperatura na poça de fusão. Um estudo conduzido por Traidia et al. [54] investigou, mediante simulações computacionais, a influência da alimentação de arame na poça de fusão a partir de uma comparação entre o processo TIG autógeno e o processo TIG com alimentação contínua e técnica *cold wire*. Conforme mostrado na Figura 24, o arame absorve calor da poça até a sua fusão, provocando uma redução pontual da temperatura no local onde é inserido. Soma-se a isto o fato do volume da poça aumentar, o que induz a queda da temperatura nas demais regiões.

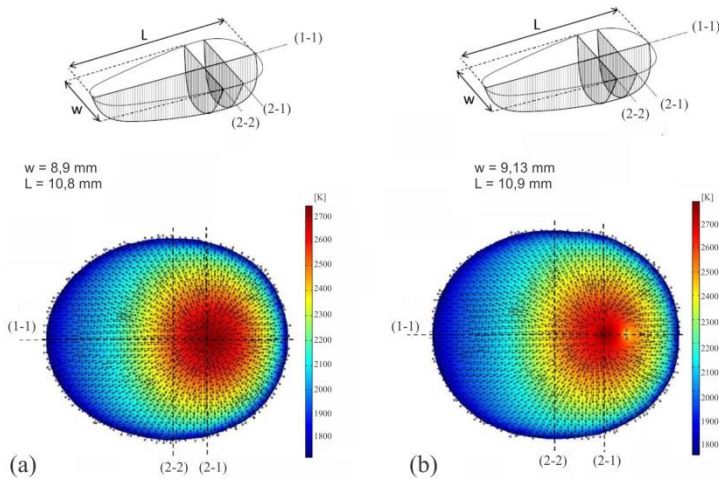


Figura 24. Perfil de temperatura e velocidade na poça de fusão. (a) Processo TIG autógeno. (b) Processo TIG com alimentação contínua *cold wire* e velocidade de alimentação de 1,0 m/min. Corrente de 200 A e velocidade de soldagem de 15 cm/min. Adaptado de [54].

Tokar [35] realizou experimentos com o processo TIG alimentado continuamente, com arame à temperatura ambiente, que comprovaram os efeitos citados. A Figura 25 exibe uma macrografia com uma irregularidade oriunda do resfriamento do metal fundido devido ao arame. A assimetria do cordão pode levar à formação de defeitos como falta de fusão.

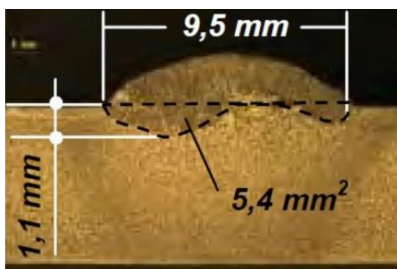


Figura 25. Macrografia do perfil transversal resultante da soldagem com o processo TIG alimentado continuamente *cold wire*. Parâmetros: corrente de 200 A, velocidade de alimentação de 1,75 m/min e velocidade de soldagem de 12 cm/min [35].

No processo TIG manual, o soldador executa um movimento de alternância de aproximação e recuo da vareta. Durante a etapa de aproximação, o material é adicionado na poça de fusão, o que pode levar a uma redução da temperatura neste instante. No entanto, em seguida, o soldador retira a vareta da poça, permitindo uma atuação direta das forças eletromagnéticas, sem perda de calor devido à inserção de material. Desta forma, levanta-se a hipótese de que a probabilidade de formação de irregularidades é reduzida e a penetração aumentada, uma vez que a vareta não permanece dentro da poça durante a maior parte do tempo. Por outro lado, o fato da vareta ser deslocada para fora do arco voltaico faz com que haja transferência de calor com o ambiente, resfriando-a. Assim, para atingir novamente o equilíbrio térmico, quando o soldador adiciona material, a poça tende a resfriar mais do que se ele optasse por manter a vareta dentro da poça sempre.

É importante citar a influência da agitação mecânica do arame na poça. A agitação provocada pode causar uma mudança nos perfis de velocidade apresentados por KOU [53], afetando a formação de poros e as características geométricas do cordão.

O processo TIG com alimentação dinâmica em baixa frequência possui um comportamento análogo ao processo TIG manual, já que o automático nestas condições busca justamente imitar o processo manual.

2.2.2.a Efeitos da pulsação de corrente

A corrente pulsada no processo TIG é regulada a partir de um nível de pulso e um nível de base. Define-se uma forma de onda retangular com parâmetros de corrente e tempo.

Ao intercalar os níveis citados em baixa frequência (até 6 Hz), pode-se distinguir os períodos de dilatação e contração da poça [55]. Estes períodos promovem o controle de sua sustentabilidade em situações de soldagem fora da posição plana [21]. A escolha correta dos parâmetros de pulso pode evitar o escorrimento indesejável da solda, por exemplo, na posição sobre cabeça. Quanto menor a corrente de base, para uma corrente de pulso fixa, maior é o gradiente de temperatura na peça. Isto resulta em maior quantidade de calor dissipado por unidade de tempo, aumentando assim a velocidade de resfriamento da poça fundida. A rápida solidificação favorece a soldagem [1].

Constata-se também benefícios metalúrgicos oriundos da pulsação [56]. Um exemplo está relacionado ao refinamento da microestrutura, que no caso de aço baixo carbono pode ser verificado a partir da presença de ferrita acicular. Tem-se como consequência um aumento da tenacidade da junta soldada [47].

Com relação à geometria, a sobreposição das poças solidificadas gera escamas, cuja densidade é diretamente proporcional à frequência de pulsação. López et al. [57] observaram isso e perceberam também que o perfil de penetração longitudinal não se manteve em um patamar constante, mas variou em virtude da corrente, de acordo com a Figura 26.

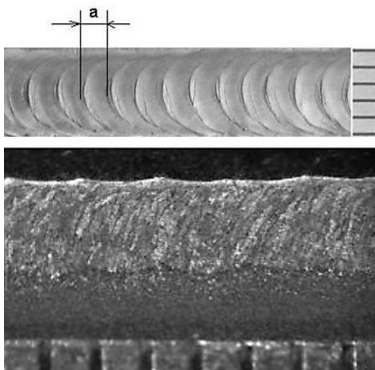


Figura 26. Cordão resultante da soldagem TIG pulsada com alimentação contínua *cold wire*. Parâmetros: frequência de 1,7 Hz, corrente de pulso de 170 A, corrente de base de 50 A, velocidade de alimentação de 3,0 m/min e velocidade de soldagem de 15 cm/min [57].

2.3 SOLDAGEM TIG ORBITAL: CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS

A união de tubos em campo na posição 5G (eixo horizontal) exige um processo de soldagem capaz de garantir os requisitos de qualidade nas posições plana (PP), vertical (PV) e sobre cabeça (SC). Em virtude da impossibilidade de rotação, o procedimento deve ser realizado ao longo do perímetro, deslocando-se o arco de maneira a orbitar a peça, com o auxílio de um manipulador robótico. A Figura 27 exhibe um exemplo de equipamento dedicado a esta aplicação.

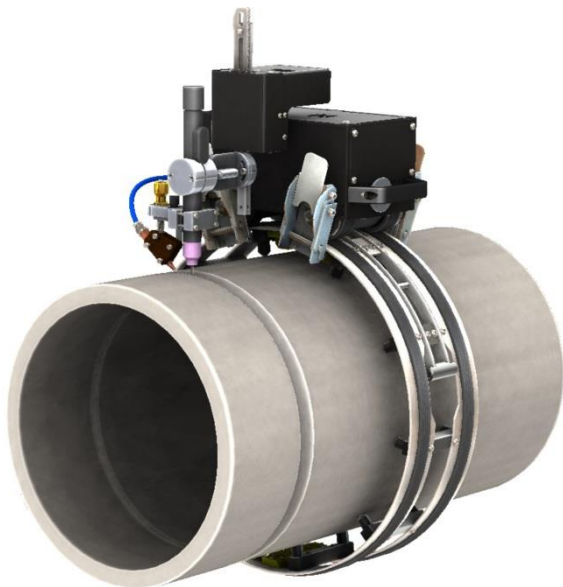


Figura 27. Manipulador robótico utilizado em procedimentos de soldagem orbital.

A representação das posições de soldagem é exibida na Figura 28. De modo a facilitar a identificação das regiões durante a etapa de parametrização, convencionou-se dividir o tubo analogamente aos ponteiros de um relógio.

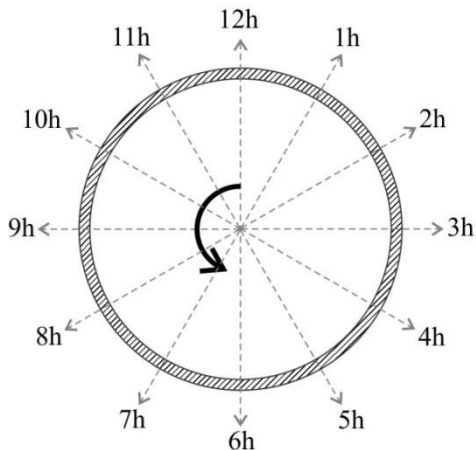


Figura 28. Representação das posições de soldagem orbital.

Apesar de alguns autores [16][31] proporem a equivalência da representação acima nas posições plana, vertical e sobre cabeça, a norma AWS 3.0 [58] utiliza o diagrama da Figura 29 para definir o início e término de cada zona. A relação é exibida na Tabela 6.

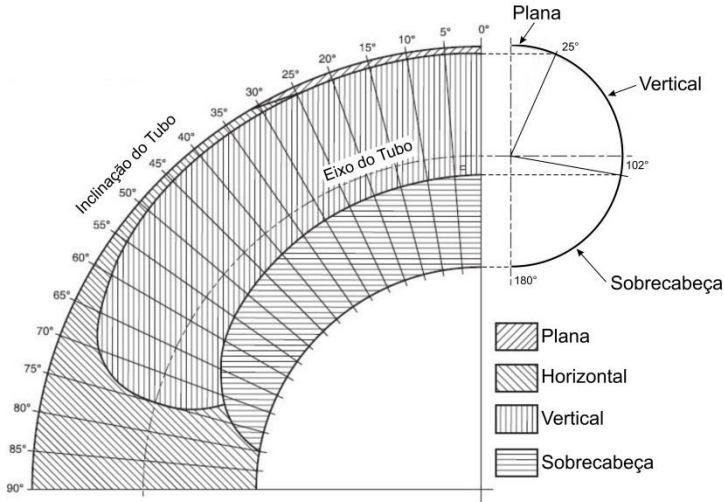


Figura 29. Diagrama de posições de soldagem em tubos. Adaptado de [58].

Tabela 6. Relação de equivalência entre posição horária e posição de soldagem, conforme a norma AWS 3.0 [58].

Posição Horária	Posição de Soldagem
12h	Plana
11h, 10h, 9h, 3h, 2h, 1h	Vertical
8h, 7h, 6h, 5h, 4h	Sobre cabeça

A mudança de posição afeta a dinâmica da poça de fusão e pode resultar em instabilidades no processo. Shirali e Mills [59] abordaram o comportamento das diferentes posições de soldagem sobre as forças eletromagnética, gravitacional e induzida pelo gradiente de tensão superficial, exibido esquematicamente na Figura 30.

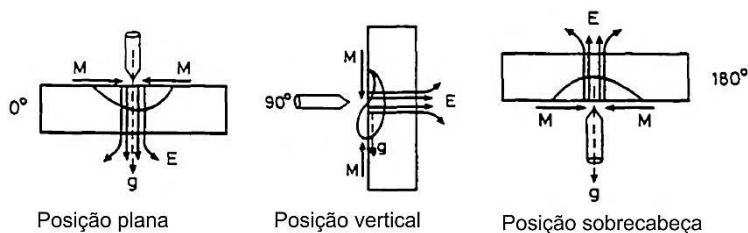


Figura 30. Desenho esquemático representando a influência da posição de soldagem sobre o perfil do cordão de solda, e sobre a força eletromagnética (E), gravitacional (g) e induzida pelo gradiente de tensão superficial (M). Adaptado de [59].

Na posição plana, a força gravitacional e eletromagnética possuem mesma direção e sentido, fato que favorece a penetração. A posição vertical pode apresentar duas progressões: ascendente e descendente. Em ambos os casos, a força eletromagnética favorece a penetração, enquanto a gravitacional provoca o escorrimento do metal. Na progressão ascendente, a poça escoo no sentido contrário à velocidade de soldagem, o que conduz à formação de uma fina camada de metal líquido sob o arco e favorece a penetração em virtude de seu acoplamento direto com o metal de base. No entanto, na progressão descendente, a poça escoo no mesmo sentido da velocidade de soldagem, o que ocasiona um acoplamento com a poça, diminuindo o contato com o metal de base e dificultando a obtenção de penetração. A posição sobre cabeça também apresenta dificuldades relacionadas com a penetração, uma vez que a força gravitacional atua em sentido contrário à força eletromagnética. A tensão superficial tende a sustentar o metal líquido. Em termos operacionais, sugere-se manter a poça pequena e estabelecer uma situação de equilíbrio para impedir instabilidades. O controle da sustentação, conforme comentado no item 2.2.2.a, pode ser alcançado utilizando-se a pulsação de corrente em baixa frequência [18][35][47]. A Figura 31 exibe as imagens obtidas após a filmagem de soldas de deposição com o processo TIG orbital nas posições analisadas acima.

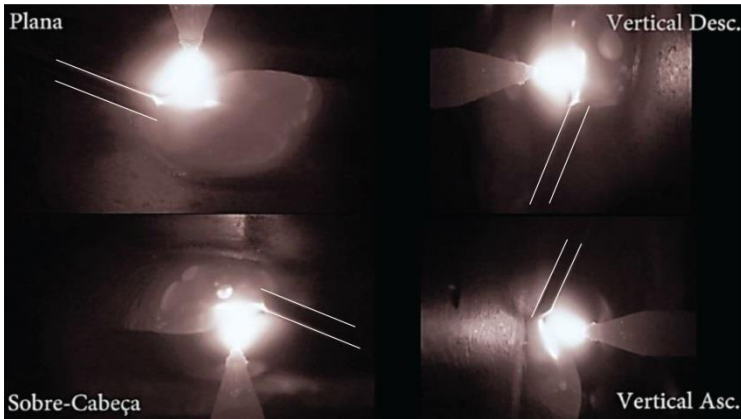


Figura 31. Imagens obtidas após a filmagem das quatro posições de soldagem analisadas [47].

Uma vez que o comportamento da poça de soldagem varia em função da posição, é usual dividir o tubo em setores formados por um conjunto de posições horárias. Com isso, o operador, após encontrar os parâmetros apropriados em cada setor, pode programar o manipulador robótico para que este os altere durante o procedimento.

2.3.1 Passe de raiz

O passe de raiz corresponde ao primeiro passe de um procedimento de soldagem. Possui grande importância em relação à produção, uma vez que determina a velocidade com a qual a linha dutoviária é construída. A detecção de defeitos neste passe exige a retirada de todo o material depositado para a realização do reparo, o que origina um custo adicional e atrasa o projeto [18].

A complexidade de execução da raiz possui diversas causas. O requisito essencial é o de conferir a penetração total ao longo da junta. Utilizando-se de sua habilidade para controlar a poça de fusão, em procedimentos manuais, o soldador garante a penetração ao manipular a fonte de calor e a quantidade de material adicionado. Em alguns casos, a alimentação é feita adicionando-se material pelo lado oposto em relação ao arco, ou seja, por dentro do tubo. Quando se opta pela mecanização, o

operador utiliza os parâmetros mais adequados para cada posição. Portanto, existe a dificuldade de encontrar o melhor ponto entre a situação de fusão completa e a energia máxima para evitar a ocorrência de perfuração. Pode-se citar também que o primeiro passe está em contato direto com o fluido a ser transportado, fato que intensifica o risco de corrosão. Além disto, o acesso para a soldagem é mais difícil que os passes de preenchimento, o que contribui para a maior incidência de defeitos. Estes, por sua vez, atuam como concentradores de tensões e são relevantes diante da maior susceptibilidade à tensão residual [17].

Desta forma, os parâmetros do processo devem ser selecionados visando-se a ausência de defeitos e também de características geométricas homogêneas, com a garantia de penetração total. Com isto, as propriedades mecânicas desejadas são asseguradas por possibilitar que a estrutura atenda à transferência de carga prevista [60].

2.3.2 Tecnologia existente relativa aos processos a arco voltaico

Os processos atuais disponíveis para a execução do passe de raiz mecanizado possuem elevado nível tecnológico e foram desenvolvidos levando-se em consideração os critérios previstos nas normas, de forma a propiciar o aumento da produtividade. Apesar disto, o processo com eletrodo revestido e TIG manual, que se caracterizam por serem de baixa produtividade, ainda permanecem como escolhas mais comuns no Brasil. No caso do eletrodo revestido, o fator limitante diz respeito às paradas para troca de eletrodo e à remoção de escória. No TIG manual, relaciona-se à baixa velocidade de soldagem.

O desconhecimento em relação a outras opções e a falta de interação entre o soldador e o engenheiro são apontados como razões para os processos acima serem preferidos, apesar das desvantagens [61]. As versões apresentadas nos tópicos abaixo constituem alternativas que oferecem a possibilidade de serem implementadas a partir da mecanização.

2.3.2.a Versões do processo MIG/MAG aplicadas ao passe de raiz

O processo MIG/MAG é um dos mais utilizados na indústria por oferecer um aumento na produtividade em decorrência de seu elevado fator de trabalho, flexibilidade e facilidade de mecanização.

A versão convencional utiliza uma fonte com característica estática do tipo tensão constante. Logo, a corrente é regulada indiretamente mediante a velocidade de alimentação de arame. A atuação indireta não é vantajosa para aplicação em um passe de raiz devido à variação da corrente média quando a tocha se desloca lateralmente à junta, ou como consequência da variação da distância do bico de contato peça (DBCP). É importante ressaltar que a corrente é a variável de influência determinante para a solda [17]. A transferência metálica é consequência da tensão e da velocidade de alimentação. Com isto, a gota pode ser transferida em curto-circuito ou em voo livre. Aplicações de soldagem fora da posição plana são normalmente realizadas com o modo de transferência por curto-circuito devido à menor potência do arco e redução da tendência de escorrimento da poça. No entanto, neste caso, o processo demonstra grande propensão a respingos, que prejudicam a estabilidade, geram fumos e afetam o resultado final.

A proposta de conceber, em uma fonte de característica estática de corrente constante, um formato de onda de corrente que evite as dificuldades relatadas, tem se mostrado apropriada. Pode-se citar as versões STT (*Surface Tension Transfer*) da fabricante Lincoln Electric e CCC (Curto-Circuito Controlado) da IMC Soldagem como exemplos de tecnologias que utilizam este método. O controle do processo ocorre a partir da monitoração e realimentação de sinais que traduzem sua situação momentânea, como a resistência entre o bico de contato e a peça. O sistema atua com o intuito de manter a estabilidade [62]. Também está disponível no mercado a versão CMT (*Cold Metal Transfer*) da empresa Fronius, que promove benefício similar, porém, combina o formato de onda da corrente com um sistema eletromecânico. O movimento reversível do arame em frequências de até 70 Hz [63] auxilia o destacamento da gota, ou seja, a transferência é consequência da reversão do arame e minimiza a necessidade de forças eletromagnéticas.

Sartori [17] comprovou que as versões CCC e CMT são viáveis para a execução do passe de raiz em soldagem orbital de um tubo com geometria de chanfro tipo “U” e 12,7 mm de espessura. Os resultados da soldagem com estes dois processos em um tubo com geometria de chanfro “V” e espessura de 12,7 mm indicaram que apenas a versão CCC atendeu aos critérios previstos. Nas amostras soldadas com a versão CMT, foi identificado um poro no centro do metal fundido e a falta de fusão em um dos flancos do chanfro. Tal fato é atribuído ao tempo em curto ser relativamente maior em relação ao CCC, o que tende a deixar a poça mais fria.

Embora o processo seja factível, deve-se atentar à impossibilidade de dissociação entre velocidade de alimentação de arame e potência do arco. Parte da energia é destinada à fusão do arame e a outra, para a fusão do metal de base. Isto conduz à utilização de velocidades de alimentação elevadas para aplicações como a execução do passe de raiz, quando o requisito principal é a penetração. O aumento da profundidade do cordão é regido pelo aumento da energia do arco, que por sua vez exige o aumento da velocidade de alimentação de arame para a obtenção de estabilidade. A soldagem orbital dos tubos é usualmente executada em duas partes de 180°.

2.3.2.b Versão do processo TIG aplicada ao passe de raiz

Quando utilizado para o propósito de execução da raiz, o processo TIG convencional (*cold wire*) é capaz de garantir a qualidade necessária, respeitando os requisitos presentes nas normas. Pode ser regulado com corrente contínua constante ou pulsada, em função da posição. Pigozzo [16] confirmou a efetividade do processo para o passe de raiz em soldagem orbital realizando o procedimento em órbita completa.

Apesar da ausência de respingos, fumos e escória, ainda possui a limitação de baixa velocidade de soldagem se comparado com o MIG/MAG. Além disto, a estabilidade do processo é regida pela transferência em ponte, e depende de uma velocidade de alimentação adequada para uma determinada potência [47]. Esta velocidade de alimentação muitas vezes adiciona uma quantidade de material desnecessária para a formação da raiz, fato que atua contrariamente à produtividade. Portanto, no processo TIG com adição de material, também não é

possível dissociar a velocidade de alimentação do arame da potência do arco. Um processo autógeno seria ideal em termos de produtividade, porém não atende aos requisitos, conforme abordado no item 2.2.1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente tópico aborda a metodologia adotada para realização deste trabalho, assim como os materiais e equipamentos utilizados.

A estrutura de apresentação foi dividida em duas frentes. A primeira delas diz respeito à caracterização do sistema de alimentação dinâmica em baixa frequência, enquanto a segunda é destinada aos ensaios de soldagem orbital, orientados ao aumento da produtividade.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

A etapa inicial do trabalho consistiu no estudo do comportamento da poça de soldagem, da transferência metálica e da geometria do cordão quando o arame oscila em baixa frequência. A seguir é descrita a metodologia de ensaios que possibilitou a comparação dos resultados entre os cordões obtidos com a soldagem autógena, com alimentação contínua e em baixa frequência (1 Hz e 2 Hz).

3.1.1 Bancada experimental

Os ensaios de caracterização foram executados na bancada experimental da Figura 32, constituída por um cabeçote alimentador projetado para atuar com oscilação de arame em baixa frequência com seu respectivo controlador, uma unidade portátil de refrigeração, uma fonte de energia, um manipulador robótico acoplado a uma tocha TIG, juntamente à sua Interface Homem-Máquina (IHM), e um cilindro de gás.



Figura 32. Bancada de ensaios: (a) cabeçote alimentador de arame, (b) unidade portátil de refrigeração, (c) fonte de energia, (d) manipulador robótico e tocha TIG, (e) cilindro de gás, (f) controlador do cabeçote alimentador e IHM.

O cabeçote alimentador é programado para inverter o sentido do motor elétrico e realizar um movimento recíproco dos roletes, mantendo fixo o conjunto tracionador de arame. Isto pode ser verificado na Figura 33 (a). Esta configuração foi implementada no protótipo da empresa IMC, conhecido como Sistema Tracionador de Arame (STA), e foi utilizado no presente trabalho. A Figura 33 (b) apresenta o visor do equipamento, que permite a especificação das quatro variáveis fundamentais: velocidade de avanço (V_a), velocidade de recuo (V_r), tempo de avanço (t_a) e tempo de recuo (t_r). O usuário determina o instante apropriado para o início da alimentação, assim como o seu término, acionando manualmente um botão. O arame é guiado através de um duto flexível, denominado conduíte, desde o cabeçote alimentador até a poça de fusão.

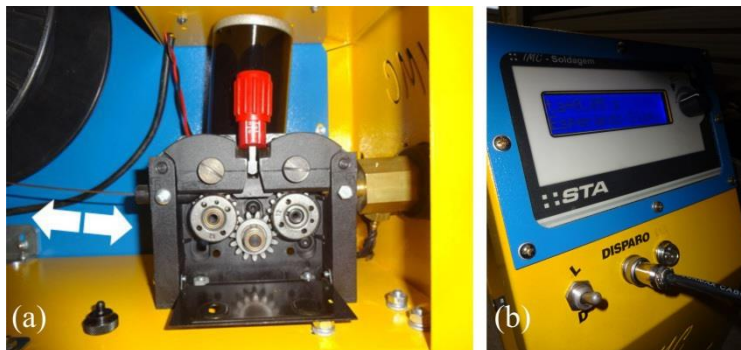


Figura 33. Sistema Tracionador de Arame (STA). (a) Movimento dos roletes. (b) Visor.

A tocha TIG empregada é do fabricante ABICOR BINZEL, modelo AUT – WIG 400 W, refrigerada a água e com capacidade de corrente de até 400 A. Além disto, suporta eletrodos com diâmetro entre 0,5 e 4,0 mm. O eletrodo possui designação AWS EWTH-2, dopado com 2% de tório e diâmetro de 1/8” (3,2 mm). O bocal empregado é de número 11. Utilizou-se a polaridade negativa da fonte, em função do material a ser soldado ser aço. A Figura 34 exhibe a configuração da tocha e do direcionador de arame, disposto radialmente com ângulo de alimentação α . Cabe ressaltar que o direcionador foi desenvolvido pelo LABSOLDA e permite que o operador ajuste o ângulo de alimentação durante a soldagem, de modo a encontrar uma posição de inserção que resulte em um processo estável.

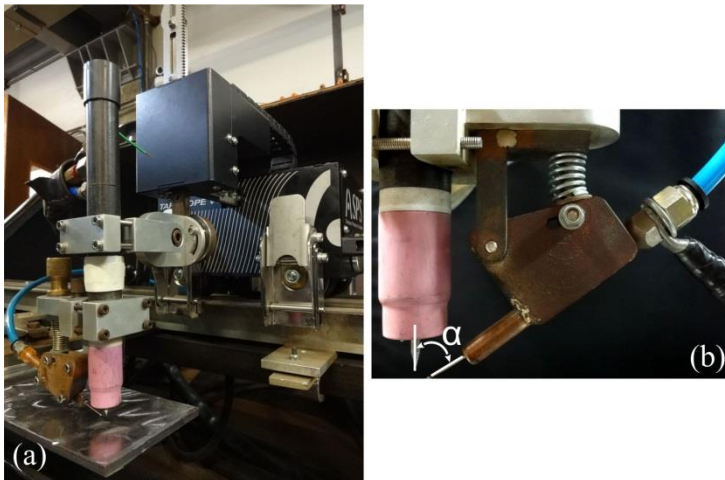


Figura 34. (a) Conjunto manipulador robótico, tocha TIG e direcionador de arame. (b) Posição de inserção de arame em relação à tocha.

O sistema de refrigeração de tocha, modelo UPR 7500 do fabricante IMC, é independente da fonte e do cabeçote alimentador e possui vazão máxima de 10 L/min de água recirculada. A fonte de energia selecionada foi a multiprocessos *Digiplus A7*, também da IMC. Este equipamento está habilitado para a utilização de processos MIG/MAG, TIG, Plasma, Eletrodo Revestido e Arco Submerso, com faixa de operação de corrente entre 5 e 450 A. O cilindro de gás em questão contém Argônio puro (99,9% de pureza).

Para a programação da trajetória de soldagem, utilizou-se o manipulador robótico Tartílope V4, do fabricante SPS, posicionado sobre um trilho. Este sistema possui três eixos de deslocamento (x,y e z), com possibilidade de adição de um eixo angular, caso necessário. Uma IHM auxilia o operador a posicionar e acionar dispositivos complementares como o *Arc Voltage Control (AVC)*.

O AVC é requisitado em situações em que o corpo de prova possui irregularidades. No processo TIG, a fonte de energia possui característica estática do tipo corrente constante. Logo, a tensão é função principalmente do comprimento do arco que, se não for controlado, implicará em variação da energia entregue à poça. Isto pode ocasionar instabilidades na transferência metálica,

além de afetar as características geométricas do cordão. O usuário deve definir uma tensão de referência equivalente à DEP desejada. Assim, antes de soldar, recomenda-se a monitoração do sinal de tensão na tocha (com o uso de sistemas de aquisição de dados) e no Tartílope, a fim de identificar possíveis erros sistemáticos.

3.1.2 Corpos de prova e material de adição

Foi executado um procedimento de simples deposição sobre chapas de aço ao carbono, similar ao SAE 1020, com 250 mm de comprimento, 100 mm de largura e 6,35 mm de espessura. A composição foi verificada com espectrometria de emissão óptica. O arame, também de aço carbono e diâmetro de 1,2 mm, possuía designação ER 70S-6. A Tabela 7 exhibe os percentuais dos elementos químicos presentes. As chapas foram previamente limpas e esmerilhadas com o objetivo de remover resíduos e óxidos. Registrou-se o peso da bobina em 12,3 kg.

Tabela 7. Composição química do metal de base e do arame de adição (%.p).

Chapa	C	Mn	Si	P	S
Metal de base	0,178	0,777	0,148	0,0204	0,0108
Arame de adição	0,06-0,15	1,4-1,85	0,8-1,15	0,025 máx	0,035 máx
Chapa	Ni	Cr	Mo	V	Cu
Metal de base	-	0,0050	-	0,0016	0,0058
Arame de adição	-	-	-	-	0,5 máx

3.1.3 Parâmetros de soldagem

A soldagem foi realizada na posição plana, com corrente contínua e constante, além dos demais parâmetros elétricos exibidos na Tabela 8. O AVC foi acionado na IHM do Tartílope, para assegurar o mesmo comprimento de arco. Como não houve pré-aquecimento do arame, a alimentação ocorreu na parte dianteira da poça.

Tabela 8. Parâmetros elétricos regulados nos ensaios de caracterização.

Parâmetros Elétricos Regulados		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem	A	200
Velocidade de soldagem	cm/min	15
Tensão AVC	V	11,5

Juntamente aos parâmetros elétricos, o processo também demanda parâmetros físicos, que estão especificados na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros físicos referentes aos ensaios de caracterização.

Parâmetros físicos		
Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	10
Saída do arame (<i>stick out</i>)	mm	30
Ângulo de ponta	Graus (°)	30
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	70
Vazão do gás de proteção	L/min	12

Por fim, regulou-se os parâmetros de alimentação de acordo com a Tabela 10. Em todas as situações, a velocidade de alimentação média resultante foi de 0,50 m/min. O rolete de pressão do tracionador foi posicionado na indicação de 1. Os deslocamentos, juntamente com as velocidades calculadas com base no gráfico ideal da Figura 15, encontram-se nas Tabela 11 e Tabela 12, respectivamente. Foram analisadas três amostras para cada situação, resfriando-se a chapa antes de iniciar.

Tabela 10. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador.

Parâmetros de Alimentação Regulados						
Frequência [Hz]	Va [m/min]	Va [mm/s]	Vr [m/min]	Vr [mm/s]	ta [s]	tr [s]
0	0,50	8,33	0	0,00	0,00	0,00
1	6,00	100,00	5,00	83,33	0,50	0,50
2	6,00	100,00	5,00	83,33	0,25	0,25

Tabela 11. Deslocamento ideal calculado com base nos parâmetros especificados.

Deslocamento Ideal Calculado				
Frequência [Hz]	Período Analisado [s]	Deslocamento Avanço [mm]	Deslocamento Recuo [mm]	Deslocamento Resultante [mm]
0	1,00	8,33	0,00	8,33
1	1,00	50,00	41,67	8,33
2	0,50	25,00	20,83	4,16

Tabela 12. Velocidade ideal calculada com base nos parâmetros especificados.

Velocidade Ideal Calculada				
Frequência [Hz]	Deslocamento Resultante [mm]	Período Analisado [s]	Velocidade média Resultante [mm/s]	Velocidade média Resultante [m/min]
0	8,33	1,00	8,33	0,50
1	8,33	1,00	8,33	0,50
2	4,16	0,50	8,33	0,50

Conforme mostrado, além da velocidade resultante ser a mesma, também foram mantidas as velocidades dos patamares de avanço e recuo.

3.1.4 Análise macrográfica e avaliação das características geométricas

Após soldados, os corpos de prova foram cortados nas direções transversal e longitudinal. Em seguida, preparou-se metalograficamente as amostras com lixas de granulação 80, 320, 400, 600 e 1200, além de alumina $1,0 \mu$ para polimento. O ataque químico empregado consistiu em Nital 10% (90% álcool etílico absoluto e 10% ácido nítrico em volume), durante 7 s. Com um estereoscópio *OPTON* e ampliação de 10x, foram avaliadas as características geométricas de penetração e largura dos cordões, conforme a Figura 35. Todas as amostras passaram por medições dimensionais do perfil geométrico do metal fundido, realizadas com o software de análise de imagens *Image J*.

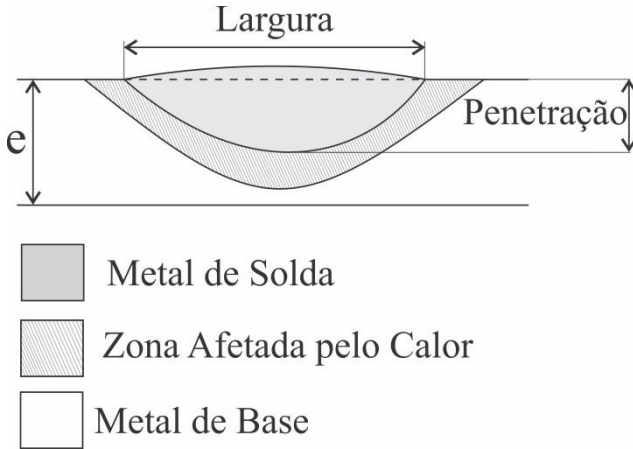


Figura 35. Representação esquemática da seção transversal e definições geométricas.

3.1.5 Monitoração

O presente tópico apresenta os equipamentos utilizados para monitoração do processo. São abordados o sistema de aquisição de dados, a câmera de filmagem em alta velocidade e a câmera termográfica.

3.1.5.a Sistema de aquisição de dados

Os sinais de corrente, tensão e velocidade de arame foram monitorados com o Sistema de Aquisição Portátil (SAP), do fabricante IMC. Este sistema realiza a aquisição dos sinais em frequência de 5000 Hz. Os dados obtidos são dispostos em gráficos e histogramas, o que torna possível a análise detalhada.

3.1.5.b Filmagem em alta velocidade: oscilação do arame e transferência metálica

A câmera de alta velocidade *IDT MotionPro Y4-S2* possibilitou a monitoração da oscilação do arame e da transferência metálica.

A alternância dos movimentos de avanço e recuo do arame foi verificada conforme a configuração da Figura 36. Buscou-se

manter a mesma disposição do condúite utilizada durante a soldagem. Um plano de fundo com papel milimetrado foi instalado como referência de escala.

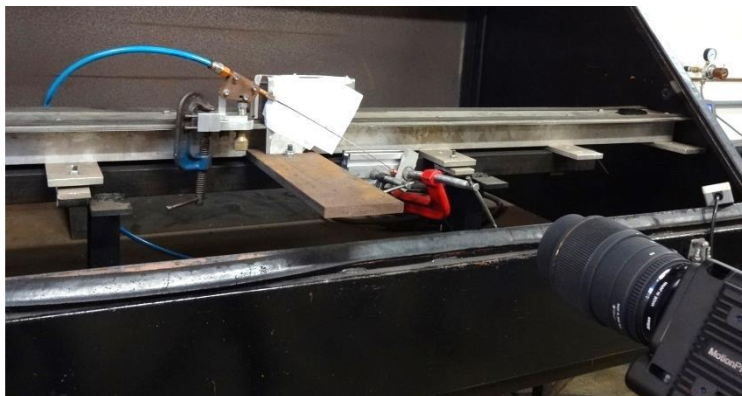


Figura 36. Configuração utilizada para a medição do deslocamento.

Os parâmetros ajustados no visor do cabeçote STA foram os mesmos da Tabela 10. A Tabela 13 contém as variáveis reguladas na câmara.

Tabela 13. Parâmetros regulados na câmara de alta velocidade para a monitoração da oscilação do arame.

Frequência [quadros/s]	200
Tempo de Exposição [μ s]	500
Filtro	Ultra Violeta
Resolução [pixels]	1016 x 360
Iluminação – Potência[W]	Fresnel - 1000 W

Antes de filmar, marcou-se o arame para facilitar a identificação dos pontos de início e término do movimento. A filmagem foi então executada durante 15 s. Selecionou-se três quadros, conforme mostrado na Figura 37. O primeiro deles corresponde ao início do avanço, o segundo, ao término do avanço e início do recuo e, o último, ao término do recuo.

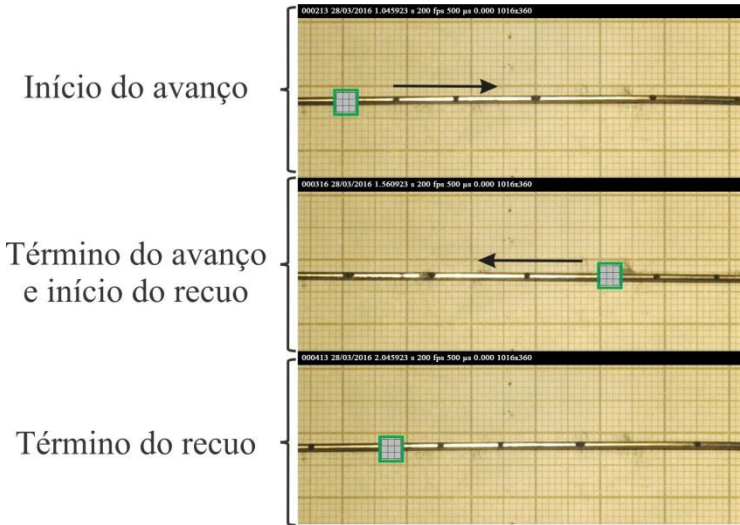


Figura 37. Quadros selecionados para a medição dos movimentos de avanço e recuo.

Com os recursos do software *CorelDRAW*, foi possível ampliar a imagem e dividir a escala milimetrada em dez vezes, de acordo com a Figura 38. Desta forma, a menor divisão de escala para o deslocamento equivale a 0,1 mm, valor utilizado como resolução. No caso do tempo, a resolução é dada pelo incremento digital, obtido a partir do intervalo entre quadros. Este valor é de 0,005 s.

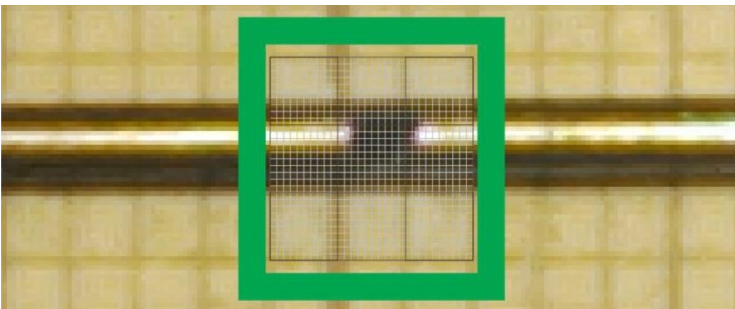


Figura 38. Divisão da escala milimetrada.

Os períodos correspondem a 1,0 s para as frequências de 0 Hz e 1 Hz, e 0,5 s para a frequência de 2 Hz. Dez amostras foram analisadas para cada situação, calculando-se a média dos deslocamentos de avanço, recuo e resultante. A velocidade média resultante foi obtida dividindo-se o deslocamento resultante pelo tempo de um período. O procedimento de cálculo da incerteza expandida foi baseado na metodologia apresentada por Gonçalves Jr. e Sousa [64]. Considerou-se o mensurando como variável, com duas fontes de incerteza. A primeira delas diz respeito à repetitividade, que está associada ao desvio padrão amostral e é consequência das medições repetidas não mostrarem sempre o mesmo valor. A segunda relaciona-se à resolução, que corresponde à menor divisão da escala ou ao incremento digital, e é consequência de arredondamentos. Este procedimento está especificado no Apêndice A. A medição efetuada foi utilizada como referência para a validação do novo transdutor de velocidade desenvolvido, dedicado aos processos com alimentação dinâmica.

A filmagem em alta velocidade também é recomendada para a monitoração dos modos de transferência metálica. A Figura 39 exibe a bancada experimental destinada a este estudo. Optou-se por movimentar o corpo de prova com o robô antropomórfico *MOTOMAN* UP6, enquanto a tocha era mantida em um ponto fixo. Como o foco é mantido, torna-se mais fácil a obtenção de resultados satisfatórios. Os parâmetros regulados na câmera são mostrados na Tabela 14.



Figura 39. Configuração utilizada para monitoração com filmagem em alta velocidade durante a soldagem.

Tabela 14. Parâmetros regulados na câmera de alta velocidade para a monitoração da transferência metálica.

Frequência [quadros/s]	250
Tempo de Exposição [μ s]	5
Filtro	Ultra Violeta
Resolução [pixels]	1016 x 320
Iluminação – LASER – Tempo de Exposição [μ s]	5
Taxa de aquisição [kHz] – sinais	25

Um AVC externo foi adicionado ao sistema para manter a altura do arco constante. Investigou-se o comportamento do processo com um ângulo de alimentação de 70° , e com um ângulo de 80° . Isto permitiu variar o ponto de inserção do arame na poça. Os demais parâmetros consistem nos mesmos especificados no item 3.1.3.

3.1.5.c Filmagem termográfica

O estudo da poça de fusão requer uma ferramenta capaz de identificar os gradientes térmicos, ou seja, capaz de perceber a mudança gradual e contínua de temperaturas em função da posição a partir de uma fonte de calor. A câmera termográfica constitui o equipamento mais adequado para esta finalidade, uma vez que converte a radiação infravermelha invisível em uma imagem térmica visível.

A configuração da montagem é mostrada na Figura 40 (a). Foi apontada para o lado oposto soldado e posicionada perpendicularmente à chapa uma câmera FLIR SC 7000. Antes de iniciar a monitoração, o sistema foi calibrado para a obtenção do valor da emissividade do material.

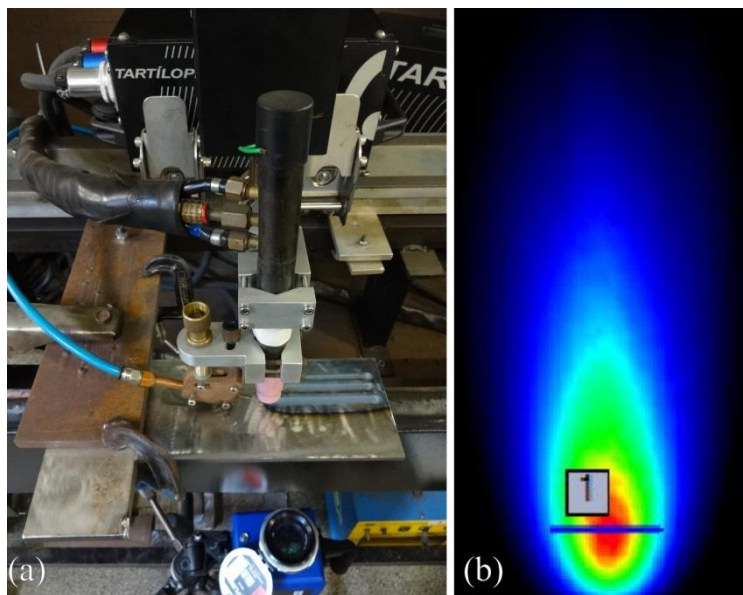


Figura 40. Configuração utilizada para monitoração com filmagem termográfica durante a soldagem. (a) Bancada experimental. (b) Medição da temperatura máxima da poça.

Os parâmetros regulados na câmera constam na Tabela 15, enquanto os parâmetros de soldagem consistem nos mesmos especificados no item 3.1.3.

Tabela 15. Parâmetros regulados na câmera termográfica.

Emissividade do material ϵ	0,82
Escala [°C]	300 a 1500
Transmissividade	97%

Cada situação de soldagem foi executada três vezes, resfriando-se os corpos de prova antes de iniciar. Analisou-se as imagens com o software FLIR ALTAIR, após traçar uma linha sobre a área de maior temperatura, conforme a Figura 40. Os gradientes de temperatura obtidos foram comparados nas diferentes condições atentando-se à localização dos cordões nas chapas, que foi mantida a mesma.

3.1.6 Necessidades tecnológicas levantadas: desenvolvimento de um sistema de medição da velocidade de arame dedicado aos processos com alimentação dinâmica

A etapa de parametrização do processo com alimentação dinâmica exige que o usuário analise o comportamento do movimento do arame, que é mensurado com um transdutor de velocidade. Com esta informação é possível certificar se a velocidade regulada foi respeitada, além de identificar as causas de problemas que comprometam a alimentação e, consequentemente, a estabilidade. No entanto, os transdutores disponíveis no mercado não foram projetados para esta aplicação. Em sua maioria, exibem apenas a velocidade instantânea em um dispositivo mostrador, de acordo com a Figura 41.



Figura 41. Exemplos de dispositivos para a medição da velocidade de arame disponíveis no mercado [65][66].

Os mais sofisticados possuem um dispositivo registrador, que incluem o gráfico de velocidade x tempo, mas não respeitam o princípio físico. A Figura 42 ilustra este problema. Portanto, a utilização destes sistemas para a aquisição da velocidade, quando o arame oscila, induz à obtenção de conclusões inconsistentes.

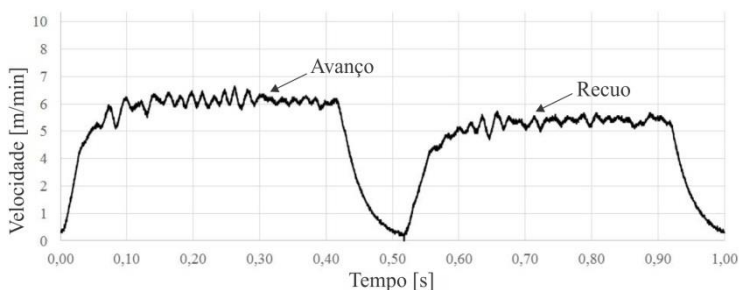


Figura 42. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com um transdutor comercial. Seu funcionamento é descrito por Delgado [1], que estudou o processo TIG convencional com velocidade de alimentação constante. Frequência de oscilação de 1 Hz.

Duas abordagens são recomendadas para a solução. A primeira delas diz respeito à utilização de sensores ópticos, com funcionamento análogo ao de um periférico indicador do tipo “mouse óptico”. Sua principal vantagem reside na possibilidade

de monitorar a velocidade de arame sem estar em contato com o mesmo. Contudo, estudos coordenados por Kamphuis [67] apontam que a utilização deste tipo de sistema pode resultar em elevada incerteza associada à repetitividade, em decorrência de perda de dados durante o processamento. A segunda abordagem envolve transdutores do tipo encoder. Estes são capazes de converter o movimento linear em pulsos elétricos, com frequência proporcional à velocidade [68]. Trata-se de um equipamento mais confiável devido à sua simplicidade, com menor custo de implementação. O tópico a seguir apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de medição associada a um transdutor, fundamentado na segunda abordagem. O objetivo consiste em conceber um equipamento dedicado à monitoração do processo TIG com alimentação dinâmica em baixa frequência, capaz de atender às aplicações presentes na indústria.

3.1.6.a Sistema de medição

O dispositivo dedicado à monitoração da velocidade de arame é composto por três módulos, exibidos esquematicamente na Figura 43.

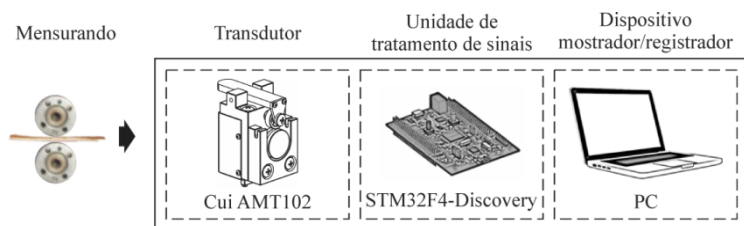


Figura 43. Módulos funcionais do sistema de medição.

O primeiro módulo corresponde ao transdutor, que está em contato direto com a grandeza física submetida à medição. Foi selecionado um encoder incremental com o intuito de obter tanto o valor absoluto quanto o sentido da velocidade. A Figura 44 exhibe as características construtivas de um encoder, que é formado por um ou mais pares de LEDs emissores e receptores, e por um disco com perfurações equidistantes.

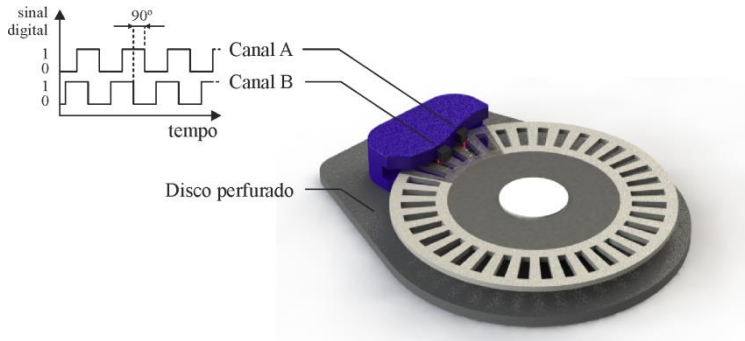


Figura 44. Características construtivas de um encoder.

O movimento do arame causa a rotação de um rolete, que está acoplado ao mesmo eixo do disco perfurado. Com o movimento do disco perfurado, a luminosidade do LED emissor sobre o LED receptor se alterna conforme as perfurações do disco que possibilitam ou bloqueiam a passagem de luz, produzindo uma sequência de sinais digitais denotada como trem de pulsos. Selecionou-se o encoder do fabricante CUI Inc modelo AMT102, que permitiu a configuração de uso em 2048 pulsos por revolução em dois canais defasados em 90°. Após a geração dos sinais digitais, os dados seguem para o segundo módulo.

A unidade de tratamento de sinais compreende a segunda etapa do sistema de medição. Nela, a relação de número de pulsos por tempo é convertida em velocidade, respeitando-se a Equação 7.

$$v = \frac{\text{Perímetro do setor circular}}{\text{Tempo}} \propto \frac{\text{Número de pulsos}}{\text{Tempo}} \quad \text{Equação 7}$$

O microcontrolador STM32F4-Discovery decodifica e trata o sinal com hardware específico para esta aplicação. Utilizando-se o modo quadratura, cada pulso equivale a 4 contagens, totalizando 8192 pulsos por revolução. Conforme mostrado, dois canais (A e B) são necessários. Os sinais resultantes são defasados, e um algoritmo analisa as contagens alto/baixo dos pulsos, de modo a identificar o sentido do movimento. Se o arame estiver avançando, a velocidade é positiva, se estiver recuando, negativa. Esta configuração não está presente nos sistemas comerciais, o que permite a identificação

do valor absoluto da velocidade, apenas. As contagens são executadas a cada instante de 0,005 s (taxa de aquisição de 200 Hz). O módulo possui um software desenvolvido em linguagem C# específico para esta aplicação, com a função de calcular o deslocamento do arame considerando que o perímetro da circunferência (uma revolução) do rolete equivale a 8192 contagens. O rolete foi especificado com diâmetro de 22 mm. Dividindo-se 360° por 8192, tem-se a resolução angular de $0,0439^\circ$, valor correspondente a 0,00843 mm. As rotinas de programação estão representadas no fluxograma da Figura 45. O programa consulta o *buffer* com as informações na USB, calcula a velocidade de arame para a contagem de pulsos recebida baseando-se no intervalo de tempo de 5 ms e aplica a função de calibração pré-estabelecida.

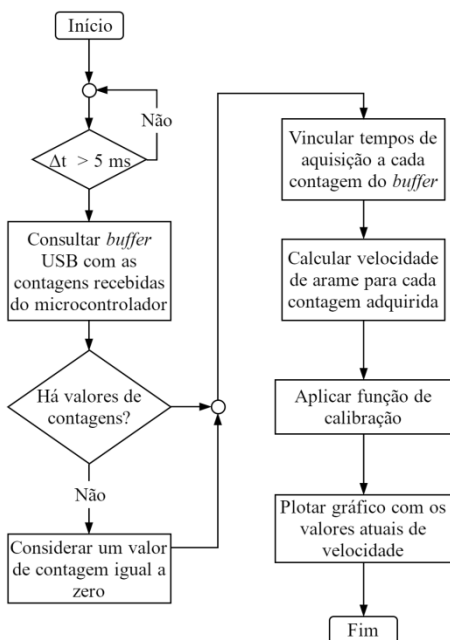


Figura 45. Fluxograma referente à lógica de programação utilizada.

Por fim, a velocidade é exibida em função do tempo no dispositivo registrador, também concebido mediante o software,

com resolução de 0,1 m/min. A área abaixo desta curva representa o deslocamento, de acordo com a Equação 8 [43].

$$\text{Deslocamento} = \int v(t)dt \quad \text{Equação 8}$$

Em virtude da série de dados ser composta por pontos discretos, a integral acima foi resolvida numericamente aplicando-se o método de Newton-Cotes [69]. A média de dez amostras, relativas aos deslocamentos e tempos das fases de avanço e recuo, foi calculada. Dividindo-se o valor do deslocamento resultante (avanço – recuo) pelo tempo de um período, obteve-se a velocidade média resultante. A Figura 46 apresenta os três módulos descritos.

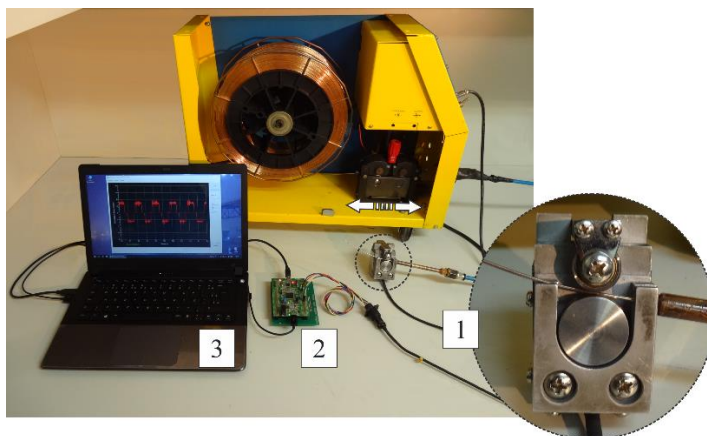


Figura 46. Sistema de medição desenvolvido com seus respectivos módulos indicados. (1) Transdutor. (2) Unidade de tratamento de sinais. (3) Dispositivo registrador.

O procedimento de cálculo da incerteza expandida foi baseado na metodologia apresentada por Gonçalves Jr. e Sousa [64]. A incerteza expandida também foi calculada, seguindo as etapas propostas por Gonçalves Jr. e Sousa, com as mesmas considerações descritas no item 3.1.5.b.

Após validar o funcionamento do sistema de medição com a filmagem em alta velocidade, este pôde ser utilizado para avaliar outras disposições do conduíte, diferentes da utilizada

durante a soldagem (Figura 47). Esta análise foi proposta com o intuito de entender a influência de dobramentos sobre a velocidade resultante.

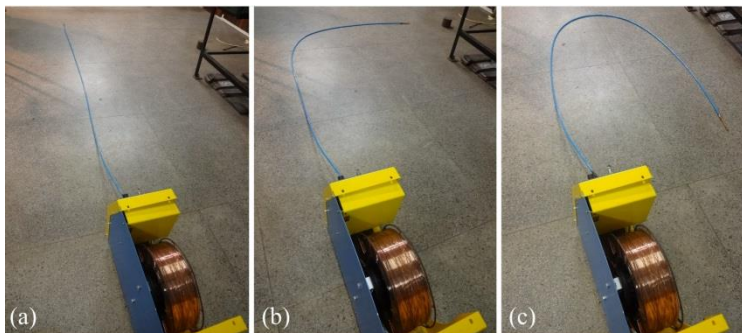


Figura 47. Configuração utilizada para estudar a influência da disposição do conduíte sobre a velocidade resultante (a) Linha reta. (b) 90°. (c) 180°.

A força necessária para tracionar o arame (F_{out}) é função da força mínima para retirá-lo da bobina (F_{in}), do coeficiente de atrito (μ) e do dobramento do conduíte (Φ), de acordo com a Equação 9, conhecida como fórmula de Euler-Eytelwein [70].

$$F_{out} = F_{in}e^{\Phi \mu} \quad \text{Equação 9}$$

Nota-se portanto, que quanto maior o grau de dobramento e o coeficiente de atrito, mais força será exigida do tracionador de arame. É importante enfatizar que esta relação é exponencial. Após atingir o limite de projeto do equipamento, podem surgir instabilidades que afetam diretamente os resultados da soldagem.

3.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM ORBITAL

A segunda etapa do trabalho teve como meta o desenvolvimento de procedimentos de soldagem com o processo TIG alimentado dinamicamente em baixa frequência. Visou-se o aumento da produtividade do passe de raiz orbital na posição 5G em relação aos demais processos mecanizados. A seguir é descrita a metodologia de ensaios, que se concentrou em aplicar a

tecnologia desenvolvida para aumentar o valor produzido e reduzir o valor consumido.

3.2.1 Bancada experimental

Os equipamentos que compõem a bancada destinada aos ensaios de soldagem orbital são os mesmos descritos no item 3.1.1. A configuração utilizada é mostrada na Figura 48. A principal diferença em relação à disposição escolhida para a etapa de caracterização reside na instalação do manipulador robótico. Uma vez que foi utilizado um tubo como corpo de prova, posicionou-se o manipulador em uma cinta rígida. O bocal empregado também mudou. Neste caso, o de número 8 foi escolhido por apresentar melhores resultados no chanfro.

O sentido de soldagem anti-horário foi preferido considerando-se a maior facilidade de operação decorrente da disposição dos cabos. Problemas no arranjo das conexões podem comprometer o processo, deixando-o, por exemplo, mais propenso à contaminação do eletrodo de tungstênio.



Figura 48. Bancada de ensaios de soldagem orbital: (a) Cabeçote alimentador de arame, (b) Unidade portátil de refrigeração, (c) Fonte de energia, (d) Manipulador robótico e Tocha TIG, (e) Cilindro de gás, (f) Controlador do cabeçote alimentador e IHM, (g) Corpo de prova.

3.2.2 Corpos de prova e material de adição

Os corpos de prova em questão são classificados como seções de tubulações de aço ASTM A139 Grau D, concebido para o transporte de líquido, gás e vapor [71]. Seu diâmetro nominal é de 16'' (406,4 mm), com espessura de parede de 15 mm, e comprimento de 250 mm. A composição foi verificada com espectrometria de emissão óptica. O arame, também de aço carbono e diâmetro de 1,2 mm, possui designação ER 70S-6. A Tabela 16 exhibe os percentuais dos elementos químicos presentes.

Tabela 16. Composição química do metal de base e do arame de adição (%.p).

Tubo	C	Mn	Si	P	S
Metal de base	0,270	1,29	0,222	0,0160	0,0032
Arame de adição	0,06-0,15	1,4-1,85	0,8-1,15	0,025 máx	0,035 máx
Tubo	Ni	Cr	Mo	V	Cu
Metal de base	0,0030	0,0123	-	0,0029	0,0082
Arame de adição	-	-	-	-	0,5 máx

A preparação envolveu as fases de corte, usinagem e soldagem. Partindo-se de um tubo maior, as seções foram cortadas no processo de oxicorte. Em seguida, foram usinadas com uma ferramenta de faceamento e posteriormente com uma ferramenta para a obtenção de um chanfro em J com “nariz” de 3 mm. O processo foi avaliado em três geometrias. Nos ensaios preliminares e no primeiro ensaio em 180° (1A e 1B), utilizou-se um chanfro mais aberto, com 15 mm de abertura superior (*top gap*) e ângulo de 13°, conforme mostrado na Figura 49. Este padrão de abertura é similar ao recomendado na maioria das aplicações industriais [31]. O cálculo da área relativa à sua seção transversal resultou em 139 mm².

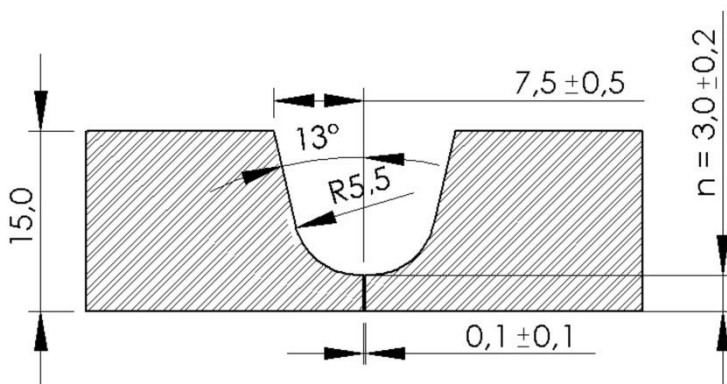


Figura 49. Geometria do chanfro utilizado nos ensaios preliminares e no primeiro ensaio (1A e 1B) em 180°. Dimensões em mm. Área transversal de 139 mm².

Considerando-se que o objetivo do presente trabalho é atingir elevados níveis de produtividade, o volume do chanfro foi

reduzido regulando-se o avanço durante a usinagem. Assim, menos passes de preenchimento seriam necessários. No segundo ensaio foram utilizados dois chanfros (2A - Figura 50 e 2B - Figura 51), mais estreitos em relação ao recomendado. A abertura superior do chanfro 2A foi de 11 mm, com ângulo de 12° . Sua área transversal resultou em 95 mm^2 .

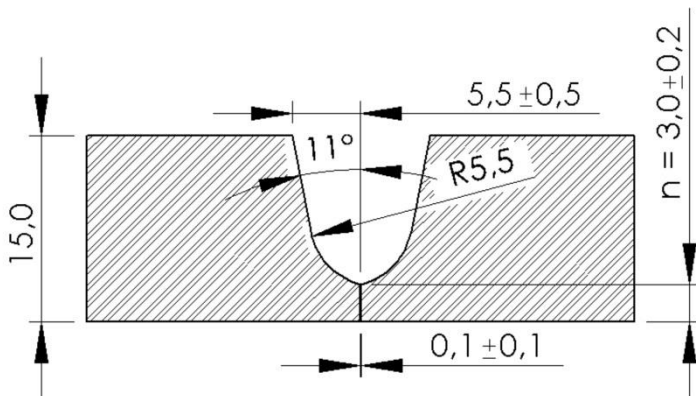


Figura 50. Geometria do chanfro utilizado no segundo ensaio (2A) em 180° . Dimensões em mm. Área transversal de 95 mm^2 .

No chanfro 2B, a abertura foi reduzida para 9 mm, com ângulo de 11° . Calculando-se a área transversal, obteve-se o valor de 75 mm^2 .

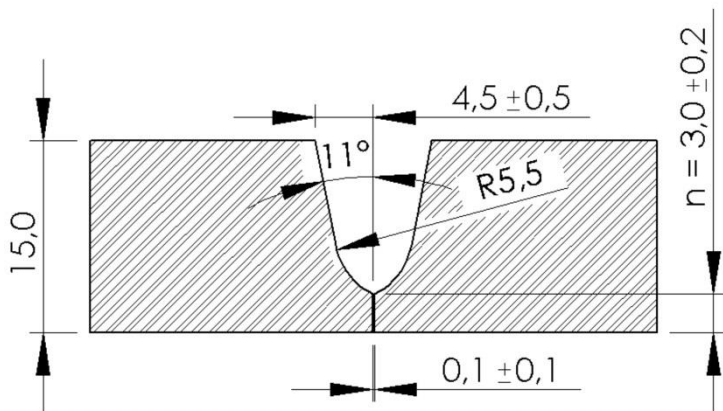


Figura 51. Geometria do chanfro utilizado no segundo ensaio (2B) em 180° . Dimensões em mm. Área transversal de 75 mm^2 .

Para retirar as rebarbas, que influenciavam na abertura de raiz, verificou-se a necessidade de facear novamente a seção. O processo de usinagem foi executado com uma chanfradeira hidráulica PROTEM, modelo US150. É importante mencionar que a usinagem foi realizada com auxílio de um dispositivo composto por um sistema de molas e rolamentos que rastreia o diâmetro interno e desloca a ferramenta (ID - *Tracker*), resultando em um chanfro com geometria uniforme (“nariz”), apesar das irregularidades do tubo. Pigozzo [16] verificou que a utilização deste dispositivo acessório é fundamental para a obtenção de soldas satisfatórias.

Por fim, as duas seções foram encostadas e fixadas com dispositivos auxiliares de montagem (“cachorros”). Não foi definido um espaçamento entre as peças e, por isso, o anteparo da poça de fusão (*backing*) pôde ser dispensado, eliminando custos adicionais. Então, o conjunto foi posicionado e unido também com pontos de solda à bancada experimental.

Uma alternativa à utilização dos dispositivos auxiliares consiste no uso de sistemas de alinhamento, fixação e apoio para o passe de raiz. Com este equipamento, o tempo de montagem é reduzido. Diante deste fato, a equipe do LABSOLDA se dedicou ao desenvolvimento da acopladeira da Figura 52, que possui faixa de operação de $16''$ a $20''$, e de $20''$ a $24''$ mediante espaçadores.

O modelo é compacto e relativamente leve em relação aos comerciais, o que facilita o uso em laboratório. Na fase final do presente trabalho, a acopladeira foi utilizada como suporte para o tubo. Assim, não foi necessário posicionar e unir as seções à bancada. Os “cachorros” continuaram sendo utilizados, uma vez que conferiam maior flexibilidade no posicionamento e permitiam a visualização da raiz durante a etapa de parametrização.

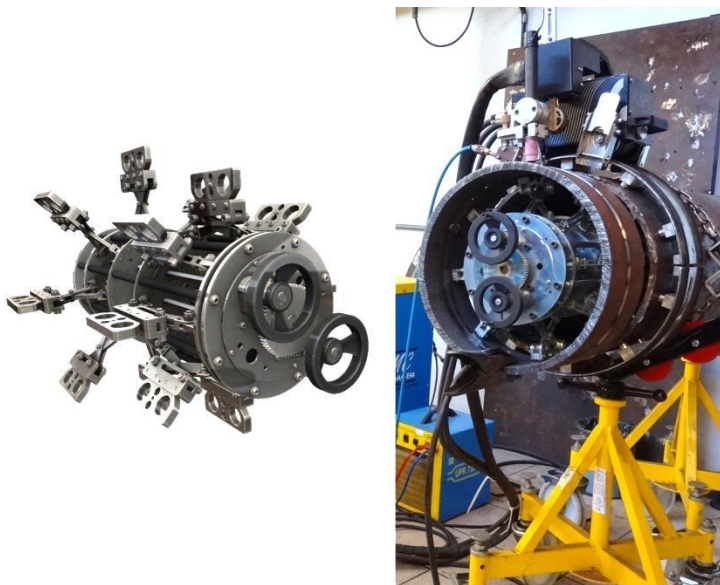


Figura 52. Sistema de alinhamento, fixação e apoio (acopladeira) para o passe de raiz desenvolvido pelo LABSOLDA.

3.2.3 Parâmetros de soldagem: ensaios preliminares com alimentação dinâmica

Os ensaios foram planejados com o requisito de obtenção de uma solda de raiz isenta de defeitos, e que conferisse penetração total com o chanfro da Figura 49. Foi avaliada também a possibilidade de realização do procedimento em um passe de 360°.

Verificou-se inicialmente que os parâmetros que satisfaziam a soldagem na posição plana não atendiam às

exigências nas demais posições. Isto foi atribuído à variação do comportamento da poça.

Para evitar a ocorrência de falta de penetração ou perfuração na junta, optou-se pela parametrização por setor. A pulsação da corrente em baixa frequência foi utilizada para beneficiar o controle da sustentabilidade da poça. O item 3.2.3.a diz respeito à soldagem nas posições 10h, 9h e 8h, com progressão descendente, e o item 3.2.3.b aborda a soldagem na posição 5h, com progressão ascendente.

3.2.3.a Progressão descendente (10h, 9h e 8h)

Uma característica desta progressão relaciona-se ao fato da poça escoar no mesmo sentido da velocidade de soldagem. Isto ocasiona o acoplamento com a poça, diminuindo o contato com o metal de base e dificultando a obtenção de penetração. Os parâmetros elétricos utilizados encontram-se na Tabela 17, e os parâmetros físicos, na Tabela 18.

Tabela 17. Parâmetros elétricos regulados referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).

Parâmetros Elétricos Regulados		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	330/140
Tempos (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Velocidade de soldagem	cm/min	10
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	15,7/14,5

Tabela 18. Parâmetros físicos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).

Parâmetros físicos		
Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	15
Saída do arame (<i>stick out</i>)	mm	20
Ângulo de ponta	Graus (°)	30
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	65
Vazão do gás de proteção	L/min	14

As variáveis de alimentação foram calculadas de forma análoga à apresentada no item 3.1.3, referente à etapa de

caracterização. No entanto, implementou-se algumas modificações. A primeira delas, a quantidade de material, foi reduzida com o objetivo de favorecer a penetração. A segunda diz respeito a um problema operacional. Verificou-se que o deslocamento de avanço e recuo utilizado era excessivo, o que causava a obstrução do arame no bico de contato. Ao retornar, o arame reentrava no bico e, como não é recomendado o uso de um dispositivo “endireitador” por influenciar na velocidade de alimentação resultante (conforme comentado no item 3.2.8.b), sua curvatura impedia o avanço. Portanto, as velocidades de avanço e recuo foram reduzidas. O comprimento de saída do arame (*stick out*) também foi alterado. Passou de 30 mm para 20 mm, com o intuito de melhorar o direcionamento ao utilizar o bico de contato como “guia” para o arame ser adicionado exatamente na poça de fusão. A Tabela 19 apresenta os parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal.

Tabela 19. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão descendente (10h, 9h e 8h).

Parâmetros de Alimentação Regulados						
Frequência [Hz]	Va [m/min]	Va [mm/s]	Vr [m/min]	Vr [mm/s]	ta [s]	tr [s]
1,25	2,90	48,33	2,25	37,50	0,40	0,40

Deslocamento Ideal Calculado				
Frequência [Hz]	Período Analisado [s]	Deslocamento Avanço [mm]	Deslocamento Recuo [mm]	Deslocamento Resultante [mm]
1,25	0,80	19,33	15,00	4,33

Velocidade Ideal Calculada				
Frequência [Hz]	Deslocamento Resultante [mm]	Período Analisado [s]	Velocidade média Resultante [mm/s]	Velocidade média Resultante [m/min]
1,25	4,33	0,80	5,41	0,32

3.2.3.b Progressão ascendente (5h)

Na progressão ascendente, a poça escoava no sentido contrário à velocidade de soldagem. Existe apenas uma fina

camada de metal líquido sob o arco. Desta forma, há o acoplamento direto com o metal de base, e a penetração é favorecida. Portanto, o nível de corrente utilizado é menor em relação à progressão descendente. Os parâmetros elétricos encontram-se na Tabela 20, e os parâmetros físicos, na Tabela 21.

Tabela 20. Parâmetros elétricos regulados referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).

Parâmetros Elétricos Regulados		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	280/140
Tempos (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Velocidade de soldagem	cm/min	10
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	13,7/12,5

Tabela 21. Parâmetros físicos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).

Parâmetros físicos		
Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	15
Saída do arame (<i>stick out</i>)	mm	20
Ângulo de ponta	Graus (°)	30
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	65
Vazão do gás de proteção	L/min	14

Apesar de facilitar a penetração, caso a quantidade de material utilizada seja insuficiente, o processo estará suscetível à perfuração da junta. Considerando esta tendência, regulou-se a velocidade de alimentação resultante em um valor superior à utilizada na progressão descendente de acordo com a Tabela 22.

Tabela 22. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão ascendente (5h).

Parâmetros de Alimentação Regulados						
Frequência [Hz]	Va [m/min]	Va [mm/s]	Vr [m/min]	Vr [mm/s]	ta [s]	tr [s]
1,25	3,50	58,33	2,25	37,50	0,40	0,40

Deslocamento Ideal Calculado				
Frequência [Hz]	Período Analisado [s]	Deslocamento Avanço [mm]	Deslocamento Recuo [mm]	Deslocamento Resultante [mm]
1,25	0,80	23,33	15	8,33

Velocidade Ideal Calculada				
Frequência [Hz]	Deslocamento Resultante [mm]	Período Analisado [s]	Velocidade média Resultante [mm/s]	Velocidade média Resultante [m/min]
1,25	8,33	0,80	10,41	0,62

3.2.4 Parâmetros de soldagem: ensaios orbitais 180° com alimentação dinâmica (1A / 1B e 2A / 2B)

Os resultados a serem apresentados no item 4.2.1.b para a progressão ascendente demonstram a dificuldade de obtenção de um processo repetitivo, caso seja executado em órbita completa (360°). Diante disto, optou-se por soldar o tubo em duas etapas de 180°, na progressão descendente.

Apesar de ter resultado em penetração total, os parâmetros levantados inicialmente para as posições 10h, 9h e 8h não foram satisfatórios nas demais posições. Foi necessária uma nova parametrização. Variou-se a corrente de pulso, elevando seu valor até encontrar um nível de corrente que conferisse penetração total ao longo de todo o perímetro. Mesmo após encontrar uma situação mais favorável, a velocidade de soldagem teve de ser variada durante o procedimento. Para um mesmo parâmetro de corrente e tensão, a cada duas posições horárias, foram encontrados os valores de velocidade de soldagem mais apropriados.

Após a etapa de parametrização, o operador atuou de modo a variar a velocidade de soldagem no momento correto. Além disso, executou as correções necessárias no alinhamento e no ângulo de alimentação. A Figura 53 exibe como o soldador

acompanhou o procedimento, de posse do controle do manipulador para alterar a velocidade de soldagem, e atento às possíveis instabilidades decorrentes de desvios do arame e da tocha em relação à junta.



Figura 53. Acompanhamento do procedimento durante a soldagem.

Os parâmetros elétricos utilizados encontram-se na Tabela 23, e os parâmetros físicos, na Tabela 24. Nota-se que a corrente de pulso é 90 A superior à utilizada nos ensaios preliminares. A velocidade de soldagem nos diferentes setores também é maior, o que atua no sentido de redução do tempo total de operação.

Tabela 23. Parâmetros elétricos regulados referentes ao primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Parâmetros Elétricos Regulados		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	420/140
Tempos (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Velocidade de soldagem (12h às 10h)	cm/min	12
Velocidade de soldagem (10h às 8h)	cm/min	16
Velocidade de soldagem (8h às 6h)	cm/min	24
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	15,7/14,5

Tabela 24. Parâmetros físicos regulados referentes ao primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Parâmetros físicos		
Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	15
Saída do arame (<i>stick out</i>)	mm	20
Ângulo de ponta	Graus (°)	30
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	65
Vazão do gás de proteção	L/min	14

Como consequência da maior corrente e velocidade empregada, o processo demandou um pequeno aumento da velocidade de alimentação resultante em relação ao ensaio preliminar na progressão descendente. Isto contribuiu para a redução da tendência de perfuração nas posições mais críticas, como às 8h. A Tabela 25 apresenta os parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. O procedimento referente ao ensaio 1 foi executado em duas juntas (1A e 1B) de mesma geometria.

Tabela 25. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão descendente (primeiro ensaio 180° com alimentação dinâmica).

Parâmetros de Alimentação Regulados						
Frequência [Hz]	Va [m/min]	Va [mm/s]	Vr [m/min]	Vr [mm/s]	ta [s]	tr [s]
1,25	3,00	50,00	2,25	37,50	0,40	0,40

Deslocamento Ideal Calculado				
Frequência [Hz]	Período Analisado [s]	Deslocamento Avanço [mm]	Deslocamento Recuo [mm]	Deslocamento Resultante [mm]
1,25	0,80	20,00	15,00	5,00

Velocidade Ideal Calculada				
Frequência [Hz]	Deslocamento Resultante [mm]	Período Analisado [s]	Velocidade média Resultante [mm/s]	Velocidade média Resultante [m/min]
1,25	5,00	0,80	6,25	0,37

O segundo ensaio diferiu em relação ao primeiro por utilizar chanfros mais estreitos. Apesar de terem uma espessura de nariz de 3 mm, modificou-se a abertura superior inicialmente para 11 mm (2A), e depois para 9 mm (2B). Isto demandou a utilização de novos parâmetros de soldagem. Verificou-se maior dificuldade para alcançar penetração total. Por esse motivo, 40 A foram adicionados à corrente de pulso, e 10 A à corrente de base em comparação ao primeiro ensaio. Alterou-se também o ângulo de afiação do eletrodo de 30° para 45° com o intuito de proporcionar maior constrição do arco e aumentar a transferência de calor por convecção, garantindo assim a penetração [60]. Novas velocidades de soldagem foram implementadas, superiores às empregadas nos ensaios preliminares e no primeiro ensaio. Os parâmetros elétricos e os parâmetros físicos encontram-se na Tabela 26 e na Tabela 27.

Tabela 26. Parâmetros elétricos regulados referentes ao segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Parâmetros Elétricos Regulados		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	460/150
Tempos (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Velocidade de soldagem (12h às 10h)	cm/min	25
Velocidade de soldagem (10h às 8h)	cm/min	28
Velocidade de soldagem (8h às 6h)	cm/min	31
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	14,7/13,5

Tabela 27. Parâmetros físicos regulados referentes ao segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Parâmetros físicos		
Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	15
Saída do arame (<i>stick out</i>)	mm	20
Ângulo de ponta	Graus (°)	45
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	65
Vazão do gás de proteção	L/min	14

A velocidade de alimentação resultante foi reduzida, também com o objetivo de beneficiar a penetração. Os parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua

equivalência em deslocamento e velocidade média, segundo o gráfico ideal, são exibidos na Tabela 28.

Tabela 28. Parâmetros especificados no cabeçote alimentador e sua equivalência em deslocamento e velocidade média segundo o gráfico ideal. Progressão descendente (segundo ensaio 180° com alimentação dinâmica).

Parâmetros de Alimentação Regulados						
Frequência [Hz]	Va [m/min]	Va [mm/s]	Vr [m/min]	Vr [mm/s]	ta [s]	tr [s]
1,25	2,70	45,00	2,00	33,33	0,40	0,40

Deslocamento Ideal Calculado				
Frequência [Hz]	Período Analisado [s]	Deslocamento Avanço [mm]	Deslocamento Recuo [mm]	Deslocamento Resultante [mm]
1,25	0,80	18,00	13,33	4,67

Velocidade Ideal Calculada				
Frequência [Hz]	Deslocamento Resultante [mm]	Período Analisado [s]	Velocidade média Resultante [mm/s]	Velocidade média Resultante [m/min]
1,25	4,67	0,80	5,83	0,35

3.2.5 Parâmetros de soldagem: ensaio orbital 180° com o processo convencional

Alguns questionamentos surgiram no decorrer do trabalho. Havia uma dúvida em relação à possibilidade de execução da soldagem com chanfro de 3 mm de espessura de nariz, utilizando o processo convencional e velocidade de soldagem equivalente à alcançada nos ensaios com alimentação dinâmica. Com os mesmos parâmetros elétricos do segundo ensaio, e mesma geometria do ensaio 2A, a hipótese foi verificada de duas formas. A primeira, descrita no item 3.2.5.a, é baseada na relação de equilíbrio entre velocidade de alimentação e potência, necessária para se obter uma ponte metálica. Esta relação foi implementada por diversos autores [1] [16] [47], conforme apresentado no item 2.2.2, e foi considerada um requisito essencial para a obtenção de estabilidade. No entanto, o arco voltaico é formado por um gradiente de temperaturas, ou seja, dependendo da região de inserção do arame, o equilíbrio entre velocidade de alimentação e potência é estabelecido. A Figura 17 evidencia este fato. Portanto,

avaliou-se também o processo com uma velocidade de alimentação baixa, igual à do segundo ensaio porém constante. A metodologia é descrita no item 3.2.5.b.

3.2.5.a Parametrização respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia

Ao soldar fora da posição plana, caso a velocidade de arame seja inferior à necessária para a obtenção de um equilíbrio com a potência do arco, existe grande probabilidade de contaminação do eletrodo de tungstênio. Pigozzo [16] utilizou esta relação para garantir a estabilidade do processo na soldagem TIG orbital. Os parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 29.

Tabela 29. Parâmetros utilizados por Pigozzo [16] para a soldagem TIG orbital com o processo convencional.

Ponto	Nível	Corrente [A]	Tensão [V]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Energia [J/cm]	Alimentação [m/min]
P1	Base	110	8,4	10	92,4	0,70
P2	Pulso	180	10,0	10	180,0	1,20

O tubo no qual os parâmetros acima foram testados é similar aos do presente trabalho, o que permitiu que a relação linear entre as variáveis fosse utilizada como informação inicial. Uma das principais diferenças relaciona-se com a velocidade de soldagem, que neste caso é muito inferior à empregada nos ensaios com alimentação dinâmica. Logo, a relação entre velocidade de alimentação e potência foi alterada para velocidade de alimentação e energia. A função matemática resultante é mostrada no gráfico da Figura 54, obtida a partir dos pontos P1 e P2.

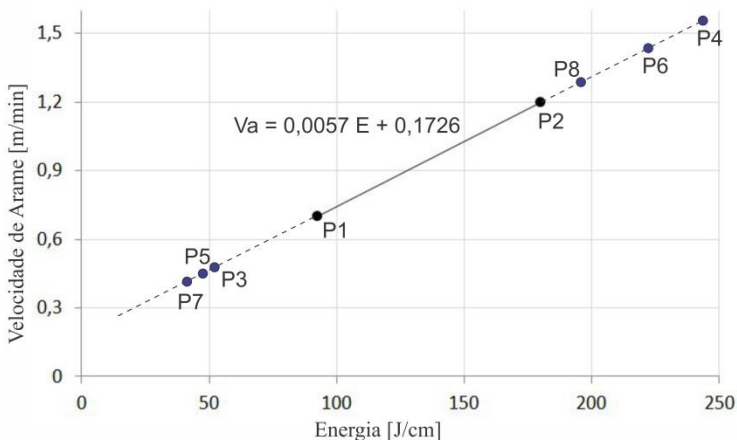


Figura 54. Relação linear entre velocidade de alimentação e energia, segundo os parâmetros utilizados por Pigozzo [16].

Então, respeitando-se a mesma relação e utilizando como valor de entrada a energia medida no ensaio 2A, a velocidade de alimentação nos diferentes setores foi definida. Os valores estão presentes na Tabela 30.

Tabela 30. Parâmetros regulados para a execução do ensaio orbital 180° com o processo convencional e progressão descendente.

Ponto	Nível	Corrente [A]	Tensão [V]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Energia [J/cm]	Alimentação [m/min]
P3	Base	153	8,3	25	50,8	0,46
P4	Pulso	469	13,0	25	243,9	1,56
P5	Base	153	8,3	28	45,4	0,43
P6	Pulso	469	13,0	28	217,8	1,41
P7	Base	153	8,3	31	41,0	0,41
P8	Pulso	469	13,0	31	196,7	1,29

Setor	Pontos
12h às 10h	P3 e P4
10h às 8h	P5 e P6
8h às 6h	P7 e P8

3.2.5.b Parametrização com velocidade de arame constante e inferior à exigida pela relação entre velocidade de alimentação e energia

Embora a relação de equilíbrio em questão seja considerada um requisito essencial, ela assume que o arame está sendo adicionado na região de maior temperatura. Ao direcionar o arame na extremidade inferior do arco, a energia disponível é menor. Esta metodologia consiste em outra alternativa para se alcançar o equilíbrio desejado. Neste ensaio foi realizada a soldagem com o valor de velocidade resultante medida no segundo ensaio, de 0,34 m/min, porém com o processo convencional.

3.2.6 Análise macrográfica e avaliação das características geométricas

Após soldados, os corpos de prova passaram pela etapa de avaliação, primeiramente a partir de uma inspeção visual, e em seguida foram cortados na direção transversal nas posições horárias dos tubos para uma análise mais detalhada. Preparou-se metalograficamente as amostras com lixas de granulação 80, 320, 400, 600 e 1200. Alumina 1,0 μ foi utilizada para polimento. O ataque químico empregado foi o Nital 2% (98% álcool etílico absoluto e 2% ácido nítrico em volume), durante 15 s. Com um estereoscópio *OPTON* e ampliação de 10x, avaliaram-se as características geométricas do metal fundido em relação ao metal de base, atentando-se à presença de descontinuidades internas. Todas as amostras passaram por medições dimensionais do perfil geométrico, realizadas com o software de análise de imagens *Image J*. A Figura 55 apresenta a nomenclatura utilizada, baseada nas normas PETROBRAS N-1438 [72] e N-1738 [73]. Foram definidas duas situações possíveis, sendo uma com saliências (a) e outra com reentrâncias do metal de solda (b). Em alguns casos pode ocorrer o desalinhamento entre os tubos (*High-Low*), mostrado em (c).

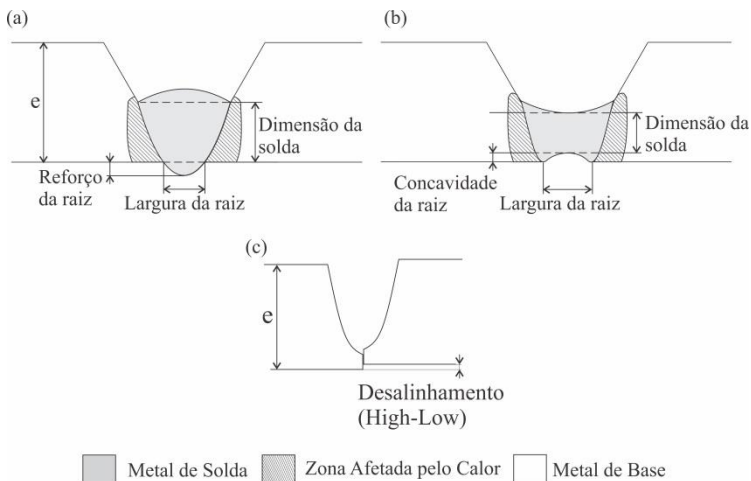


Figura 55. Representação esquemática da seção transversal do passe de raiz e definições geométricas em duas situações: uma com saliências do metal de solda (a) e outra com reentrâncias (b). (c) Desalinhamento entre os tubos (*High-Low*). Adaptado de [74].

A Tabela 31 exibe os critérios de aceitação segundo as normas API 1104 [12], ASME B 31.3 [75] e ISO 5817 [76]. Depois de medir a geometria, verificou-se se os corpos de prova atenderiam às exigências em questão.

Tabela 31. Critérios de aceitação referente à soldagem do passe de raiz.

Norma	Trinca	Falta de Fusão	Falta de Penetração	Reforço da Raiz	Perfuração	Concavidade da Raiz	Mordedura (extensão)	Desalinhamto
API 1104	NP	A	A	NR	NP	B	C	Máx. 3 mm
ASME B 31.3	NP	NP	NP	Máx. 3mm	NR	Máx. 3 mm	NP	Máx. 1,5 mm
ISO 5817	NP	NP	NP	Máx. 3mm	NP	Nível D: 2 mm Nível C: 1 mm Nível B: 0,5 mm	NR	Máx. 2 mm

Notas:

NP - Não permitido; NR – Não registrado na norma.

A – O comprimento de uma indicação individual não deve exceder 25 mm; A soma das indicações não deve exceder 25 mm em qualquer comprimento de solda contínuo de 300 mm.

B – Qualquer comprimento de concavidade da raiz é aceitável, desde que a densidade da imagem radiográfica na região com concavidade não exceda a densidade da região mais fina adjacente.

C – A soma das indicações não deve exceder 50 mm em qualquer comprimento de solda contínuo de 300 mm; A soma das indicações não deve exceder 1/6 do comprimento total da solda.

3.2.7 Monitoração

Durante os ensaios de soldagem orbital, a monitoração dos parâmetros foi realizada com o Sistema de Aquisição Portátil (SAP), conforme descrito no item 3.1.5.a. No caso da velocidade de alimentação utilizou-se o sistema de medição dedicado aos processos com alimentação dinâmica, cujo desenvolvimento é abordado no tópico 3.1.6.

3.2.8 Necessidades tecnológicas levantadas: implementação do sincronismo entre corrente e velocidade de alimentação

3.2.8.a Sincronismo entre o pulso de corrente e o avanço do arame

Algumas modificações nos componentes eletrônicos do equipamento foram propostas em relação ao trabalho de Pigozzo [16]. Inicialmente, a comunicação entre o manipulador da tocha e a fonte de soldagem era realizada por meio de sinais digitais, isolados eletronicamente. Este sistema permitia o disparo remoto da fonte de soldagem, a seleção de quatro combinações de parâmetros, e também a mudança entre patamar de base e de pulso da corrente.

A mudança entre os patamares agora é feita regulando-se dois tempos de referência na IHM do manipulador: t_1 e t_2 . Os tempos comandam periodicamente a mudança entre pulso e base na fonte de soldagem, como mostra a Figura 56.

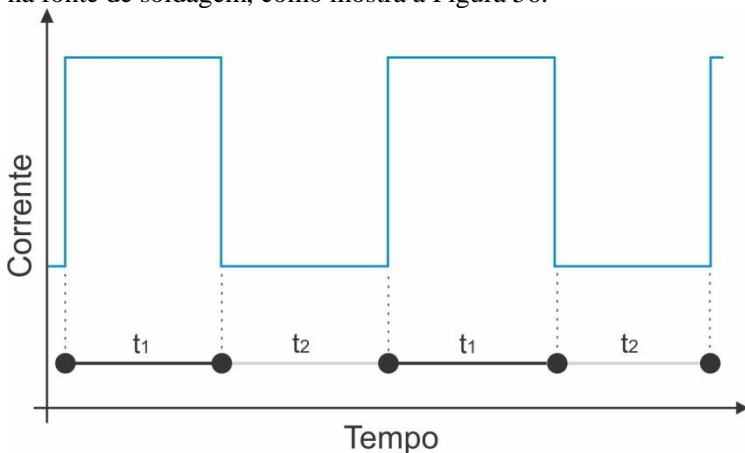


Figura 56. Comando da pulsação na fonte de soldagem a partir dos tempos regulados na IHM do manipulador.

O processo TIG pulsado destinado à soldagem orbital requer o controle da altura da tocha (AVC). Duas tensões de referência são utilizadas. O equipamento altera a corrente utilizando os tempos regulados e lê a tensão instantânea para

verificar se há diferença em relação aos valores de referência. Se houver, o manipulador corrige a trajetória vertical até alcançar os valores de tensão de referência regulados. Portanto, a leitura de tensão deve estar sincronizada com os tempos de pulso e base.

A leitura da tensão do arco era realizada por intermédio de duas vias: uma conectada no cabo terra (ou na peça) e outra no cabo de corrente. Ambos o mais próximo possível do arco elétrico. No entanto, o sinal sofria atrasos, oriundos do processo de filtragem no manipulador. O sincronismo era prejudicado, principalmente em elevados valores de frequência de pulsação.

Para atenuar o atraso gerado na leitura de tensão do arco, foi implementado um canal de comunicação serial entre o manipulador e a fonte de soldagem. Isto permitiu a leitura da tensão e corrente diretamente da fonte, sem a necessidade dos filtros no manipulador.

Foi desenvolvido um protocolo simples para a comunicação serial entre o manipulador e a fonte de soldagem, dividido em três partes: ID, CMD e DADO. O campo do ID corresponde ao identificador do dispositivo. O campo CMD é referente ao comando, no qual são definidos de acordo com o ID do dispositivo. Ambos possuem tamanho de um byte. O último campo, DADO, possui tamanho variável, podendo não possuir dados ou ser uma estrutura de vários bytes. Este tamanho é definido em função do comando enviado.

A comunicação serial possibilitou a inclusão de novos comandos. Para o processo de soldagem TIG com alimentação dinâmica foi adicionado o sincronismo da alimentação de arame de acordo com o estágio de pulsação, resultando no avanço do arame durante o pulso e o retrocesso do mesmo durante a base. Sem este sincronismo, a adição poderia não ocorrer no momento em que a poça recebe maior energia. Assim, defeitos no cordão surgiriam em virtude do arame permanecer sólido após ser adicionado. A Figura 57 exhibe esquematicamente o funcionamento do sistema. As vantagens referentes à soldagem fora de posição com o uso desta técnica são conferidas, sem prejuízo à qualidade final. Em termos operacionais, deve-se regular $t_a = 0$ no cabeçote STA antes iniciar o procedimento.

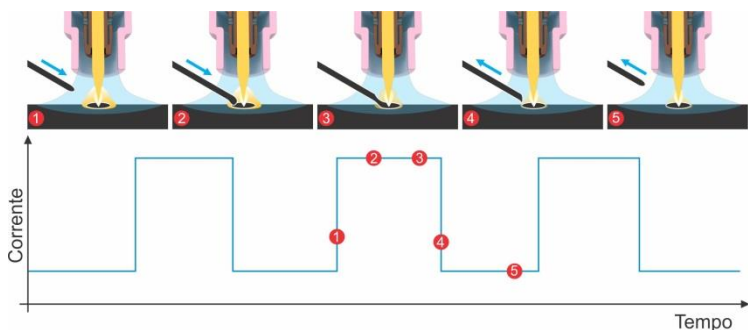


Figura 57. Representação do sincronismo entre a oscilação do arame e o pulso de corrente.

A sequência de eventos é detalhada abaixo:

- 1 - Início do pulso: manipulador envia um sinal para o cabeçote executar o avanço do arame.
- 2 - Pulso é estabelecido e o arame chega à poça.
- 3 – Arame permanece parado por um tempo até completar sua fusão.
- 4 - Fim do pulso: manipulador envia um sinal para o cabeçote executar o recuo.
- 5 - Base é estabelecida com o arame fora do arco.

Ao adicionar mais comandos, a quantidade de dados transmitidos aumenta, e conseqüentemente, maior é o tempo para a troca de informação. Atrasos são decorrentes deste fato. Para reduzir o tempo necessário à transmissão das informações, combinou-se os diversos comandos em uma única mensagem, alterando apenas valor CMD do protocolo de comunicação. Desta forma, em apenas uma mensagem foi possível solicitar a tensão do processo, comandar o pulso de corrente e o sentido da alimentação de arame.

3.2.8.b Projeto de um dispositivo direcionador de arame

Em qualquer versão do processo TIG com adição de material, é importante que o arame seja alimentado na poça de fusão. Se isto não ocorrer, o arame pode fundir apenas parcialmente, ocasionando defeitos. Outra possibilidade, característica do processo convencional, é a de incidir na região de maior temperatura do arco voltaico com velocidade insuficiente para a obtenção de uma ponte metálica, causando assim destacamentos. Estes, são prejudiciais à soldagem fora de posição, conforme comentado no item 2.2.2.

A causa dos desvios observados do arame advém do fato de ele ter sido inicialmente bobinado. Assim, detém uma deformação plástica residual originada no processo de enrolamento no carretel. Para solucionar este problema, é comum utilizar o dispositivo “endireitador” de arame. Trata-se de um trem de rolos por onde o arame é conduzido e através do qual é aplicada uma pressão no sentido contrário à curvatura [77]. No entanto, nos processos com alimentação dinâmica, a pressão citada impede a manutenção da velocidade média regulada. Portanto, este dispositivo deve ser evitado, o que torna o direcionamento ainda mais crítico. A Figura 58 apresenta a situação de soldagem de raiz realizada neste trabalho. Por ser um passe que exige a manutenção da quantidade de material depositada, uma pequena variação, causada por exemplo pelo desvio do arame para um dos lados do chanfro, pode levar à perfuração da junta.



Figura 58. Alinhamento entre o eletrodo de tungstênio e o arame no interior do chanfro.

Durante um procedimento mecanizado, o equipamento deve permitir que o operador realize as correções necessárias de modo a favorecer a soldagem. O dispositivo direcionador de arame constitui a forma mais eficiente de alcançar a estabilidade necessária. Porém, a manipulação é usualmente feita com o ângulo de alimentação α , que não permite a correção dos desvios laterais. Neste trabalho foi desenvolvido o dispositivo da Figura 59, que permite o posicionamento angular (RY) previamente à soldagem e corrige o direcionamento a partir de três eixos de translação (X,Y e Z).

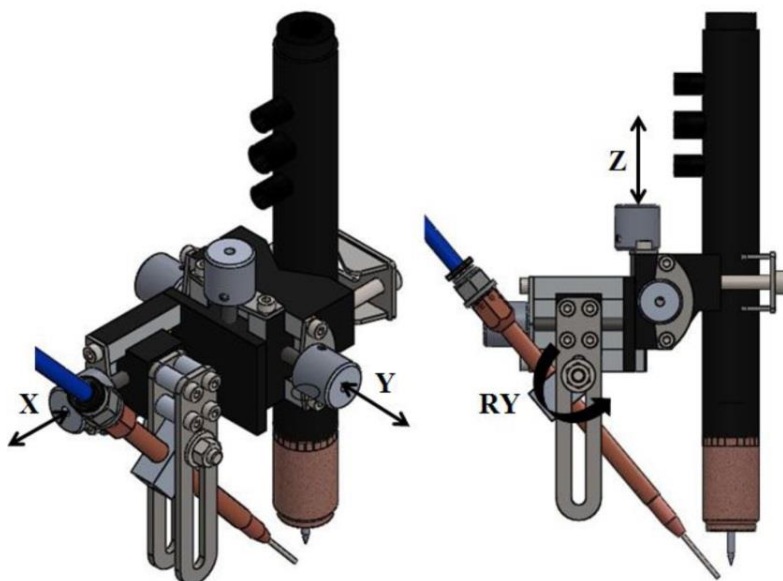


Figura 59. Modelo 3D do dispositivo direcionador de arame desenvolvido. Eixo de rotação RY e eixos de translação X, Y e Z.

Após as etapas de projeto, o dispositivo foi fabricado e testado, como pode ser visto na Figura 60. Ao avaliar a eficiência de correção de cada eixo, foi constatado que há maior facilidade de posicionamento do arame sobre o arco ou sobre a poça de fusão mediante o deslocamento do eixo Z. Os demais eixos também atenderam à movimentação solicitada durante o procedimento. Estes são importantes principalmente na ocorrência de elevados valores de curvatura do arame.

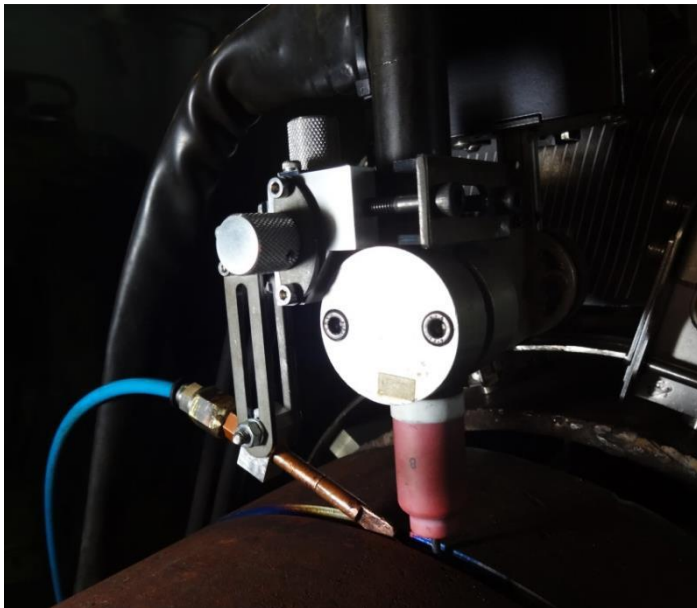


Figura 60. Dispositivo direcionador de arame desenvolvido real.

3.2.8.c Substituição do sistema de transmissão do manipulador robótico

Para transmitir torque e velocidade, desde o motor até as rodas, o manipulador robótico inicialmente possuía um sistema composto por polias e uma correia dentada, conforme mostrado na Figura 61 (a). Apesar das vantagens como redução do nível de ruído e amortecimento das vibrações, a correia não se mostrou apropriada em decorrência de seu estiramento. A Figura 61 (b) exibe uma correia nova e uma estirada, ambas de poliuretano com cordões de aço. Nota-se a diferença entre elas com base no aumento de seu perímetro, causado por uma deformação permanente que impede o cumprimento de sua função. O perímetro inicialmente era de 16,6 cm, mas após a deformação aumentou para 17,6 cm.

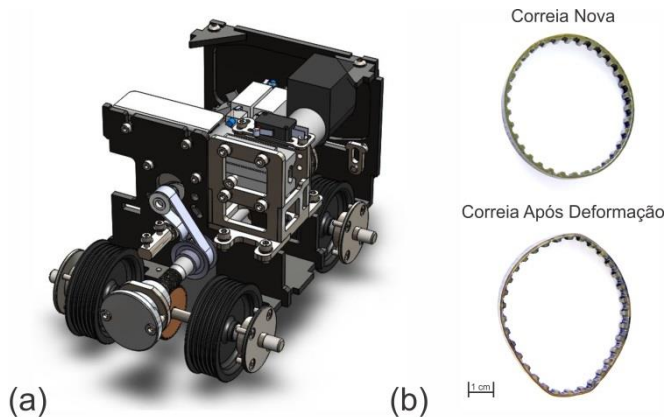


Figura 61. (a) Configuração utilizando a transmissão de movimento por correia. (b) Variação do perímetro: correia nova e correia após sofrer deformação.

Para resolver o problema acima, o conjunto inicial foi substituído por um par de engrenagens, de acordo com a Figura 62. A relação de transmissão foi mantida em 1,6. Esta configuração mostrou-se eficiente nas diferentes posições de soldagem, e reduziu de forma significativa a necessidade de manutenção.

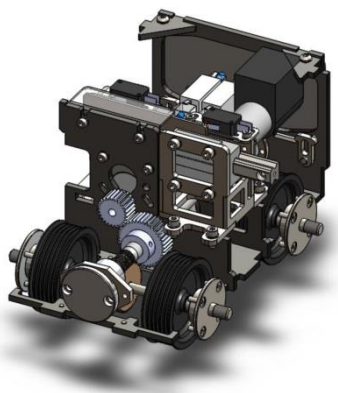


Figura 62. Configuração utilizando a transmissão de movimento por engrenagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma análoga à seção de metodologia, os resultados foram abordados seguindo uma vertente de caracterização do sistema, e outra relativa à aplicação na soldagem orbital.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

4.1.1 Validação do transdutor desenvolvido

A primeira fase de avaliação do sistema de medição foi conduzida com o objetivo de verificar se o comportamento do arame foi o mesmo previsto. A Figura 63 exibe o gráfico obtido com base na aquisição de dados para a alimentação contínua (0 Hz).

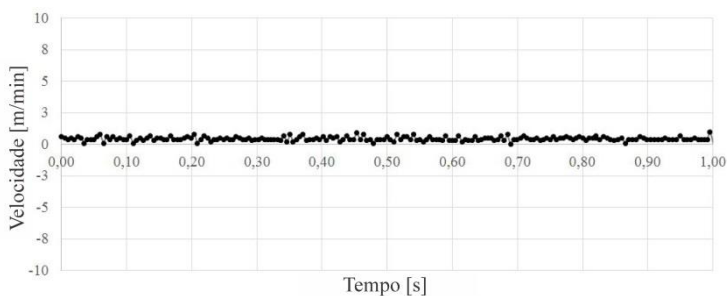


Figura 63. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Frequência de 0 Hz.

Constata-se que os valores de velocidade média resultante foram muito próximos ($0,46 \pm 0,06$ m/min e $0,43 \pm 0,04$ m/min) comparando-se as metodologias aplicadas, conforme mostrado nas Tabela 32, referentes à medição através do encoder e à medição através da filmagem de alta velocidade.

Tabela 32. Valores médios e a respectiva incerteza expandida para deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 0 Hz.

Sistema de medição desenvolvido	Resultante
Deslocamento [mm]	7,6 +/- 0,4
Tempo [s]	1,000 +/- 0,012
Velocidade média [m/min]	0,46 +/- 0,06
Imagem	
Deslocamento [mm]	7,2 +/- 0,7
Tempo [s]	1,000 +/- 0,002
Velocidade média [m/min]	0,43 +/- 0,04

A Figura 64 exibe o gráfico de velocidade x tempo, com os patamares de avanço e recuo indicados para a frequência de 1 Hz.

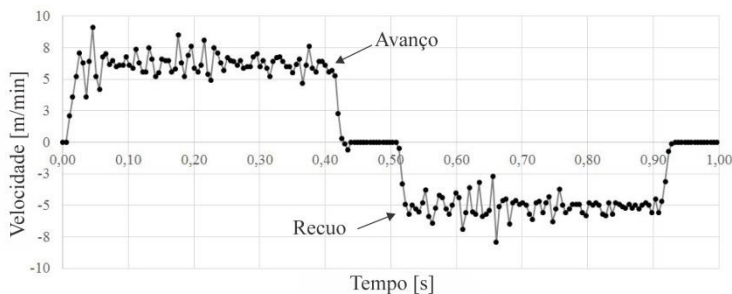


Figura 64. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Frequência de 1 Hz.

Quando o arame oscila, o patamar de avanço (6,0 m/min) encontra-se na região positiva do gráfico, e o de recuo (5,0 m/min), na região negativa. Isto atende ao princípio físico e não foi constatado nos resultados do sistema comercial. No entanto, o formato de onda possui algumas divergências em relação ao ideal. A velocidade não atinge os patamares instantaneamente. Além disso, o arame permanece parado por um tempo antes de inverter o sentido. A Tabela 33 contém os valores médios e a respectiva incerteza expandida das grandezas medidas.

Tabela 33. Valores médios e respectiva incerteza expandida para deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1 Hz.

Sistema de medição desenvolvido	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	42,3 +/- 0,6	34,7 +/- 0,6	7,6 +/- 0,8
Tempo [s]	0,505 +/- 0,014	0,490 +/- 0,014	0,995 +/- 0,017
Velocidade média [m/min]	-	-	0,46 +/- 0,07
Imagem	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	40,6 +/- 0,5	33,4 +/- 0,9	7,2 +/- 1,0
Tempo [s]	0,500 +/- 0,042	0,500 +/- 0,054	1,000 +/- 0,065
Velocidade média [m/min]	-	-	0,44 +/- 0,06

Verifica-se que os valores de deslocamento de avanço e recuo medidos são diferentes dos regulados. Tal fato está relacionado ao formato de onda previsto não ser exatamente o mesmo do obtido. Os dobramentos no conduíte são apontados como possível causa. Por outro lado, os tempos foram similares. Comparando-se os valores de velocidade média resultante, constata-se a convergência dos resultados entre o sistema de medição desenvolvido (0,46 +/- 0,07 m/min) e a imagem (0,44 +/- 0,06 m/min).

A oscilação com frequência de 2 Hz foi analisada de forma análoga à de 1 Hz. A partir da observação do gráfico da Figura 65, percebe-se que o arame também permaneceu parado antes de inverter de sentido, o que contribuiu para a obtenção de deslocamentos menores do que os previstos.

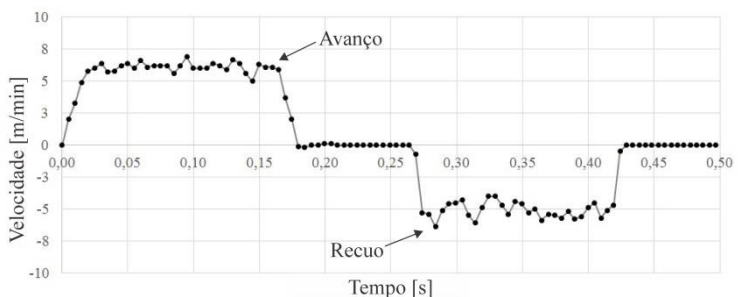


Figura 65. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Frequência de 2 Hz.

A Tabela 34 contém os valores médios das grandezas medidas com a respectiva incerteza expandida.

Tabela 34. Valores médios e a respectiva incerteza expandida para deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 2 Hz.

Sistema de medição desenvolvido	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	16,7 +/- 0,6	13,0 +/- 0,7	3,7 +/- 0,8
Tempo [s]	0,270 +/- 0,009	0,230 +/- 0,010	0,500 +/- 0,012
Velocidade média [m/min]			0,44 +/- 0,11
Imagem	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	14,9 +/- 0,4	11,3 +/- 0,3	3,6 +/- 0,5
Tempo [s]	0,260 +/- 0,029	0,240 +/- 0,029	0,500 +/- 0,040
Velocidade média [m/min]	-	-	0,43 +/- 0,06

Comparando-se os valores de velocidade média resultante, constata-se a convergência dos resultados entre o sistema de medição desenvolvido (0,44 +/- 0,11 m/min) e a imagem (0,43 +/- 0,06 m/min). Porém, nota-se que a incerteza para o sistema de medição neste caso foi superior em relação às outras frequências.

Os resultados acima indicam que o sistema desenvolvido é adequado para a medição da oscilação de arame, quando baixas frequências são requisitadas. A diferença entre os valores está associada ao erro sistemático e pode ser compensada mediante um procedimento de calibração. Os gráficos resultantes das comparações constam na Figura 66.

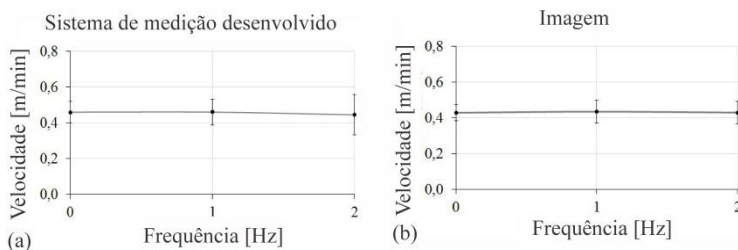


Figura 66. Gráficos comparativos de velocidade média resultante e suas respectivas incertezas. (a) Sistema de medição desenvolvido. (b) Imagem.

Após validado, pode-se utilizar o sistema desenvolvido. Com o objetivo de provar que a disposição do conduíte influencia no resultado do gráfico de velocidade x tempo, três diferentes situações foram testadas: linha reta, dobramento em 90° e

dobramento em 180° . Os resultados para as frequências de 1 Hz e 2 Hz encontram-se nos gráficos da Figura 67 e da Figura 68.

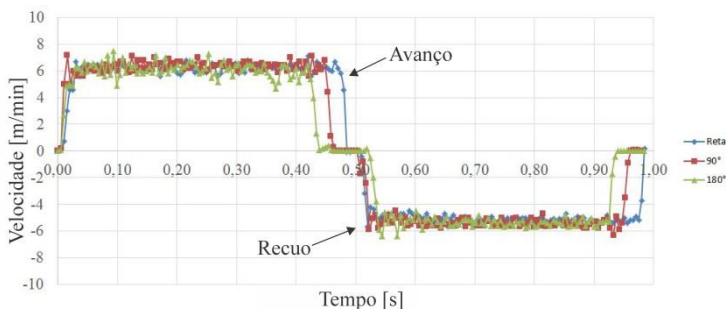


Figura 67. Gráfico de velocidade x tempo, plotado com os resultados do sistema desenvolvido. Frequência de 1 Hz. Disposição: linha reta, 90° e 180° .

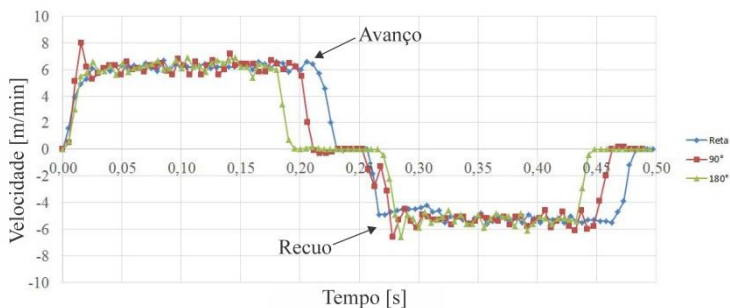


Figura 68. Gráfico de velocidade x tempo, plotado com os resultados do sistema desenvolvido. Frequência de 2 Hz. Disposição: linha reta, 90° e 180° .

A análise dos resultados permite inferir que o tempo em que o arame permanece parado aumenta com o grau de dobramento. Este possui influência direta sobre a força necessária para tracionar o arame, conforme mostrado na Equação 9. Desta forma, como a condição de soldagem exigiu uma disposição com diferentes graus, a força necessária para tracionar o arame se aproxima do limite do equipamento, fazendo com que o tempo de velocidade zero seja significativo. Caso a soldagem fosse realizada com a disposição do conduíte em linha reta, o gráfico de

velocidade x tempo se aproximaria do modelo ideal, e os valores regulados seriam mais próximos dos reais.

4.1.2 Ensaios de soldagem

A presente seção aborda os ensaios de soldagem. São apresentados comparativamente os resultados das versões autógena, com alimentação contínua e com alimentação dinâmica em baixa frequência. O estudo foi conduzido levando-se em consideração os modos de transferência metálica, transferência de calor e sua respectiva influência sobre a geometria dos cordões.

Inicialmente, com o objetivo de verificar se os valores de corrente e tensão foram respeitados, o Sistema de Aquisição Portátil (SAP) foi utilizado para a medição, de acordo com o descrito no item 3.1.5.a. Na Tabela 35 encontram-se os valores resultantes.

Tabela 35. Parâmetros elétricos medidos referentes aos ensaios de caracterização.

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem	A	200
Tensão AVC	V	10,0

Nota-se que a tensão regulada no AVC foi diferente da medida. Isto ocorreu devido ao erro sistemático presente na IHM.

A análise prosseguiu com os resultados oriundos da filmagem em alta velocidade. A Figura 69 apresenta as versões autógena (a) e com alimentação contínua (b). Quando não há material sendo adicionado, o contato do arco com a poça é direto. Logo, espera-se maior atuação dos efeitos térmicos, uma vez que o arame não está presente para absorver a parcela da energia necessária para sua fusão. Ao adicionar material, um equilíbrio que resulte em estabilidade é um requisito. Para isso, recomenda-se o modo de transferência em ponte.

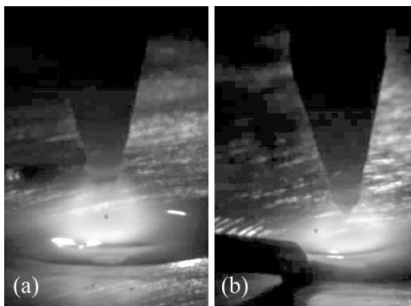


Figura 69. Filmagem em alta velocidade. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua (0 Hz), ângulo de inserção do arame de 70° e transferência em ponte.

A estratégia apresentada por Delgado [1] e Figuerôa et al. [47] garante o equilíbrio, porém exige em determinadas situações uma velocidade de alimentação exagerada para a aplicação. A Figura 70 mostra que a estabilidade do processo pode ser alcançada independentemente da velocidade, quando o processo dinâmico é empregado. Atribui-se esta vantagem ao fato da transferência acontecer dentro da poça de fusão, ou seja, mesmo se houver formação de uma gota, ela não crescerá a ponto de oferecer risco de contaminação ao eletrodo devido às elevadas velocidades de avanço e recuo implementadas. O arame avança rapidamente entre as isothermas, atinge a poça, funde e então retorna. Estes resultados estão de acordo com o relatado por Rudy [48].

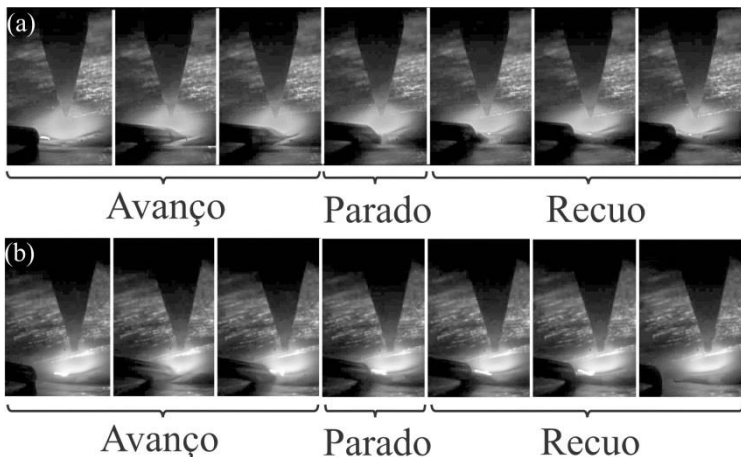


Figura 70. Filmagem em alta velocidade. Intervalo de 0,04 s entre as imagens analisadas. Ângulo de inserção do arame de 70° . Processo com alimentação dinâmica. (a) 1 Hz. (b) 2 Hz.

Com o propósito de comprovar o fato descrito acima, modificou-se o ângulo de inserção do arame. Em 70° , no caso da alimentação contínua, constatou-se a transferência em ponte, já que o arame incidiu diretamente sobre a poça. Ao alterar para 80° , o arame incide sobre o arco, na região de maior temperatura. Assim, uma gota é formada e em seguida destacada, de acordo com a Figura 71. Em virtude de seu tamanho, ao soldar fora da posição plana, esta gota representa uma ameaça de contaminação ao eletrodo de tungstênio.



Figura 71. Filmagem em alta velocidade. Intervalo de 0,02 s entre as imagens analisadas. Ângulo de inserção do arame de 80° . Processo com alimentação contínua.

Quando a oscilação é utilizada, mesmo que o arame incida sobre o arco, se houver formação de uma gota, o movimento de

avanço a direcionará diretamente à poça. Isto pode ser observado na Figura 72.

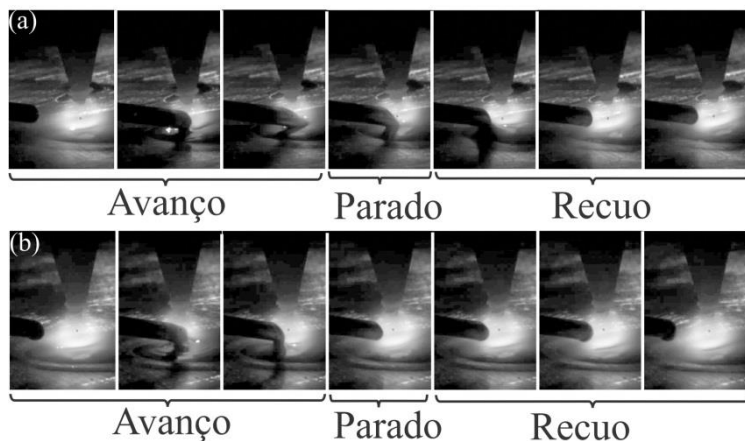


Figura 72. Filmagem em alta velocidade. Intervalo de 0,04 s entre as imagens analisadas. Ângulo de inserção do arame de 80°. Processo com alimentação dinâmica. (a) 1 Hz. (b) 2 Hz.

Desta forma, a alternância dos movimentos de avanço e recuo do arame pode ser apontada como uma opção para o aumento da robustez do processo TIG com alimentação automática.

A seguir, procedeu-se a análise com base nos gradientes térmicos da poça de soldagem. A Figura 73 evidencia que a presença de material afeta a temperatura, uma vez que a medição na região central da poça referente ao processo autógeno apresentou valor significativamente superior à dos processos com alimentação automática. Embora a diferença entre os processos que utilizaram alimentação automática não seja tão expressiva, cabe notar que a temperatura reduziu com o aumento da frequência. Portanto, a agitação imposta contribuiu para a redução da temperatura, mesmo que o arco tenha estabelecido contato direto com a poça por maior tempo em relação ao processo contínuo. Este resultado pode estar associado ao fato do arame ter se deslocado para fora do arco voltaico, e trocado calor com o ambiente. Assim, ao retornar o arame a uma menor temperatura, a condição de equilíbrio térmico ocasionou a

redução da temperatura da poça. Soma-se a isto o fato de uma parcela do arame adentrar na poça, e não apenas formar uma ponte. Quanto maior a parcela mencionada, que é regulada a partir do deslocamento de avanço, maior é o calor retirado da poça.

Com a monitoração pelo lado reverso da chapa, não se observou no perfil térmico nenhuma queda pontual de temperatura, conforme previsto nas simulações de Traidia [54], oriunda da inserção de arame.

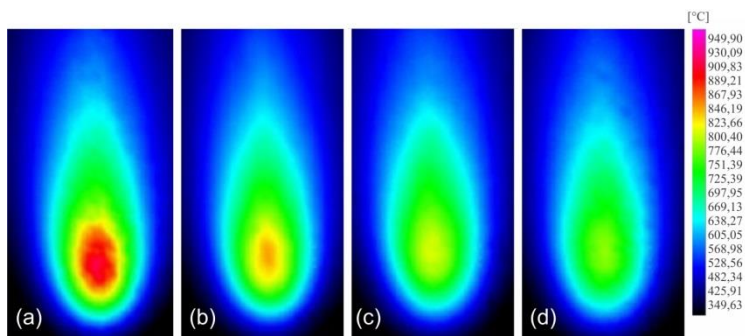


Figura 73. Filmagem termográfica: medição da temperatura máxima. (a) Processo autógeno – 951 °C. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte – 878 °C. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz – 858 °C. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz – 850 °C.

Os valores médios de temperatura dos perfis acima, juntamente com sua dispersão, são exibidos na Figura 74.

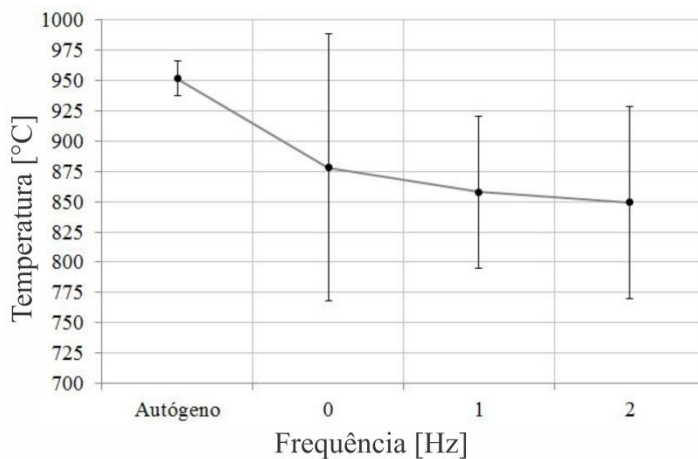


Figura 74. Valores médios de temperatura, resultantes da filmagem termográfica.

Os aspectos físicos abordados afetam as características geométricas da solda. As superfícies dos cordões correspondentes às diferentes frequências estão retratadas na Figura 75.

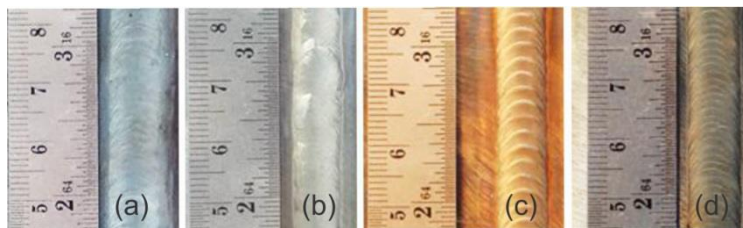


Figura 75. Superfícies dos cordões resultantes dos ensaios de soldagem. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz.

Apesar de não haver pulsação da corrente, os cordões apresentaram um formato ondulado, cuja densidade de escamas

aumenta em proporção direta à frequência de oscilação. Macrografias longitudinais foram preparadas com o objetivo de verificar a existência de variação da penetração, conforme mostrado na Figura 76. De forma contrária ao observado durante a soldagem com pulsação de corrente [57], verificou-se maior regularidade nos perfis quando o arame oscila, embora a alimentação dinâmica tenha alternado entre momentos de absorção de energia do arco pelo arame e contato direto do arco com a poça.

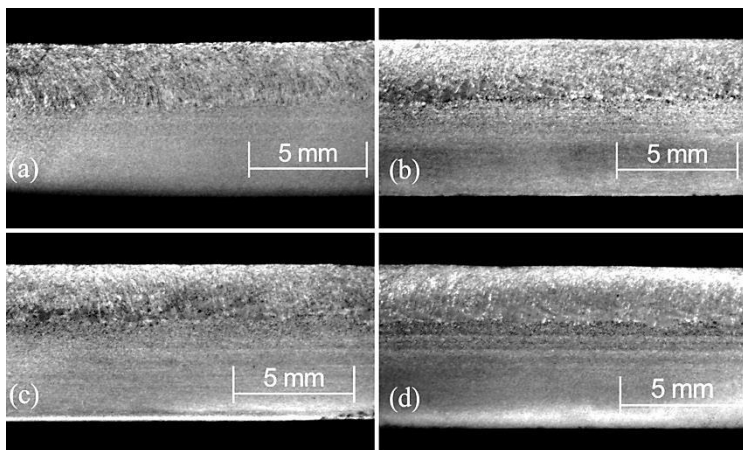


Figura 76. Macrografias longitudinais. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz.

Também foram analisadas as macrografias transversais. A comparação entre os perfis da Figura 77 e da Figura 78 indica que a penetração reduz ao adicionar material. Porém, os resultados dos processos com alimentação automática foram similares, sem a assimetria constatada por Tokar [35]. Portanto, assim como o perfil térmico, a penetração é afetada principalmente pela quantidade de material adicionado.

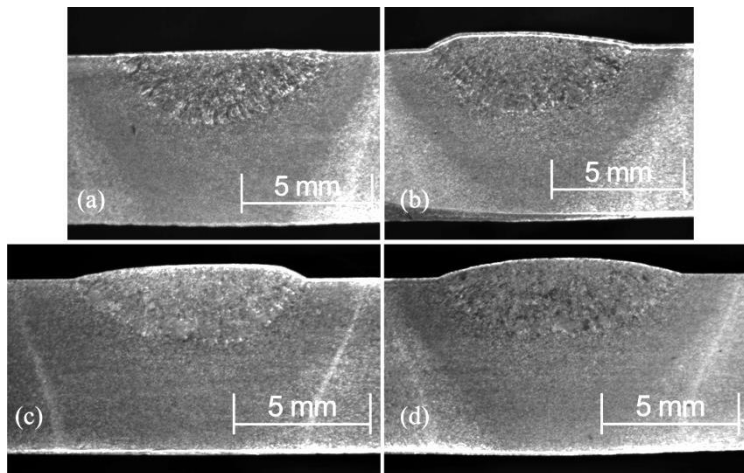


Figura 77. Macrografias transversais. (a) Processo autógeno. (b) Processo com alimentação contínua e transferência em ponte. (c) Processo com alimentação dinâmica 1 Hz. (d) Processo com alimentação dinâmica 2 Hz.

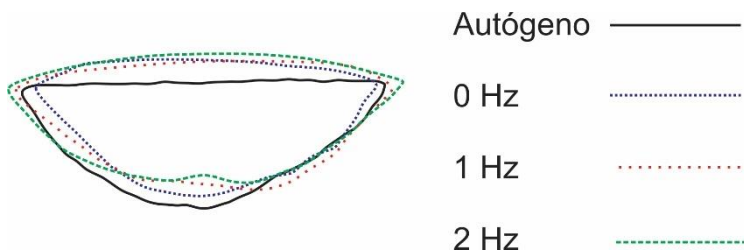


Figura 78. Sobreposição das macrografias transversais.

No caso da largura, o comportamento foi diferente. Percebe-se uma diminuição comparando-se o processo autógeno com o processo com alimentação constante, e em seguida um aumento, diretamente proporcional à frequência de oscilação. Os valores médios, assim como a dispersão associada à penetração e à largura são exibidos na Figura 79.

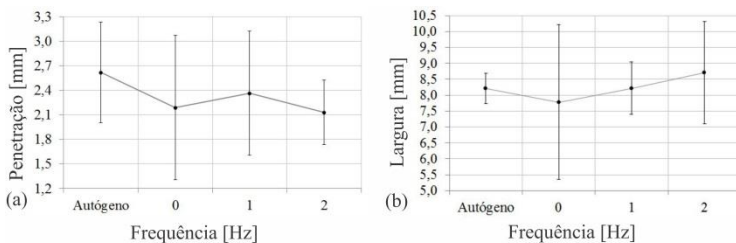


Figura 79. (a) Gráfico comparativo de penetração. (b) Gráfico comparativo de largura.

4.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM ORBITAL

O processo de soldagem TIG com alimentação dinâmica, desenvolvido no presente trabalho, procura simular as ações de um soldador que o favorecem na execução do passe de raiz de dutos. Para avaliar a aplicabilidade do sistema mecanizado de soldagem orbital em questão, foram propostas três sequências de ensaios. No item 4.2.1 são apresentados os ensaios preliminares, que incluem a soldagem em algumas posições na progressão descendente e ascendente. No item 4.2.2, são mostrados os resultados obtidos para os ensaios orbitais em 180°. Em seguida, no item 4.2.3 são apresentados os ensaios realizados com o processo convencional com o objetivo de avaliar seu desempenho em relação ao processo com alimentação dinâmica. Por último, nos itens 4.2.4 e 4.2.5 faz-se um comparativo sob o aspecto de produtividade e qualidade entre os resultados obtidos neste trabalho, utilizando-se a alimentação dinâmica, e os alcançados por outros autores que também se dedicaram ao estudo da soldagem orbital de dutos.

4.2.1 Ensaios preliminares com alimentação dinâmica

4.2.1.a Progressão descendente (10h, 9h e 8h)

A primeira avaliação foi destinada às posições 10h, 9h e 8h, na progressão descendente. Assim como nos ensaios de caracterização, os valores de corrente e tensão foram medidos com o Sistema de Aquisição Portátil (SAP) para verificar se houve convergência com os regulados, de acordo com a Tabela

36. Nota-se, mais uma vez, que os valores de corrente são muito próximos dos previstos, porém os de tensão não, devido ao erro sistemático presente na IHM.

Tabela 36. Parâmetros elétricos medidos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	331/140
Tempo (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	14,0/10,7

Na Tabela 37 encontram-se as grandezas medidas com o sistema desenvolvido, que correspondem à velocidade de alimentação. O valor de velocidade, assim como os deslocamentos, são diferentes em relação aos regulados. Isto também ocorreu devido às divergências encontradas comparando-se o gráfico de velocidade x tempo do fenômeno ideal, utilizado para o cálculo dos valores regulados, com o real. Os fatos relatados acima se repetiram nos ensaios seguintes devido às mesmas razões.

Tabela 37. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão descendente (10h, 9h e 8h).

Sistema de medição desenvolvido	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	13,4	8,4	4,9
Tempo [s]	0,435	0,360	0,795
Velocidade média [m/min]	-	-	0,37

O setor estudado inicia às 10h e termina às 8h. Apesar do desalinhamento entre os tubos (*high-low*), o requisito de conferir penetração total ao longo da junta foi satisfeito, como pode ser visto na Figura 80. Não foi constatada a presença de defeitos que pudessem comprometer a integridade da estrutura. Por fim, o perfil da face arredondado facilita a realização dos passes de preenchimento, com menor possibilidade de ocorrência de defeitos como a falta de fusão nas laterais do chanfro.

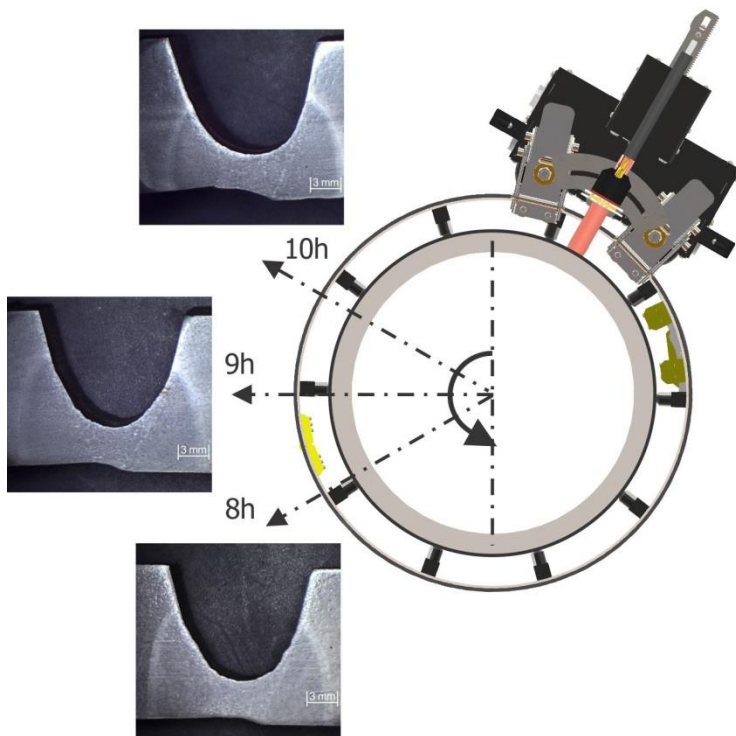


Figura 80. Macrografias transversais referentes à soldagem das posições 10h, 9h e 8h com alimentação dinâmica e progressão descendente.

4.2.1.b Progressão ascendente (5h)

O segundo teste foi realizado na posição 5h, na progressão ascendente. A Tabela 38 exhibe os parâmetros elétricos, e a Tabela 39, os parâmetros de alimentação, ambos medidos.

Tabela 38. Parâmetros elétricos medidos referentes ao ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	280/140
Tempo (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	12,5/10,2

Tabela 39. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Ensaio preliminar com alimentação dinâmica e progressão ascendente (5h).

Sistema de medição desenvolvido	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	16,8	8,1	8,7
Tempo [s]	0,460	0,340	0,800
Velocidade média [m/min]	-	-	0,65

O ensaio com os parâmetros acima foi realizado quatro vezes. Na primeira tentativa a junta apresentou penetração total, com uma raiz plana, conforme a Figura 81 (a). Na segunda e terceira vez, com as mesmas variáveis, foi observada a presença de uma concavidade excessiva, com perfuração no final (Figura 81 (b)). Por último, optou-se por reduzir apenas a corrente de pulso, de 280 A para 270 A. No entanto, com base na Figura 81 (c), nota-se que não houve penetração total. Um comportamento similar também foi observado nas posições 4h e 3h, mesmo com a implementação de técnicas de tecimento e a utilização de gás Hélio em diferentes níveis de corrente. Neste caso, o processo se mostrou muito sensível às pequenas variações geométricas da junta como *gap* e *high-low*.

A não repetição dos parâmetros na progressão ascendente dificulta sua implementação em campo. Por isso, apesar do procedimento em 360° ser vantajoso por reduzir os tempo de operação, haveria grande perda de produtividade em virtude do retrabalho. Um procedimento em 180° é, portanto, mais apropriado.



Figura 81. Parte interna da raiz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaios 2 e 3. (c) Ensaio 4.

4.2.2 Ensaios orbitais 180° com alimentação dinâmica

4.2.2.a Ensaio 1 (A e B)

Após entender o comportamento do processo e as condições necessárias à obtenção de uma raiz satisfatória, uma nova parametrização foi proposta para soldagem completa em 180° na progressão descendente. A Tabela 40 exibe as medições dos parâmetros elétricos.

Tabela 40. Parâmetros elétricos medidos referentes ao primeiro ensaio orbital com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	426/141
Tempo (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	14,0/9,7

Os oscilogramas de corrente e tensão encontram-se na Figura 82 e na Figura 83, respectivamente. A intercalação dos níveis de pulso e base em 1,25 Hz, com formato de onda retangular, favoreceu o controle da sustentabilidade da poça de fusão quando a soldagem foi realizada fora da posição plana. Os períodos de dilatação e contração impediram o escorrimento do metal fundido.

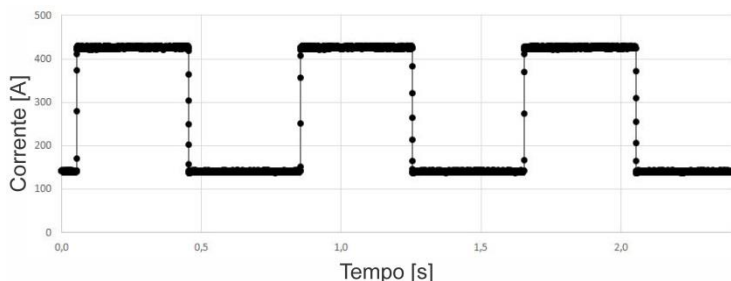


Figura 82. Oscilograma de corrente. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

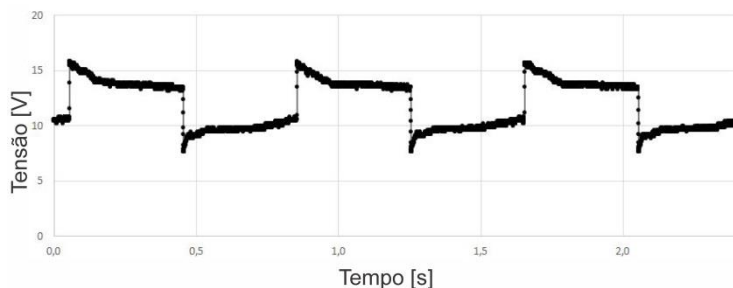


Figura 83. Oscilograma de tensão. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Com relação à alimentação de arame, uma das vantagens da oscilação diz respeito à garantia de estabilidade mesmo em baixas velocidades. Neste caso, a contaminação do eletrodo de tungstênio é um problema quando o usuário opta pelo processo convencional, uma vez que o equilíbrio entre taxa de fusão e velocidade de alimentação não acontece e resulta no modo de transferência intermitente. Apesar das velocidades de avanço e recuo reguladas em 3,00 m/min e 2,25 m/min respectivamente, em algumas situações fora da posição plana, o eletrodo contaminou na primeira vez em que foi testado, alterando assim suas propriedades de emissão de elétrons. Tal fato resultou em uma união sem penetração total da junta a partir do ponto em que a gota de aço colidiu com o eletrodo de tungstênio. Levantou-se a hipótese de que o dobramento do conduíte, mostrado na Figura 48, era o responsável pelo ocorrido. A influência deste dobramento nos deslocamentos de avanço e recuo é discutida no item 4.1.1. Para resolver esta questão, recorreu-se ao sistema de medição desenvolvido, comparando-se os resultados de deslocamento oriundos do conduíte dobrado com os do conduíte reto, conforme mostrado na Tabela 41.

Tabela 41. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Sistema de medição / Cond. Dobrado	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	10,1	-3,2	6,9
Tempo [s]	0,500	0,300	0,800
Velocidade média [m/min]	-	-	0,52
Sistema de medição / Cond. Reto	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	13,2	-5,9	7,3
Tempo [s]	0,440	0,360	0,800
Velocidade média [m/min]	-	-	0,55

De fato, quando o conduíte está reto, ele avança e recua mais, apesar da velocidade resultante ser similar à da situação de dobramento. Porém, o principal efeito é revelado no gráfico de velocidade x tempo da Figura 84. O tempo em que o arame permanece parado quando o conduíte está disposto em uma sequência de curvas é de 0,26 s, que representa 32,5% do período. Quando o conduíte está reto, este tempo é de 0,16 s, que corresponde a 20% do período. Os 0,26 s são suficientes para a isoterma de maior temperatura causar o crescimento da gota até o ponto desta destacar por ação da gravidade. Isto não ocorre para o caso dos 0,16 s. Após esta constatação, todos os ensaios foram realizados com o conduíte em linha reta. O problema de contaminação do eletrodo não foi mais verificado.

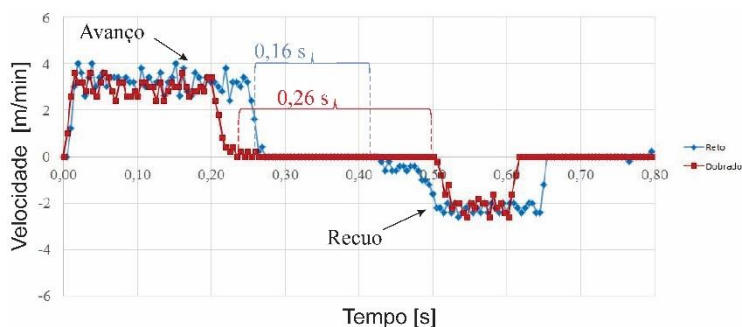


Figura 84. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Primeiro ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Após soldadas, as juntas passaram por uma avaliação visual. Em campo, a detecção de defeitos no passe de raiz exige a retirada de todo o material depositado para a realização do reparo. Além disto, estes defeitos atuam como concentradores de tensão e podem comprometer a integridade estrutural da junta. Um processo adequado deve apresentar descontinuidades com as tolerâncias presentes na Tabela 31, formulada com base nas principais normas de soldagem de dutos.

O formato arredondado da face externa, assim como nos ensaios preliminares, mostrou-se apropriado para o recebimento dos passes de preenchimento, com boa molhabilidade nas laterais. Não foi verificada a presença de trincas, poros superficiais, falta de fusão nem mordeduras. Na face interna, o procedimento conferiu penetração total da junta. No entanto, detectou-se a presença de mordeduras em uma região no final das 8h. A extensão desta descontinuidade foi de 18 mm, e portanto se insere dentro dos limites de aceitação da norma API 1104, mas não nos da norma ASME B 31.3. Nesta última, nenhuma extensão de raiz com mordedura é permitida. O aspecto das superfícies externa e interna é mostrado na Figura 85.

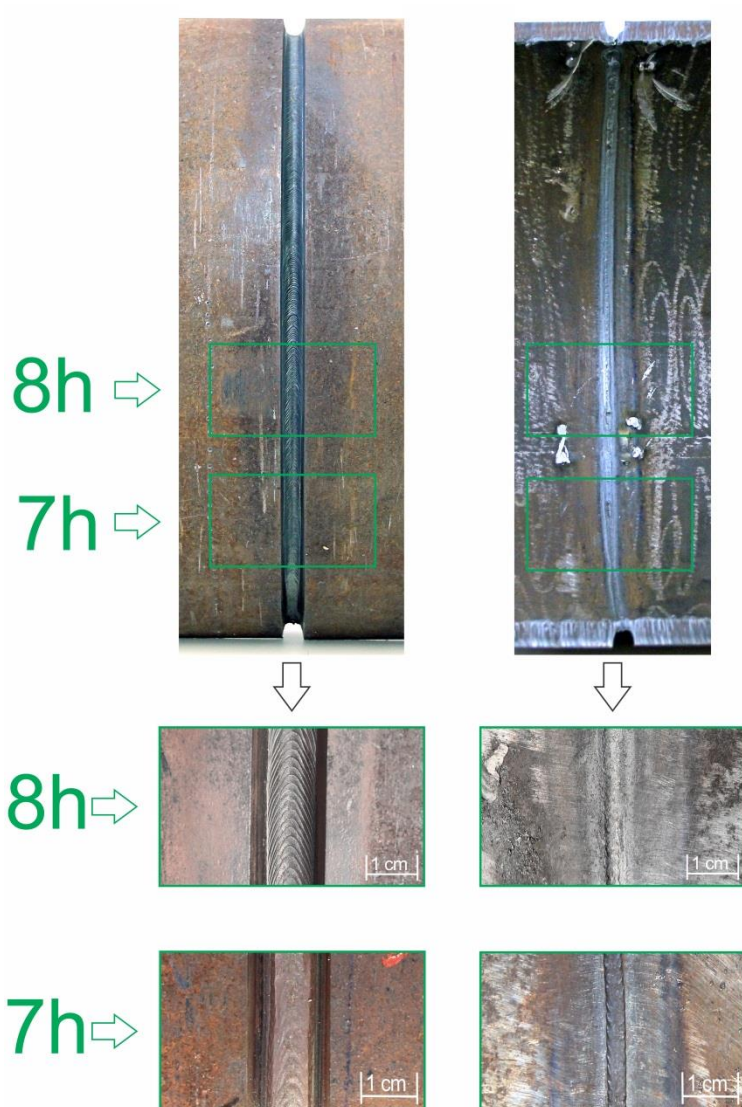


Figura 85. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 1A.

A análise mais detalhada do perfil geométrico do metal fundido foi realizada mediante as macrografias da Figura 86.

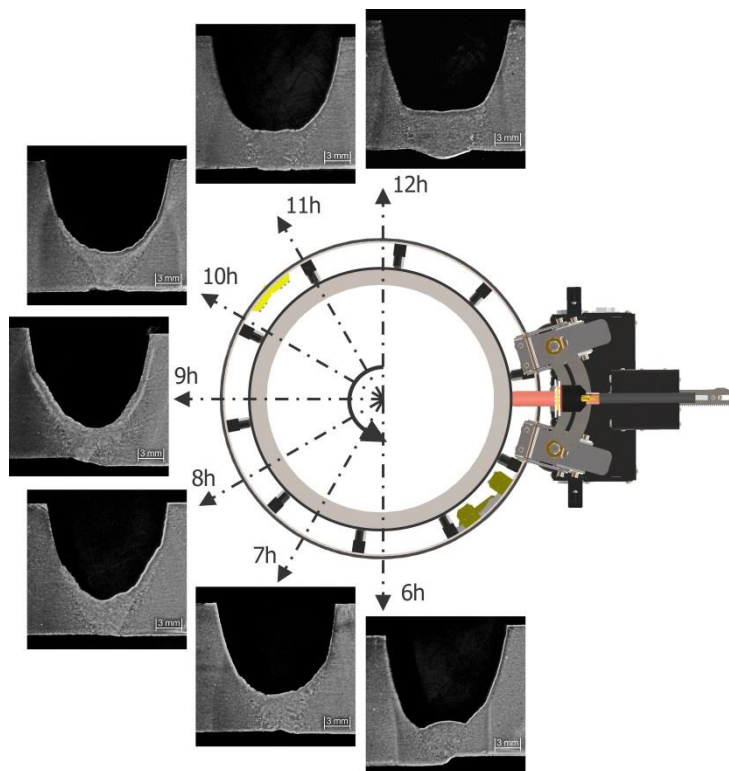


Figura 86. Macrografias transversais. Ensaio 1A.

Nota-se que a junta obteve penetração total em todas as posições, porém com características diferentes. Às 12h, tem-se um reforço na face interna da raiz. Uma explicação diz respeito ao fato das forças gravitacional e eletromagnética possuírem a mesma direção e sentido quando a soldagem é realizada na posição plana, conforme sugerido por Shirali e Mills [59]. As posições seguintes não apresentaram reforço, uma vez que a força gravitacional deixou de atuar contra a poça, sendo decomposta em outras direções. Neste caso, a solda apresentou o mesmo nível em relação à parede do tubo. Às 7h, constata-se a presença de uma pequena concavidade e às 6h, um desnivelamento mais acentuado. Mesmo no desnível, que representa uma situação crítica, a solda obteve penetração total. As discontinuidades avaliadas são aceitáveis, segundo os critérios mostrados na

Tabela 31, para todas as normas. Os resultados das medições encontram-se na Tabela 42.

Tabela 42. Medição do perfil geométrico. Ensaio 1A.

Posição [h]	Reforço (+) ou concavidade (-) da raiz [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura da raiz [mm]	High-Low [mm]
12	1,2	4,3	7,1	0,3
11	0,3	4,1	3,9	0,2
10	-0,3	4,6	2,4	0,0
9	0,2	3,8	1,8	1,1
8	-0,1	4,1	2,5	0,3
7	-0,3	4,4	2,3	0,3
6	-0,1	4,1	1,6	1,0

Posição [h]	Abertura superior [mm]	Área da seção transversal restante para preenchimento [mm ²]
12	15,2	132,3
11	15,0	131,2
10	14,9	125,1
9	14,0	117,9
8	14,2	118,5
7	13,9	117,1
6	14,2	128,6

De forma a verificar a repetitividade do procedimento, com os mesmos parâmetros e com a mesma geometria, a soldagem foi novamente executada. Assim como no ensaio 1A, a face externa apresentou boa aparência superficial. Porém, na face interna, o cordão apresentou dois padrões de geometria, de acordo com a Figura 87. Obteve-se penetração total ao longo de todo o perímetro. Das 12h às 8h, não houve defeitos. Contudo, entre 8h e 7h mordeduras em extensão significativa foram detectadas. Esta descontinuidade mostrou-se presente em todo o segmento analisado. Por este motivo, o corpo de prova não seria aprovado durante a etapa de inspeção.

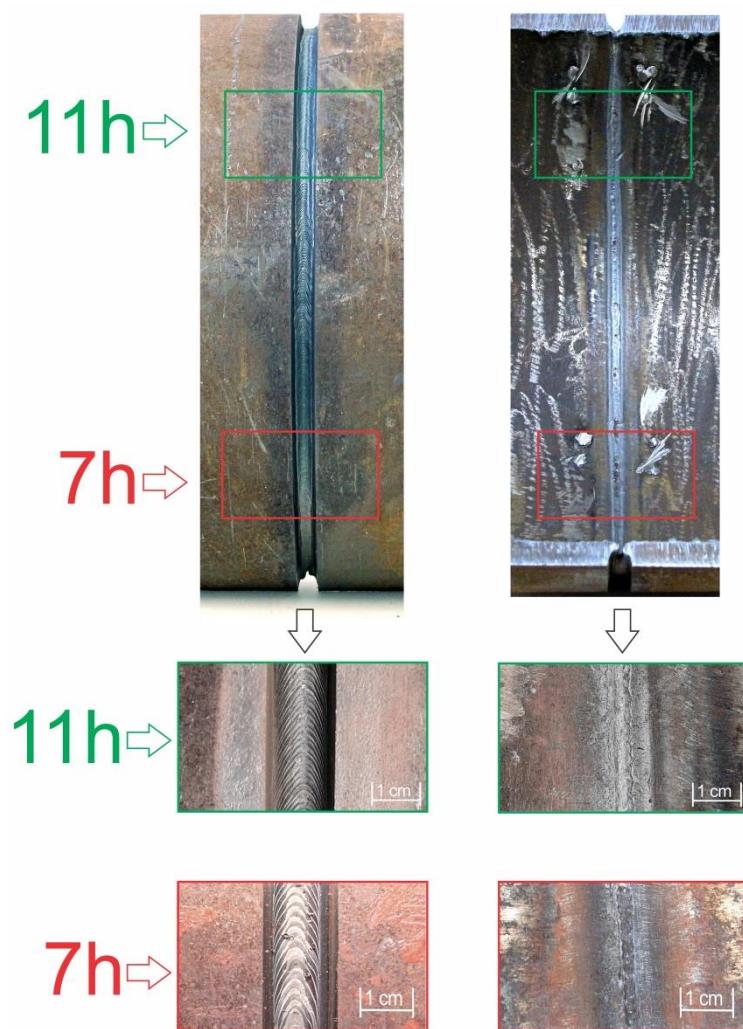


Figura 87. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 1B.

A Figura 88 exhibe as macrografias transversais. Em nenhuma posição foi constatado reforço significativo na face interna da raiz. Às 12h nota-se a presença de um desnível mais acentuado, porém com penetração total, sem concavidade. Das 11h às 8h, a raiz apresentou aproximadamente o mesmo nível em

relação à parede do tubo. Por fim, de forma contrária às demais posições, às 7h e às 6h percebe-se que a raiz é côncava.

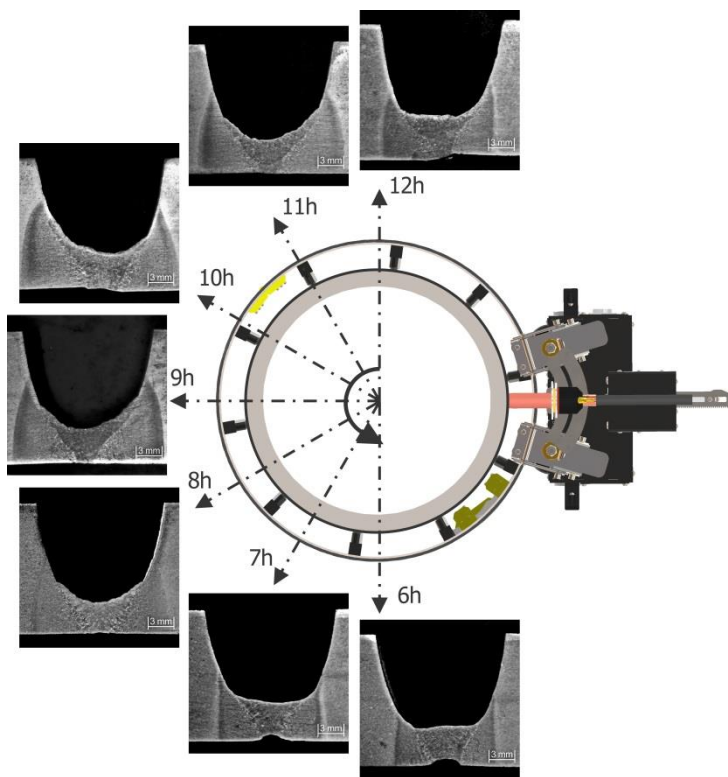


Figura 88. Macrografias transversais. Ensaio 1B.

As medições da Tabela 43 indicam que das 12h às 8h, a concavidade e o desnivelamento seriam aprovados em todas as normas, segundo os critérios mencionados na Tabela 31. Porém, as posições 7h e 6h não atendem aos requisitos da norma ISO 5817 Nível B. Esta norma permite um valor máximo de concavidade de 0,5 mm

Tabela 43. Medição do perfil geométrico. Ensaio 1B.

Posição [h]	Reforço (+) ou concavidade (-) da raiz [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura da raiz [mm]	High-Low [mm]
12	0,1	4,5	1,5	0,7
11	0,1	3,9	1,5	0,1
10	-0,1	4,1	3,3	0,5
9	0,1	4,0	1,7	0,1
8	0,1	3,5	2,1	0,0
7	-0,8	4,5	1,8	0,0
6	-0,9	3,6	3,0	0,1

Posição [h]	Abertura superior [mm]	Área da seção transversal restante para preenchimento [mm ²]
12	14,3	128,2
11	15,1	131,6
10	15,2	128,8
9	15,5	139,0
8	15,3	141,7
7	15,7	141,2
6	15,4	140,7

O primeiro ensaio demonstrou que é possível obter uma solda com penetração total em 3 mm de espessura de nariz, utilizando-se o processo com alimentação dinâmica para garantir a estabilidade. A velocidade média de soldagem foi de 16 cm/min, superior à utilizada por Chowdary (5,6 cm/min) [14] e por Pigozzo (10 cm/min) [16] com o processo TIG convencional. O corpo de prova resultante do ensaio 1A atende aos requisitos da norma API 1104 e ISO 5817. Porém, os resultados não se repetiram no ensaio 1B. As mordeduras encontradas a partir das 8h, juntamente com as concavidades, impedem o cumprimento dos critérios estabelecidos. Foi comprovado o fato da região entre 8h e 6h, relativa à posição sobre cabeça, ser a mais difícil de soldar. Isto abrange tanto as questões operacionais de maior probabilidade de contaminação do eletrodo se o condúite possuir algum grau de dobramento, quanto a obtenção da qualidade requerida.

4.2.2.b Ensaio 2 (A e B)

O segundo ensaio foi destinado à soldagem em chanfros mais estreitos. Para isto, a abertura superior foi alterada de 15 mm (ensaios 1A e 1B) para 11mm (ensaio 2A), e posteriormente para 9 mm (ensaio 2B). O principal benefício consiste na redução da área da seção transversal restante para preenchimento. Além de exigir menos material para completar a junta, contribui de forma significativa para a diminuição do tempo total de operação, devido à menor quantidade de passes. A Tabela 44 exibe as medições dos parâmetros elétricos.

Tabela 44. Parâmetros elétricos medidos referentes ao segundo ensaio orbital com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	469/153
Tempo (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	13,0/8,3

Os oscilogramas de corrente e tensão encontram-se na Figura 89 e na Figura 90, respectivamente. Os chanfros utilizados exigiram uma nova parametrização, com maior corrente de pulso e de base, assim como maiores velocidades de soldagem nos diferentes setores.

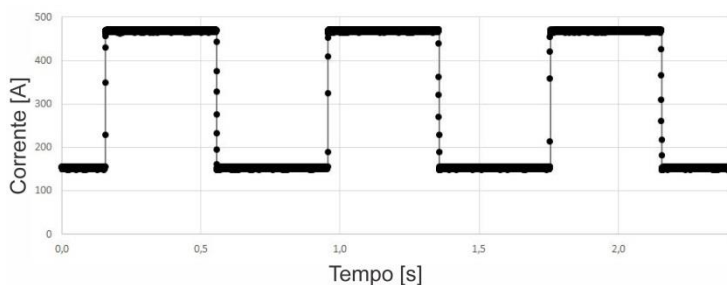


Figura 89. Oscilograma de corrente. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

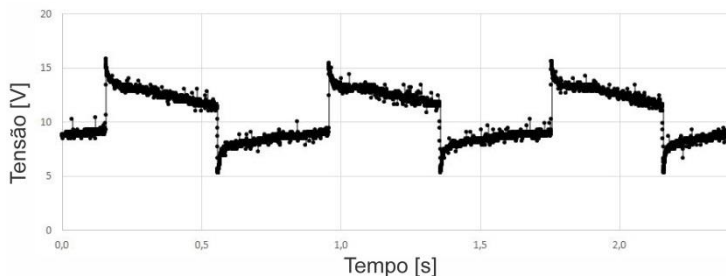


Figura 90. Oscilograma de tensão. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Devido à maior dificuldade de obter penetração total ao longo de toda a junta, a velocidade de arame foi reduzida de 0,55 m/min, valor utilizado no primeiro ensaio, para 0,34 m/min. A Tabela 45 exibe os valores médios de deslocamento, tempo e velocidade medidos.

Tabela 45. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Frequência de 1,25 Hz. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Sistema de medição desenvolvido	Avanço	Recuo	Resultante
Deslocamento [mm]	9,8	5,4	4,4
Tempo [s]	0,460	0,335	0,795
Velocidade média [m/min]	-	-	0,34

A redução na velocidade média de alimentação foi alcançada ao regular menores valores para os patamares de avanço e recuo. No primeiro ensaio, a velocidade de avanço era de 3,00 m/min, e a de recuo, de 2,25 m/min. No segundo, o avanço passou a ser de 2,70 m/min e o recuo de 2,00 m/min, de acordo com o gráfico de velocidade x tempo da Figura 91.

Cabe ressaltar que a soldagem foi executada atentando-se à disposição do conduíte, mantido em linha reta. Desta forma, evitou-se os tempos de parada de arame prolongados que pudessem causar o modo de transferência intermitente e prejudicar a estabilidade do processo.

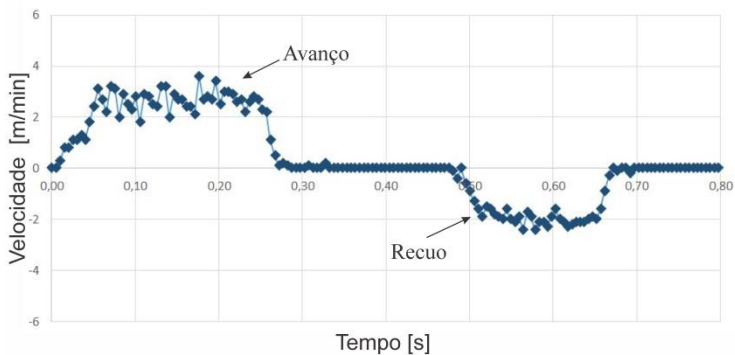


Figura 91. Gráfico de velocidade x tempo, gerado com o sistema de medição desenvolvido. Segundo ensaio orbital 180° com alimentação dinâmica e progressão descendente.

Na avaliação visual da face externa não foram identificados defeitos, assim como no primeiro ensaio. Com relação à face interna, o procedimento conferiu penetração total, mas com mordeduras ao longo de toda a extensão da solda. Na Figura 92, comparando-se a amostra extraída entre 12h e 11h com a amostra extraída entre 9h e 8h, percebe-se que nesta última as mordeduras se apresentaram de forma mais crítica. Logo, este corpo de prova não seria aprovado durante a etapa de inspeção.

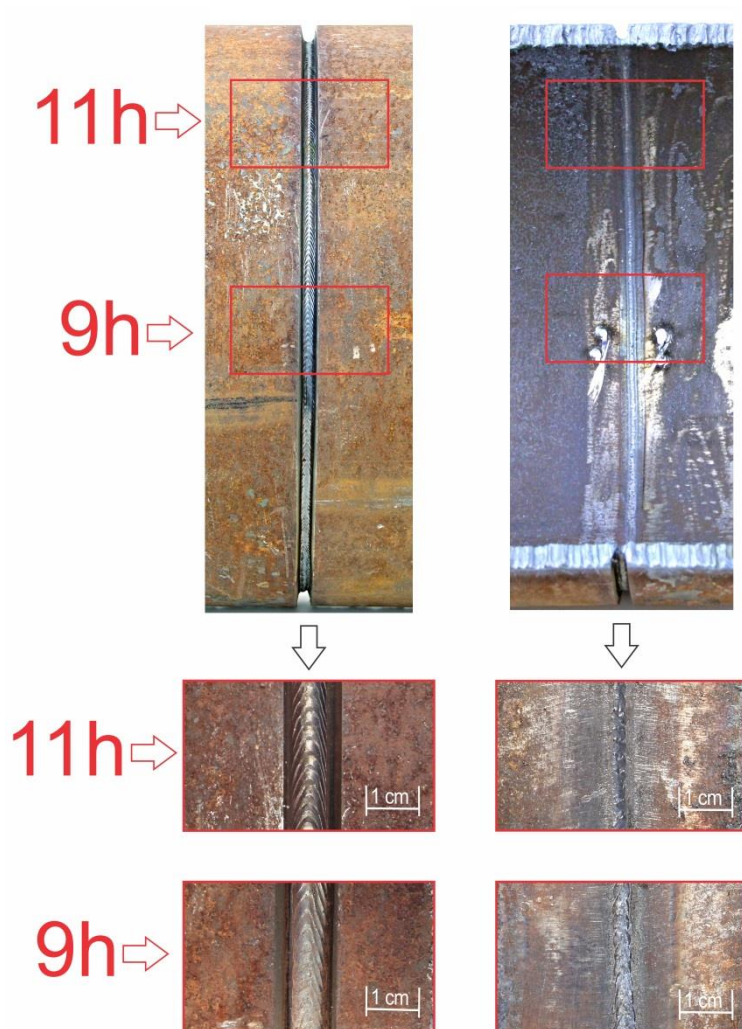


Figura 92. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 2A.

A Figura 93 exibe as macrografias transversais. O desnível esteve presente em todas as amostras, mas apesar disso, houve penetração total. A concavidade e o desnivelamento deste ensaio estão dentro dos limites de aceitação das normas apresentadas na Tabela 31, com exceção da ISO 5817 Nível B, devido à posição 8h. As medições referentes ao perfil geométrico encontram-se na Tabela 46.

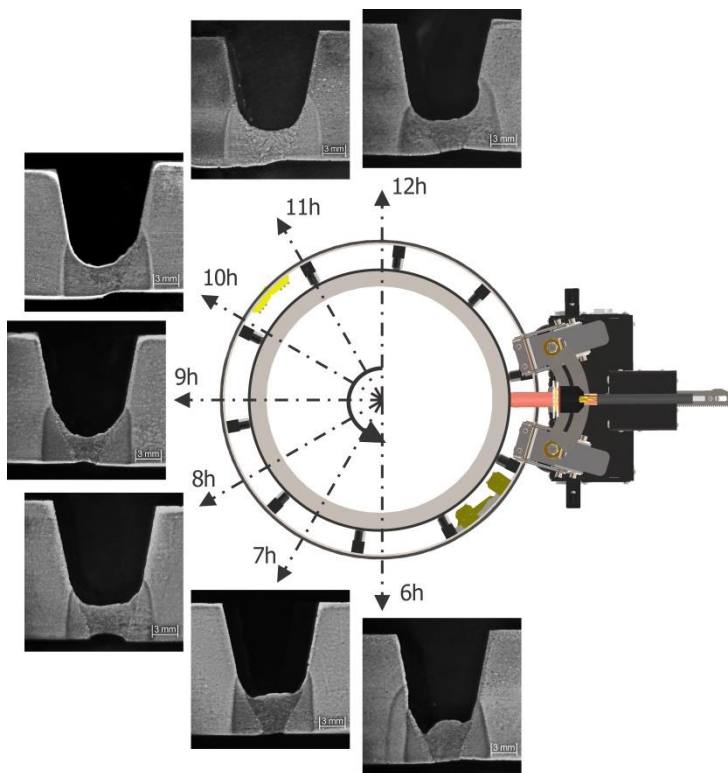


Figura 93. Macrografias transversais. Ensaio 2A.

Tabela 46. Medição do perfil geométrico. Ensaio 2A.

Posição [h]	Reforço (+) ou concavidade (-) da raiz [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura da raiz [mm]	High-Low [mm]
12	0,1	3,6	2,8	0,8
11	-0,1	4,0	3,1	0,7
10	-0,1	3,0	2,2	0,8
9	-0,3	2,9	2,5	0,4
8	-0,9	3,3	4,2	0,3
7	-0,2	4,0	2,6	0,2
6	0,0	4,0	3,0	0,4

Posição [h]	Abertura superior [mm]	Área da seção transversal restante para preenchimento [mm ²]
12	11,0	102,4
11	12,1	124,6
10	11,3	105,6
9	11,6	107,2
8	12,3	119,7
7	11,3	100,0
6	11,2	101,0

Os mesmos parâmetros de soldagem do ensaio 2A foram utilizados para a soldagem em um chanfro com 9 mm de abertura superior, identificado como ensaio 2B. Esta geometria concerne à de menor área de seção transversal dentre todas as testadas no presente trabalho, e portanto requer menos passes para completar o preenchimento. Por outro lado, apresentou maior dificuldade de alinhamento. Uma pequena oscilação fora dos limites impostos poderia levar à contaminação do eletrodo, após sua colisão contra uma das paredes do chanfro.

O aspecto superficial externo e interno da raiz é mostrado na Figura 94. Novamente, a parte externa exibiu um padrão adequado. Internamente, os requisitos de qualidade foram cumpridos até as 7h, conforme evidenciado pelo trecho que abrange as posições de 8h às 7h. Nesta porção, além de obter penetração total, não foi detectada a presença de descontinuidades em proporções significativas. Após as 7h, constatou-se a presença de mordeduras, de acordo com o segmento analisado. A extensão observada é superior à permitida pelas normas da Tabela 31.

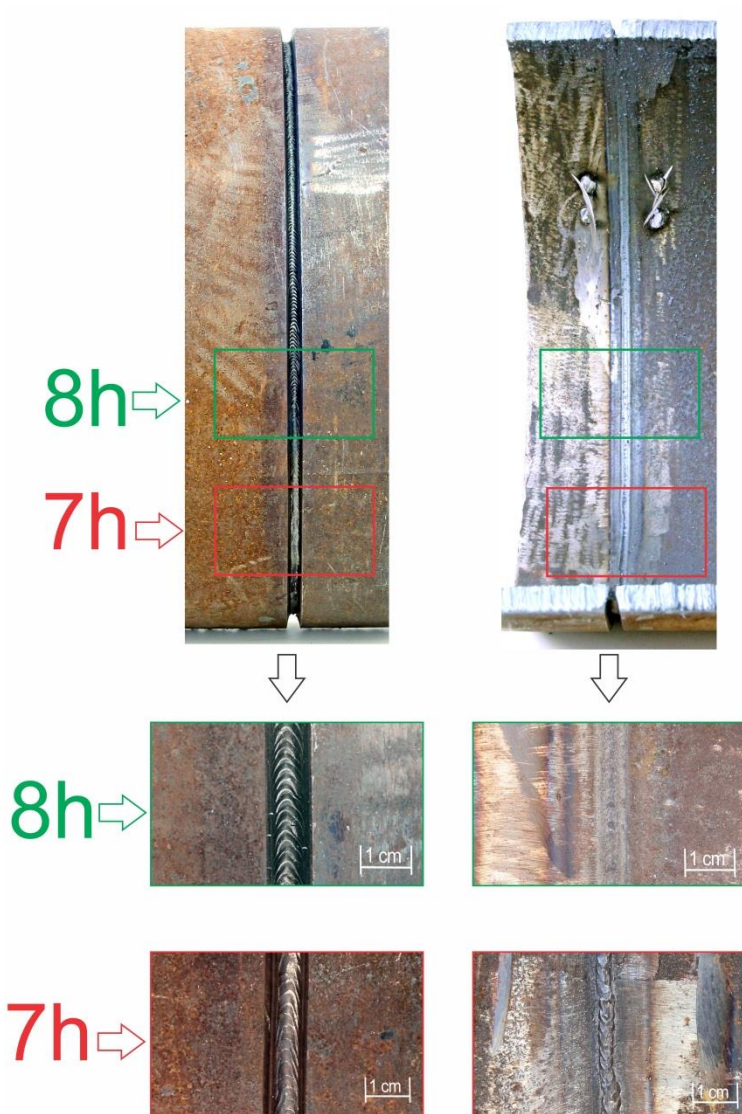


Figura 94. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio 2B.

As macrografias da Figura 95 evidenciam um resultado satisfatório em termos de concavidade e desnivelamento para as soldas entre as posições 12h e 8h. A partir das 8h, a concavidade

medida não seria aprovada segundo os requisitos da norma ISO 5817 Nível B, porém se insere nos limites impostos pelas demais normas. As medições referentes ao perfil geométrico encontram-se na Tabela 47.

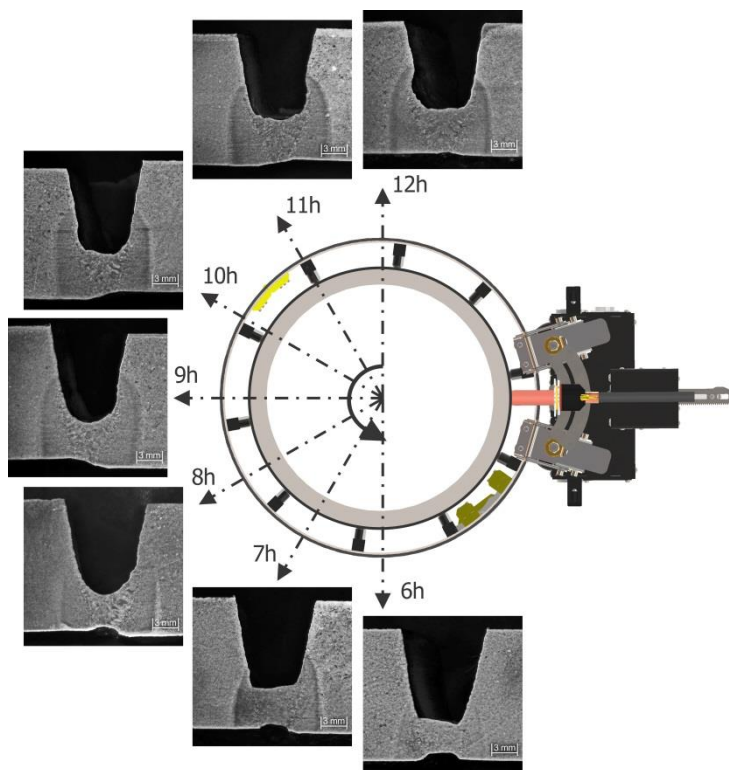


Figura 95. Macrografias transversais. Ensaio 2B.

Tabela 47. Medição do perfil geométrico. Ensaio 2B.

Posição [h]	Reforço (+) ou concavidade (-) da raiz [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura da raiz [mm]	High-Low [mm]
12	-0,2	5,3	1,9	0,3
11	0,0	4,9	1,9	0,8
10	0,1	4,7	2,5	1,0
9	-0,1	4,6	3,0	1,3
8	-0,7	3,8	2,4	0,8
7	-0,7	4,3	3,7	0,6
6	-0,9	3,7	3,8	0,2

Posição [h]	Abertura superior [mm]	Área da seção transversal restante para preenchimento [mm ²]
12	9,3	74,7
11	9,2	77,0
10	8,9	73,3
9	9,0	74,7
8	9,8	80,5
7	9,5	78,5
6	10,1	85,9

Os resultados do segundo ensaio provaram a viabilidade de obtenção de penetração total em dois chanfros estreitos, com 11 mm (ensaio 2A) e 9 mm (ensaio 2B) de abertura, respectivamente, e 3 mm de espessura de nariz. A velocidade média de soldagem foi de 27,8 cm/min, superior à utilizada por Chowdary (5,6 cm/min) [14] e por Pigozzo (10 cm/min) [16] com o processo TIG convencional, e similar à utilizada por Sartori (29,5 cm/min) [17], com o processo MIG/MAG CCC. No entanto, os corpos de prova não atendem plenamente aos requisitos presentes nas normas, principalmente em razão das mordeduras e concavidades presentes na posição sobre cabeça.

4.2.3 Ensaios orbitais 180° com o processo convencional

Com o objetivo de verificar a viabilidade da soldagem com espessura de nariz de 3 mm e chanfro estreito com o processo convencional, dois ensaios foram propostos. No primeiro deles, a relação entre velocidade de alimentação e energia foi mantida. No segundo, optou-se por soldar com a mesma velocidade utilizada nos processos com alimentação dinâmica, de 0,34 m/min. A Tabela 48 exibe as medições dos parâmetros elétricos, semelhantes aos do ensaio 2A.

Tabela 48. Parâmetros elétricos medidos referentes ao ensaio orbital com o processo convencional e progressão descendente.

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem (Pulso/Base)	A	459/151
Tempo (Pulso/Base)	s	0,4/0,4
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	13,7/7,7

4.2.3.a Parametrização respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia

As velocidades de alimentação calculadas segundo o gráfico da Figura 54 garantem o modo de transferência em ponte. As medições da Tabela 49 indicam que os valores regulados foram ligeiramente diferentes dos reais. Esta pequena diferença não influencia na estabilidade.

Tabela 49. Valores médios de velocidade de alimentação nos diferentes setores. Primeiro ensaio orbital 180° com o processo convencional e progressão descendente.

Parâmetro	Unidade	Valor
Velocidade de alimentação (Pulso/Base - 12h às 10h)	m/min	1,4/0,5
Velocidade de alimentação (Pulso/Base - 10h às 8h)	m/min	1,4/0,5
Velocidade de alimentação (Pulso/Base - 8h às 6h)	m/min	1,4/0,5

O aspecto superficial interno mostrado na Figura 96 comprova que não houve penetração total na maior parte do tubo. Isto ocorreu devido à absorção da energia do arco pelo arame. O aspecto superficial externo, que na soldagem com alimentação

dinâmica foi satisfatório em todas as situações, neste caso apresentou falta de fusão na região a partir das 9h.

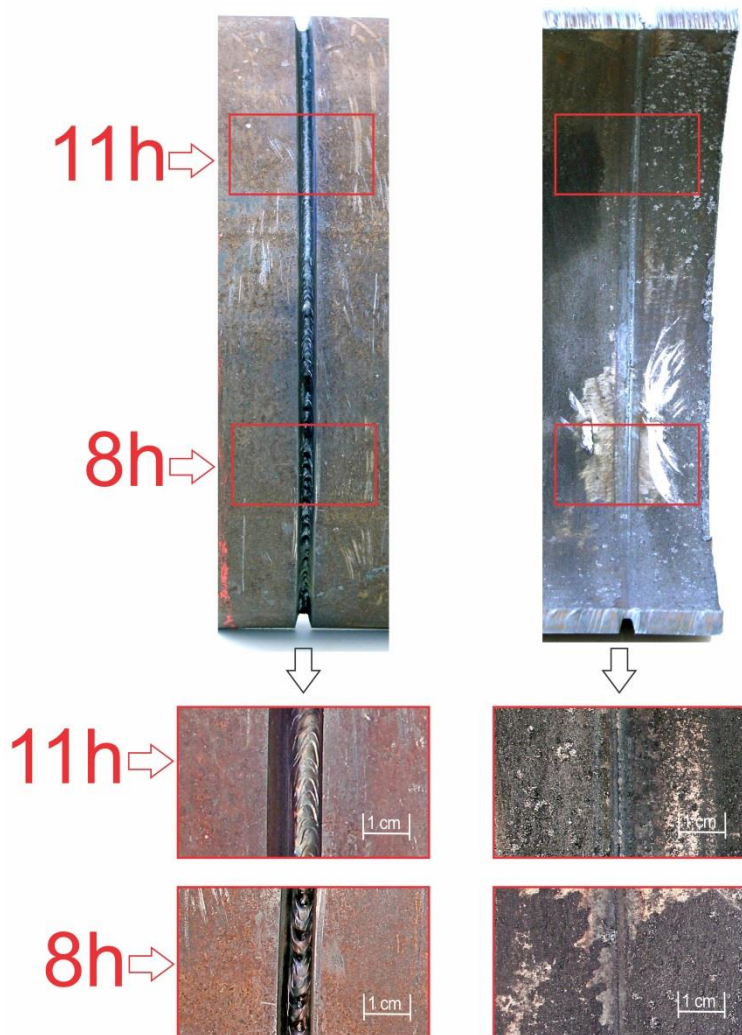


Figura 96. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio com o processo convencional respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia.

Com base nas macrografias da Figura 97, observa-se que apenas as posições 10h, 9h e 6h obtiveram penetração total, com perfil geométrico adequado segundo os critérios previstos nas normas da Tabela 31. As medições encontram-se na Tabela 50.

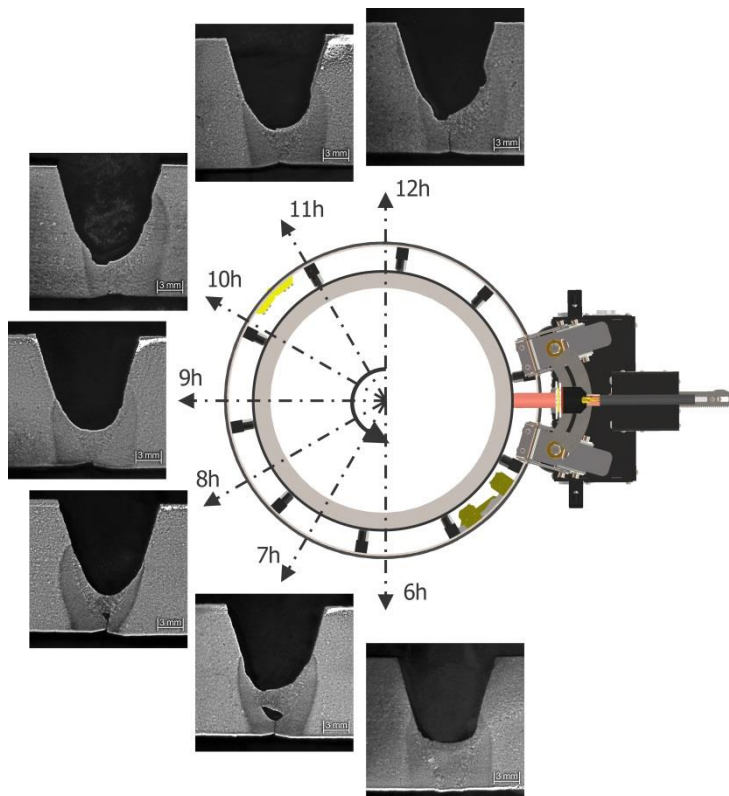


Figura 97. Macrografias transversais. Ensaio com o processo convencional respeitando-se a relação V_a/Pot .

Tabela 50. Medição do perfil geométrico. Ensaio com o processo convencional respeitando-se a relação entre velocidade de alimentação e energia.

Posição [h]	Reforço (+) ou concavidade (-) da raiz [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura da raiz [mm]	High-Low [mm]
10	-0,2	3,3	2,5	0,3
9	-0,2	3,7	1,3	0,3
6	0,4	5,4	3,6	0,0

Posição [h]	Abertura superior [mm]	Área da seção transversal restante para preenchimento [mm ²]
10	12,0	99,5
9	11,9	96,3
6	11,3	86,8

Cabe ressaltar que a principal vantagem deste processo relaciona-se com a facilidade de execução do procedimento. Como o equilíbrio entre a energia do arco e a quantidade de arame é mantido, o operador raramente redireciona o arame.

4.2.3.b Parametrização com velocidade de arame constante e inferior à exigida pela relação entre velocidade de alimentação e energia

Quando a velocidade de alimentação é inferior à necessária para o equilíbrio com a energia do arco, o modo de transferência intermitente é predominante. Neste ensaio foi executada a soldagem com a velocidade de arame da Tabela 51.

Tabela 51. Valores médios de deslocamento, tempo e velocidade. Segundo ensaio orbital 180° com o processo convencional e progressão descendente.

Sistema de medição desenvolvido	Resultante
Deslocamento [mm]	6,2
Tempo [s]	1,000
Velocidade média [m/min]	0,37

A velocidade de 0,37 cm/min ocasiona destacamentos. Porém isto é verdadeiro apenas se o arame incidir na região de maior temperatura do arco. Com o auxílio do direcionador desenvolvido, descrito no item 3.2.8.b, a soldagem foi executada

atentando-se para o posicionamento do arame na extremidade do arco, ou seja, na região de menor temperatura. A Figura 98 evidencia que houve penetração total até as 7h, onde ocorreu uma perfuração. O aspecto superficial externo é adequado, porém o interno apresenta mordeduras, de forma similar ao constatado nos ensaios com alimentação dinâmica.

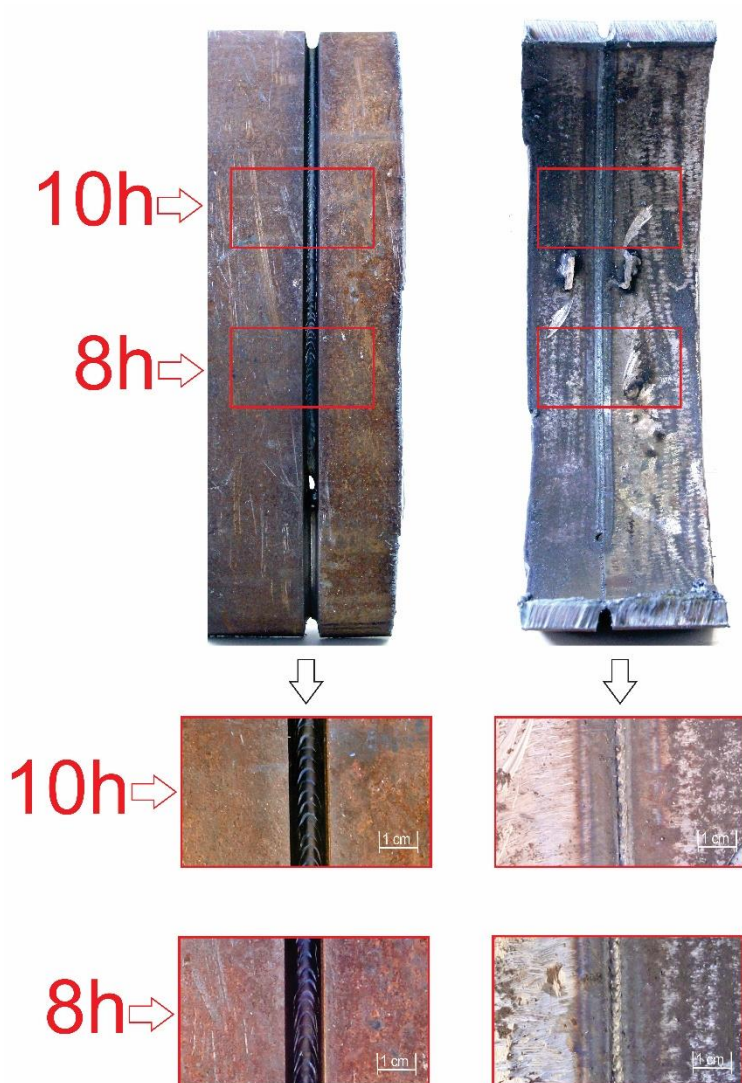


Figura 98. Aspecto superficial externo e interno da raiz. Ensaio com o processo convencional com $V_a = 0,37$ m/min.

A Figura 99 exhibe as macrografias transversais. A concavidade medida encontra-se dentro das tolerâncias previstas pelas normas da Tabela 31, de acordo com a Tabela 52.

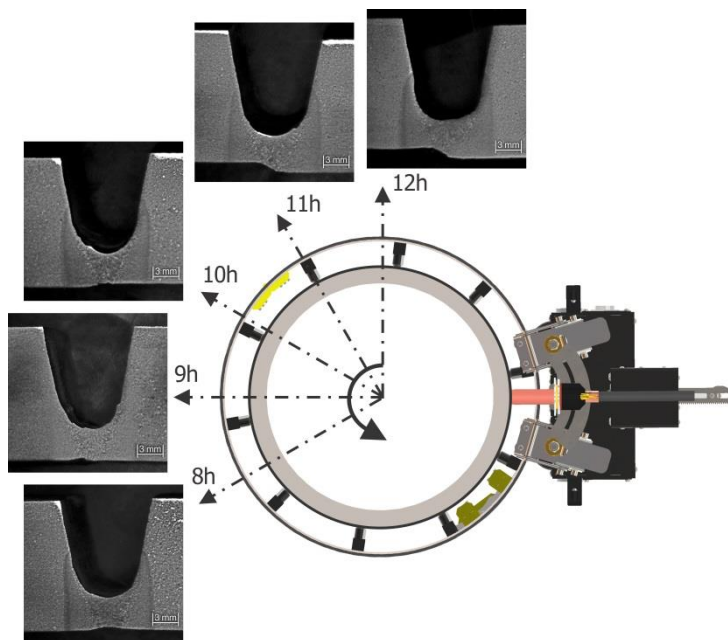


Figura 99. Macrografias transversais. Ensaio com o processo convencional com $V_a = 0,37$ m/min.

Tabela 52. Medição do perfil geométrico. Ensaio com o processo convencional e velocidade de arame inferior à exigida pela relação entre velocidade de alimentação e energia.

Posição [h]	Reforço (+) ou concavidade (-) da raiz [mm]	Dimensão da solda [mm]	Largura da raiz [mm]	High-Low [mm]
12	-0,1	3,7	2,3	1,1
11	-0,1	3,5	2,2	1,2
10	-0,2	3,5	1,4	0,5
9	0,1	3,6	2,0	0,3
8	-0,2	3,5	3,1	0,2

Posição [h]	Abertura superior [mm]	Área da seção transversal restante para preenchimento [mm ²]
12	10,9	101,4
11	10,8	98,9
10	10,1	91,8
9	10,8	97,1
8	10,9	96,3

Diferente do ensaio no qual a relação de equilíbrio foi respeitada, neste caso o operador teve de corrigir de forma frequente a direção do arame para impedir sua entrada em uma região de maior temperatura, que resultasse em destacamentos. Portanto, a soldagem é mais difícil de ser executada em relação ao processo com alimentação dinâmica.

4.2.4 Avaliação dos resultados sob o aspecto de produtividade

O processo de soldagem TIG é tradicionalmente apontado como um processo de baixa produtividade. Contudo, a implementação de pequenos aperfeiçoamentos contribuiu significativamente para a obtenção de maior valor produzido em relação ao valor consumido. A técnica de alimentação dinâmica, utilizada no presente trabalho, representa um aperfeiçoamento desta natureza.

Ao mencionar produtividade, é importante especificar os critérios para sua quantificação. Na Tabela 53 são relacionados seis tópicos associados ao valor produzido. Todos os cálculos foram realizados assumindo-se a espessura de 15 mm e o diâmetro de 16'', já que os trabalhos em questão não utilizaram exatamente o mesmo tubo.

Tabela 53. Critérios utilizados para quantificar a produtividade e seus respectivos valores.

Autor	Tempo 180° [min]	Vs (média) [cm/min]	Dimensão da solda (média) [mm]
TIG – Pigozzo [16]	6,38	10	2,8
TIG – Chowdary [14]	11,40	5,6	-
MIG/MAG - Sartori [17]	2,16	29,5	2,9
TIG - Ensaio 1A	3,99	16	4,2
TIG - Ensaio 1B	3,99	16	4,0
TIG - Ensaio 2A	2,30	27,8	3,5
TIG - Ensaio 2B	2,30	27,8	4,5

Autor	Chanfro [mm²]	Tempo morto	Backing
TIG - Pigozzo [16]	125	*	Não
TIG - Chowdary [14]	181	***	-
MIG/MAG - Sartori [17]	137	**	Não
TIG - Ensaio 1A	139	***	Não
TIG - Ensaio 1B	139	***	Não
TIG - Ensaio 2A	95	***	Não
TIG - Ensaio 2B	75	***	Não

* Reafiação do eletrodo

** Unha e reposicionamento do cabeçote

*** Reafiação do eletrodo, unha e reposicionamento do cabeçote

O tempo para execução do procedimento em 180° é consequência da velocidade de soldagem média (Vs). Os ensaios com alimentação dinâmica alcançaram velocidade de soldagem superior à do TIG convencional. O segundo ensaio atingiu 27,8 cm/min, número que se aproxima do obtido pelo MIG/MAG.

A dimensão da solda (altura da área fundida) no passe de raiz influencia na quantidade total de passes necessários para o preenchimento. Para o mesmo formato de junta, quanto maior a espessura, menos passes são requeridos e menor o tempo total de operação. O ensaio 2B apresentou o maior valor de dimensão dentre todos, ou seja, dos 15 mm de espessura do tubo, 4,5 mm foram soldados no primeiro passe. Este resultado está associado ao aumento da espessura do “nariz”, que usualmente se situava entre 1,6 mm e 2,0 mm, e agora passou para 3,0 mm.

Após o passe de raiz, seguem-se os de preenchimento. Uma junta com chanfro estreito exige menos passes, e portanto, menor tempo de execução. É possível estimar o volume de material necessário a partir da área da seção transversal do chanfro. Com exceção de Chowdary, que optou por um chanfro tipo “V” com espaçamento, todos os demais autores preferiram o chanfro em “U” sem espaçamento. De fato, neste último, a quantidade de material é significativamente menor. No ensaio 2B, em virtude do “nariz” de 3 mm e da abertura superior de 9 mm, a área calculada foi de 75 mm², a menor dentre todas. A dificuldade de acesso exigiu maior atenção por parte do operador de soldagem, mas não ocasionou problemas como porosidade.

Com relação aos tempos mortos, nota-se que os ensaios com alimentação dinâmica não se mostraram vantajosos. Verificou-se grande dificuldade para a realização da soldagem na progressão ascendente, o que tornou inviável um procedimento em órbita completa. Desta forma, torna-se necessário reposicionar o manipulador robótico até a posição inicial e esmerilhar o final do cordão para preparar a transição da junta (“unha”). A reafiação do eletrodo também é exigida em decorrência de seu desgaste e perda das propriedades para emissão termiônica.

A soldagem sem espaçamento entre as peças dispensou o uso de anteparo da poça de fusão (*backing*). Assim, não houve custos adicionais.

Os critérios de tempo de execução do procedimento, dimensão da solda, área da seção transversal do chanfro e necessidade de *backing* atuam a favor do processo com alimentação dinâmica, e o deixa com grande vantagem em relação aos demais.

4.2.5 Avaliação dos resultados sob o aspecto de qualidade

Os resultados obtidos por meio de um processo de soldagem devem ser também avaliados sob o aspecto de qualidade. Para ser aprovada, uma junta não deve apresentar descontinuidades fora das tolerâncias exigidas pelas normas.

Dos quatro ensaios realizados, apenas o Ensaio 1A atende integralmente aos critérios de qualidade estabelecidos por norma, embora em todos os outros ensaios tenha-se conseguido penetração total. Os defeitos detectados foram a presença de mordeduras e concavidade, principalmente na posição sobre cabeça (8h, 7h e 6h). Isto é prejudicial para a integridade da estrutura e influencia diretamente a resistência à fadiga [21].

A seguir são descritos os principais problemas identificados nos ensaios realizados no presente trabalho e as possíveis soluções:

<i>Problema</i>	Presença de mordeduras na região sobre cabeça.
<i>Possível solução</i>	Adicionar gás de purga, utilizar misturas de proteção gasosa de argônio e hélio e alterar o ângulo de inclinação da tocha [21].

<i>Problema</i>	Presença de concavidade e tendência de perfuração na posição sobre cabeça.
<i>Possível solução</i>	Aumentar a velocidade média de alimentação nos setores correspondentes e implementar um formato de onda que inclua um pico de corrente no início da fase de pulso, conforme mostrado na Figura 100, para criar uma maior pressão de arco empurrando a poça na direção do centro do tubo. A utilização de <i>backing</i> também pode contribuir

	para a melhoria dos resultados. Estas medidas atuam em conjunto com as mencionadas acima para a redução das mordeduras.
--	---



Figura 100. Formato de onda com um pico de corrente no início da fase de pulso [31].

<i>Problema</i>	Dificuldade de repetição devido à sensibilidade do processo ao posicionamento da junta.
<i>Possível solução</i>	Aumentar os cuidados durante a etapa de preparação. Após a usinagem do perfil J, deve-se facear o tubo para a remoção das rebarbas. Um pequeno espaçamento decorrente destas rebarbas pode influenciar no comportamento do processo. No total, foram necessárias 63 juntas para a realização deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

- A versão do processo TIG desenvolvida no presente trabalho demonstrou ser flexível diante da regulagem de velocidade de arame. A relação de equilíbrio entre velocidade de alimentação e potência não é um requisito para a obtenção da estabilidade, como no MIG/MAG ou mesmo no TIG com alimentação constante. O arame percorre as isotermas do arco voltaico com uma velocidade de avanço elevada, retornando em seguida. Assim, não há formação prematura de gotas e a transferência ocorre dentro da poça, o que reduz a chance de contaminação do eletrodo de tungstênio em procedimentos de soldagem fora de posição. Existe a possibilidade de adicionar pouco material, o que favorece a penetração e confirma a hipótese inicial.
- A agitação imposta pelo movimento alternativo promoveu uma leve redução da temperatura média da poça, conforme mostrado nos ensaios com câmera térmica, assim como um pequeno aumento da largura do cordão, considerando a mesma velocidade média de arame. Isto ocorreu apesar do arco ter estabelecido contato direto com a poça por maior tempo em relação ao processo com velocidade constante. Uma possível explicação está associada ao fato do arame ter se deslocado para fora do arco voltaico, e perdido calor para o ambiente. Ao retornar, o arame incide na poça com menor temperatura, e ocasiona seu resfriamento. Soma-se a isto o fato de uma parcela do arame adentrar na poça, e não apenas formar uma ponte. Quanto maior a parcela mencionada, que é regulada a partir do deslocamento de avanço, maior é o calor retirado da poça.
- A disposição do conduíte constitui o aspecto operacional mais relevante. Ao utilizar a configuração em linha reta, o arame avança mais e recua mais. Além disso, possui

menor tempo de parada (0,16 s) em relação à configuração com dobramentos (0,26 s). Isto se deve à força necessária para tracionar o arame, que aumenta exponencialmente em função do grau de dobramento. Um tempo de parada de 0,26 s é suficiente para a isoterma de maior temperatura causar o crescimento da gota até o ponto desta destacar por ação da gravidade e contaminar o eletrodo de tungstênio.

- As medições obtidas a partir do sistema de medição desenvolvido convergiram com as resultantes da câmera de alta velocidade para as frequências de oscilação de até 2 Hz. Respeitou-se o princípio físico relativo ao comportamento do movimento de oscilação do arame, ao contrário dos sistemas disponíveis no mercado. Contudo, o formato de onda medido não se mostrou igual ao ideal. As rampas de aceleração e desaceleração, em conjunto com o tempo em que o arame permanece parado constituem as principais divergências.
- As necessidades tecnológicas levantadas constituíram requisitos essenciais para a melhoria do equipamento. Dentre elas destaca-se primeiramente o sincronismo da alimentação de arame de acordo com o estágio de pulsação. Sem esta implementação eletrônica, a adição poderia não ocorrer no momento em que a poça recebe maior energia, ocasionando defeitos no cordão. O desenvolvimento de um novo direcionador de arame também atuou de modo a aprimorar o equipamento. Diferente do dispositivo inicial, que funcionava mediante a alteração do ângulo, o projeto proposto é baseado na correção a partir de três eixos de translação. Desta forma, foi possível modificar com maior eficiência a posição de entrada do arame, impedindo que este fosse inserido fora da poça de fusão. Soma-se a isto o fato de possibilitar o posicionamento exato do arame na extremidade do arco voltaico, reduzindo assim a probabilidade de destacamentos e consequente instabilidade quando pouco material é adicionado.

- Diante dos critérios estabelecidos para quantificar a produtividade, o processo com alimentação dinâmica demonstrou ser vantajoso ao obter penetração total em 3 mm de espessura de “nariz”, com elevada velocidade de soldagem (27,8 cm/min, similar à obtida com o MIG/MAG, de 29,5 cm/min e muito maior que a do TIG convencional, de 10 cm/min), grande dimensão de solda (4,5 mm, superior à do MIG/MAG, de 2,9 mm, e à do TIG convencional, de 2,8 mm) e chanfro estreito (abertura superior de 9 mm). Os resultados acima não foram verificados com o processo convencional ao se manter a relação de velocidade de arame / potência (v_a/Pot), uma vez que neste caso parte significativa da energia do arco é destinada à fusão do arame para garantir o modo de transferência em ponte. Ao adicionar a mesma quantidade de material, porém com velocidade constante e direcionando o arame na extremidade do arco, resultados similares foram alcançados. Contudo, esta técnica demanda frequente correção do operador para evitar a entrada de arame na região de maior temperatura do arco, onde causa destacamentos.
- Embora tenha resultado em penetração total, observou-se que algumas juntas não cumpriram todos os critérios prescritos pelas normas internacionais de forma repetitiva. Na posição sobre cabeça (8h, 7h e 6h) identificou-se a presença de algumas discontinuidades como concavidade e mordedura. Adicionalmente, nos ensaios realizados no âmbito do presente momento não se logrou bons resultados para a soldagem na progressão ascendente, o que não permite a execução de um procedimento em 360°.
- Tendo em vista o grande potencial da soldagem orbital sob o ponto de vista de produtividade, entende-se ser oportuno dar sequência ao aprimoramento do processo em outros trabalhos de pesquisa, de forma a superar as limitações observadas até o presente momento.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho constituem um marco inicial para o desenvolvimento de processos de soldagem orbital com alimentação dinâmica de arame. Tendo em vista o potencial da alimentação dinâmica no processo TIG, são aqui apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, consideradas dignas de um mestrado:

- Embora o presente trabalho tenha se concentrado na realização do passe de raiz, a soldagem orbital de uma tubulação com parede espessa só estará completa com a realização dos passes de enchimento e acabamento. Em configurações de junta estreita, como a apresentada neste trabalho, a grande dificuldade associada está com a maior tendência de falta de fusão nas laterais do chanfro. Diante disto e aproveitando-se da flexibilidade entre velocidade de alimentação e potência alcançada pelo TIG com alimentação dinâmica em baixa frequência, uma proposta para o desenvolvimento de um trabalho futuro diz respeito ao estudo e implementação de estratégias para utilização dessa versão do processo TIG também nos passes de enchimento. A perspectiva inicial é de que, com a possibilidade de introdução de uma menor quantidade de arame, a energia pode ser melhor direcionada para a fusão das laterais do chanfro, reduzindo assim a tendência de defeitos.
- Como forma de comparar os resultados alcançados no presente trabalho em termos de produtividade e robustez, outra proposta está no desenvolvimento de um sólido conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos no processo TIG com alimentação dinâmica em alta frequência (TIP TIG), com vistas a aplicações de soldagem orbital de tubos. Várias são as vantagens associadas a essa versão do processo que não estão fisicamente comprovadas, o que justifica a necessidade de um estudo aprofundado para investigação da real influência da movimentação dinâmica do arame sobre os resultados.

Em adição, com base numa ampla reflexão sobre as dificuldades encontradas, são propostos também algumas atividades, que visam o aperfeiçoamento do processo e dos procedimentos apresentados neste trabalho, sob o ponto de vista de robustez e confiabilidade, assim como o melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos:

- Melhorar a eficiência do sistema de alimentação de modo a reduzir ao máximo a influência do dobramento do conduíte sobre a velocidade de arame. Uma alternativa diz respeito ao uso de um tracionador próximo da tocha, que funcione com uma bobina mais leve, de 1 kg por exemplo. De forma complementar, algoritmos de controle com realimentação de dados que identifiquem quando o arame está dentro ou fora do arco a partir da leitura da tensão, além de conduítes com menor coeficiente de atrito, podem reduzir o tempo em que o arame permanece parado, diminuindo a tendência de contaminação do eletrodo de tungstênio.
- Aperfeiçoar a integração do manipulador robótico com o cabeçote alimentador, com a implementação da possibilidade de se configurar diferentes velocidades de arame resultante e frequências de acordo com as mudanças na posição de soldagem.
- Avaliar o uso de gás de proteção adicional (purga), como uma possibilidade de redução na incidência de defeitos.
- Conceber novos formatos de onda que reduzam a concavidade interna da raiz na posição sobre cabeça, como por exemplo a imposição de um pico de corrente no início da fase de pulso.
- Avaliar a influência de diferentes ângulos de inclinação da tocha em aplicações de soldagem orbital, e implementar no manipulador robótico um sistema que permita sua variação durante a soldagem. Um procedimento em órbita completa poderia ser viável com o uso desta técnica. Pode também ser uma alternativa para a correção dos problemas de mordedura.

REFERÊNCIAS

- [1] DELGADO, L.C. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame.** 2000. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [2] HOUAISS – Dicionário Online de Português.
Disponível em:
<http://www.dicio.com.br/houaiss>
Acesso em: 18/06/2015
- [3] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano decenal de expansão de energia 2024.**
Disponível em:
<<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>
Acesso em: 26/05/2016.
- [4] PETROBRAS. **Fatos e Dados: Entenda o caminho do petróleo.**
Disponível em:
<<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/entenda-o-caminho-do-petroleo.htm>>
Acesso em: 17/09/2016.
- [5] ILOS. **País precisa investir R\$ 8 bi em dutos.**
Disponível em:
<<http://www.ilos.com.br/web/pais-precisa-investir-r-8-bi-em-rede-de-dutos/>>.
Acesso em: 26/05/2016.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2015.**
Disponível em:
<www.anp.gov.br/?dw=78135>.
Acesso em: 26/05/2016.

- [7] CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total no Estilo Japonês**. 9. ed. Nova Lima: Editora Falconi, 2014. 286 p.
- [8] KRUGMAN, P. **The age of diminished expectations: U.S economic policy in the 1990s**. 3. ed. The MIT Press, 1997. 244 p.
- [9] PERRY, M. J. **Today manufacturing day, so let's recognize america's world-class manufacturing sector and factory workers**.
Disponível em:
<<https://www.aei.org/publication/october-2-is-manufacturing-day-so-lets-recognize-americas-world-class-manufacturing-sector-and-factory-workers/>>
Acesso em: 03/10/2016.
- [10] FOLHA DE S. PAULO. **Um trabalhador americano produz como quatro brasileiros**.
Disponível em:
<<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/05/1635927-1-trabalhador-americano-produz-como-4-brasileiros.shtml>>
Acesso em: 03/10/2016.
- [11] PRAXAIR. **Shielding Gases Selection Manual**.
Disponível em:
< <http://www.praxair.com/>>
Acesso em: 26/10/2016.
- [12] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Welding of Pipelines and Related Facilities – API Standard 1104**. 21. ed. Washington, Sep. 2013. 118 p.
- [13] HENON, B.K.; BROUND, A. Orbital welding beats competition. **Welding Design and Fabrication**, v. 75, p. 28-54, 2002.

- [14] CHOWDARY, B. V.; MAHARAJ, R. R.; LEWIS, W. G. Development of Welding Parameters to Perform Root Pass Welding Using a Mechanized GTAW Process: A Case Study. **The West Indian Journal of Engineering**, v. 32, p. 20-27, 2010.
- [15] SCHWEDERSKY, M.B.; DUTRA, J.C.; OKUYAMA, M.P.; SILVA, R.H.G. Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. **Soldagem e Inspeção**, v. 16, p. 333-340, 2011.
- [16] PIGOZZO, I.O. **Soldagem TIG orbital**: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz. 2014. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [17] SARTORI, F. **Tecnologia e técnicas modernas do processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos**. 2016. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [18] AURES, J.E.V. **Avaliação de processos MIG/MAG derivativos utilizando-se simulador de soldagem de dutos por retificação**. 2013. 151 p. Tese (Doutorado em Sistemas Mecatrônicos) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade de Brasília.
- [19] QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico**. 1. ed. Florianópolis: EDEME, 1979. 248 p.
- [20] MEREDITH, R. **Welding torch**. US Pat. 2274631 A, 24 fev. 1942. 4p.

- [21] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**: welding processes, part 1. 9. ed. Miami: AWS, 2004. v.2. 680 p.
- [22] BRAZILWELDS. **Solda TIG - Soldagem de Tubos em Aço Inox Duplex – Parte 3 de 5 – Soldagem na Obra**.
Disponível em:
<<https://www.youtube.com/watch?v=o7QsIOHbrbQ>>.
Acesso em: 17/09/2016.
- [23] AGA. **Fumes and gases**.
Disponível em:
<http://www.aga.lt/internet.lg.lg.ltu.lt/images/AGA%20Fume%20and%20gases%20White%20Paper%20A4%20UK619_101413.pdf>
Acesso em: 26/05/2016.
- [24] WEIZENMANN, G.S. **Desenvolvimento de infraestrutura para o estudo dos efeitos da oscilação longitudinal da tocha de soldagem (switch back) e avaliação de desempenho no processo TIG autógeno**. 2015. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [25] SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C.; SILVA, R. H. G. REISGEN, Uwe; WILLMS, K. Double – Electrode Process Speeds GTAW. **Welding Journal**, v. 94. n. 10, p. 64-67, 2015.
- [26] OLIVARES, E. A. G.; SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. Estudo da Técnica TIG Keyhole por Meio de Análise Comparativo entre Duas Tochas de Alta Produtividade na União de Chapas de Aço Carbono de Meia Espessura. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, p. 262-274, 2015.
- [27] YAPP, D.; BLACKMAN, S.A. Recent developments in high productivity pipeline welding. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXVI, p. 89-97, 2004.

- [28] YUDODIBROTO, B. Y. B.; HERMANS, M. J. M.; HIRATA, Y.; OUDEN, G. den. Influence of filler wire addition on weld pool oscillation during gas tungsten arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.9, p. 163-168, 2004.
- [29] REIS, R.P.; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem plasma**. São Paulo: Artiliber Editora Ltda, 2007, 147p.
- [30] KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002. 461 p.
- [31] POLYSOUDE. **The orbital welding handbook**.
Disponível em:
<http://www.polysoude.com/images/stories/documents/english/NEWS/Handbook_orbital_welding_EN.pdf>
Acesso em: 26/05/2016.
- [32] EMW AG. **tigSpeed – More than just a TIG faster**.
Disponível em:
<<https://www.ewm-group.com/en/presse/pressemitteilungen/455-pm-201306-tigspeed-mehr-als-nur-ein-tig-schneller.html>>
Acesso em: 26/05/2016.
- [33] LV, S. X.; XU, Z.W.; WANG, H.T.; YANG, S. Q. Investigation on TIG cladding of copper alloy on steel plate. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 13, p. 10-16, 2008.
- [34] SHINOZAKI, K.; YAMAMOTO, M.; NAGAMITSU Y.; USHIDA, T.; MITSUHATA, K.; NAGASHIMA, T.; KANAZAWA, T.; ARASHIM, H. Melting phenomenon during ultra-high-speed GTA welding method using pulse-heated hot-wire. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, v. 27, p. 22s-26s, 2009.

- [35] TOKAR, A. **Efeito dos parâmetros de pulsação no processo TIG sobre a formação da poça de fusão.** 2011. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [36] LANCASTER, J.F. **The physics of welding.** 2. ed. Oxford: Pergamon Press & International Institute of Welding, 1986. 297 p.
- [37] FORTAIN, J.M; RIMANO, L.; VAIDYA, V. Innovative process improves welding of sheet metal parts. **Welding Journal**, v. 87, p. 38-44, 2008.
- [38] AIR LIQUIDE. **TOP TIG: a new robot welding process for industry.**
Disponível em:
<http://www.airliquidewelding.com/file/otherelement/pj/w000260373_44403.pdf>
Acesso em: 26/05/2016.
- [39] TIP TIG. **The welding revolution.**
Disponível em:
<<http://www.rapidwelding.com/files/99909900.pdf>>
Acesso em: 19/09/2016
- [40] LIBURDI AUTOMATED WELDING SYSTEMS. **Dabber Pro.**
Disponível em: http://www.liburdi.com/docs/welding-services/liburdi-automation/Dabber_Pro.pdf.
Acesso em: 26/05/2016.
- [41] WILSON, M. TIP TIG: new technology for welding. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 34, p. 462-466, 2007.
- [42] HEBERT, P.; PIKE, G.; RICE, D. **Evaluation of the tip tig welding system, a semi-automatic hot wire GTAW process, compared to manual GTAW.** Newport News, 2013. 26 p. (Final Report).

- [43] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of Physics**. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2008. v. 1. 1288 p.
- [44] SPILLE-KOHOFF, A. Arc Welding: From Process Simulation to Structural Mechanics. Part 1: Process Simulation with ANSYS CFX. In: **4th European Automotive Simulation Conference (EASC)**, 2009. Munich. Anais. p. 1-12.
- [45] SHIPILOV, A.V.; EROFEEV, V.A.; POLOSKOV, S.I. Determination of the optimum conditions of melting of filler wire in automatic orbital welding of steel pipes. **Welding International**, v. 27, p. 397-402, 2013.
- [46] RIBEIRO, J.C.B. **Análise de técnicas para soldagem TIG automatizada**. 2012. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [47] FIGUERÔA, D.W.; PIGOZZO, I.O.; SILVA, R.H.G.; SANTOS, T.F.A.; URTIGA FILHO, S.L. Influência da posição e dos parâmetros de soldagem na soldagem TIG orbital aplicada a tubulações de aço baixo carbono. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, p. 446-455, 2015.
- [48] RUDY, J.F. Development and application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for repair of aircraft engine, seal teeth. In: **Proceedings of the ASME International Gas Turbine Conference and Exhibit**, 1982. London.
- [49] TATMAN, J. K.; HICKS, T. G.; MCCRACKEN, S. L. Development of new weld heat input and dilution equations for Gas Tungsten Arc Welding – Part 1. In: **Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping (PVP) Conference**, 2013. Paris.

- [50] FUERSCHBACH, P. W.; KNOROVSKY, G.A. A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding. **Welding Journal**, v. 70, p. 287s-297s, 1991.
- [51] ASM. **Metals Handbook**: Physical properties of carbon and low alloy steels, 10th ed. Russell Township: ASM, 1990. v.1. 2521 p.
- [52] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 586 p.
- [53] KOU, S.; WANG, Y. H. Weld pool convection and its effect. **Welding Research Supplement**, p. 63-s to 70-s, Mar. 1986.
- [54] TRADIA, A; ROGER, F.; GUYOT, J.; LUBINEAU, G. Hybrid 2D-3D modelling of GTA welding with filler wire addition. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, p. 3946-3963, 2012.
- [55] DZELNITZKI, M. D. TIG – Direct-Current Welding with High-Frequency Pulses, an Interesting Process Variant. **2000 EWM HIGHTEC WELDING GmbH**, 2000.
- [56] LANCASTER, J. F. **Metallurgy of welding**. 6. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999. 446 p.
- [57] LÓPEZ, N.; VERGARA, V.; ESPINOSA, A.; CAMUS, M.; DUTRA, J. Estudio del proceso de soldadura GTAW en el modo cold wire. In: **10º Encuentro Internacional de Mantenedores de Plantas Mineras (MAPLA)**, 2013. Santiago. Anais. p. 326-335.
- [58] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Standard Welding Terms and Definitions – AWS 3.0**. 12. ed. Miami, Jul. 2009. 148 p.

- [59] SHIRALI, A.A.; MILLS, C. The effect of welding parameters on penetration in GTA welds. **Welding Research Supplement**. p. 347-s to 353-s, 1993.
- [60] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: welding science and technology**. 9. ed. Miami: AWS, 2001. v.1. 872 p.
- [61] SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; GOHR JR., R. Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 1 de 3: Aspectos Históricos e dos Mecanismos de Fusão do Arame. **Soldagem & Inspeção**. v. 12, p. 237-243, 2007.
- [62] SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; GOHR JR., R. Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. **Soldagem & Inspeção**. v. 13, p. 70-81, 2008.
- [63] MARQUES, C. **Prospecções da natureza física da soldagem MIG automática de ligas de alumínio**. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [64] GONÇALVES JR, A. A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1.ed. Barueri: Manole Ltda, 2008, 408 p.
- [65] LINCOLN ELECTRIC. **Operator’s Manual: Digital Wire Feed Speed Meter**. Disponível em:
<<https://www.lincolnelectric.com/assets/ServiceNavigator-public/LINCOLN3/IM10129.pdf>>
Acesso em: 23/10/2016.

- [66] **COMPUTER WELD TECHNOLOGY. Wire Track: Wire Speed Sensor.**
Disponível em:
< <http://www.cweldtech.com/product-WireTrak.html>>
Acesso em: 23/10/2016.
- [67] **KAMPHUIS, W. P. H. Using optical mouse sensors for sheet position measurement.** Traineeship Report, Dynamics and Control Technology Group, Department Mechanical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven. 2007. 69p.
- [68] **ALCIATORE, D. G.; HISTAND, M. B. Introduction to Mechatronics and Measurement Systems.** 4th ed. New York: Mc Graw Hill, 2012, 553p.
- [69] **CHENEY, W.; KINCAID, D. Numerical Mathematics and Computing.** 6ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2008, 763 p.
- [70] **MIG WELD. Your key to perfect wire transport.**
Disponível em:
http://www.migweld.de/fileadmin/Katalog_2013/Katalog_Drahttransport_2013_E.pdf.
Acesso em: 01/11/2016
- [71] **TENARIS CONFAB. Tubos para Mercado Industrial.**
Disponível em:
<<http://www.tenaris.com/shared/documents/files/CB431.pdf>>
Acesso em: 19/09/2016.
- [72] **PETROBRAS. N-1438 - Terminologia Soldagem .**
Rev. E. Out. 2013. 41 p.
- [73] **PETROBRAS. N-1738 - Descontinuidades em Juntas Soldadas, Fundidos, Forjados e Laminados.** Rev C. Dez. 2011. 24 p.

- [74] KINDERMANN, R. M. **Soldagem orbital do passe de raiz – algoritmos para controle adaptativo por meio de sensoriamento LASER**. 2016. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [75] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.3 - Process Piping**. New York, Dez. 2008. 318 p.
- [76] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5817 - Welding – Fusion – weld joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections**. 2. ed. Switzerland, Out. 2003. 26 p.
- [77] GONZÁLEZ, A. M. R. **Análise e desenvolvimento do processo MIG/MAG duplo arame com potencial único**. 1999. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

APÊNDICE A - MEMORIAL DE CÁLCULO REFERENTE AO BALANÇO DE INCERTEZAS

O procedimento descrito abaixo tem como propósito a obtenção da incerteza expandida da velocidade de alimentação resultante. Dois sistemas de medição foram utilizados: a câmera de alta velocidade, e o transdutor desenvolvido. Para ambas as situações considerou-se o mensurando como variável, com as seguintes fontes de incerteza:

Repetitividade (Re): associada ao desvio padrão amostral, é consequência do fato das medições repetidas não mostrarem sempre o mesmo valor.

Resolução (R): associada à menor divisão de escala ou ao incremento digital, é consequência de arredondamentos.

A.1 - MEDIÇÃO A PARTIR DOS DADOS DA FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE

- **Repetitividade:** calcula-se inicialmente o desvio padrão (u), relativo aos deslocamentos e aos tempos de avanço e recuo.
- **Resolução:** distribuição retangular (uniforme).

Variáveis

Incerteza padrão da repetitividade	
Deslocamento de avanço	u_{Re_da}
Deslocamento de recuo	u_{Re_r}
Tempo de avanço	u_{Re_ta}
Tempo de recuo	u_{Re_tr}
Desvio padrão da repetitividade	
Deslocamento de avanço	u_{da}
Deslocamento de recuo	u_{re}
Tempo de avanço	u_{ta}
Tempo de recuo	u_{tr}

Cálculos	Deslocamento	Tempo
Avanço	$u_{Re_da} = u_{da}$	$u_{Re_ta} = u_{ta}$
Recuo	$u_{Re_dr} = u_{dr}$	$u_{Re_tr} = u_{tr}$

Variáveis

Incerteza padrão da resolução

Deslocamento de avanço	u_{R_da}
Deslocamento de recuo	u_{R_dr}
Tempo de avanço	u_{R_ta}
Tempo de recuo	u_{R_tr}

Resolução

Deslocamento de avanço	R_{da}
Deslocamento de recuo	R_{dr}
Tempo de avanço	R_{ta}
Tempo de recuo	R_{tr}

Cálculos	Deslocamento	Tempo
Avanço	$u_{R_da} = \left(\frac{R_{da}}{2\sqrt{3}} \right)$	$u_{R_ta} = \left(\frac{R_{ta}}{2\sqrt{3}} \right)$
Recuo	$u_{R_dr} = \left(\frac{R_{dr}}{2\sqrt{3}} \right)$	$u_{R_tr} = \left(\frac{R_{tr}}{2\sqrt{3}} \right)$

- Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos: deslocamentos

Variáveis: avanço

Incertezas	
Combinada	u_{C_da}
Padrão da repetitividade	u_{Re_da}
Padrão da resolução	u_{R_da}
Graus de liberdade	
Repetitividade	v_{Re_da}
Resolução	v_{R_da}
Efetivos	v_{ef_da}

Cálculos

$$u_{C_da} = \sqrt{(u_{Re_da})^2 + (u_{R_da})^2}$$

$$\frac{(u_{C_da})^4}{v_{ef_da}} = \frac{(u_{Re_da})^4}{v_{Re_da}} + \frac{(u_{R_da})^4}{v_{R_da}}$$

Variáveis: recuo

Incertezas	
Combinada	u_{C_dr}
Repetitividade	u_{Re_dr}
Padrão da resolução	u_{R_dr}
Graus de liberdade	
Repetitividade	v_{Re_dr}
Resolução	v_{R_dr}
Efetivos	v_{ef_dr}

Cálculos

$$u_{C_dr} = \sqrt{(u_{Re_dr})^2 + (u_{R_dr})^2}$$

$$\frac{(u_{C_dr})^4}{v_{ef_dr}} = \frac{(u_{Re_dr})^4}{v_{Re_dr}} + \frac{(u_{R_dr})^4}{v_{R_dr}}$$

Variáveis: resultante

Incertezas

Combinada: resultante

u_{C_dres}

Combinada: avanço

u_{C_da}

Combinada: recuo

u_{C_dr}

Graus de liberdade

Efetivos: resultante

v_{ef_dres}

Efetivos: avanço

v_{ef_da}

Efetivos: recuo

v_{ef_dr}

Cálculos

$$u_{C_dres} = \sqrt{(u_{C_da})^2 + (u_{C_dr})^2}$$

$$\frac{(u_{C_dres})^4}{v_{ef_dres}} = \frac{(u_{C_da})^4}{v_{ef_da}} + \frac{(u_{C_dr})^4}{v_{ef_dr}}$$

- Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos: tempos

Variáveis: avanço

Incertezas	
Combinada	u_{C_ta}
Padrão da repetitividade	u_{Re_ta}
Padrão da resolução	u_{R_ta}
Graus de liberdade	
Repetitividade	v_{Re_ta}
Resolução	v_{R_ta}
Efetivos	v_{ef_ta}

Cálculos

$$u_{C_ta} = \sqrt{(u_{Re_ta})^2 + (u_{R_ta})^2}$$

$$\frac{(u_{C_ta})^4}{v_{ef_ta}} = \frac{(u_{Re_ta})^4}{v_{Re_ta}} + \frac{(u_{R_ta})^4}{v_{R_ta}}$$

Variáveis: recuo

Incertezas	
Combinada	u_{C_tr}
Padrão da repetitividade	u_{Re_tr}
Padrão da resolução	u_{R_tr}
Graus de liberdade	
Repetitividade	v_{Re_tr}
Resolução	v_{R_tr}
Efetivos	v_{ef_tr}

Cálculos

$$u_{C_tr} = \sqrt{(u_{Re_tr})^2 + (u_{R_tr})^2}$$

$$\frac{(u_{C_tr})^4}{v_{ef_tr}} = \frac{(u_{Re_tr})^4}{v_{Re_tr}} + \frac{(u_{R_tr})^4}{v_{R_tr}}$$

Variáveis: resultante

Incertezas	
Combinada	u_{C_tr}
Padrão da repetitividade	u_{Re_tr}
Padrão da resolução	u_{R_tr}
Graus de liberdade	
Repetitividade	v_{Re_tr}
Resolução	v_{R_tr}
Efetivos	v_{ef_tr}

Cálculos

$$u_{C_tres} = \sqrt{(u_{C_ta})^2 + (u_{C_tr})^2}$$

$$\frac{(u_{C_tres})^4}{v_{ef_tres}} = \frac{(u_{C_ta})^4}{v_{ef_ta}} + \frac{(u_{C_tr})^4}{v_{ef_tr}}$$

- Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos: velocidade média resultante

A velocidade é uma grandeza de medição indireta, obtida a partir do deslocamento e do tempo. Logo, para encontrar sua incerteza combinada, deve-se aplicar o caso geral, de acordo com as equações abaixo:

$$\text{Seja } v = \frac{d}{t}$$

Onde v corresponde à velocidade média resultante, d ao deslocamento resultante, e t ao tempo resultante,

$$u^2(v) = \left(\frac{\partial v}{\partial d} u(d) \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} u(t) \right)^2$$

$$u^2(v) = \left(\frac{1}{t} u(d) \right)^2 + \left(-\frac{d}{t^2} u(t) \right)^2$$

$$u(v) = \sqrt{\left(\frac{1}{t} u(d) \right)^2 + \left(-\frac{d}{t^2} u(t) \right)^2}$$

Variáveis: resultante

Incertezas	
Combinada: deslocamento	u_{C_dres}
Combinada: tempo	u_{C_tres}
Combinada: velocidade	$u(v)$
Graus de liberdade	
Efetivos: deslocamento	v_{ef_dres}
Efetivos: tempo	v_{ef_tres}
Efetivos: velocidade	v_{ef_v}

Cálculos

$$\frac{\left(\frac{u(v)}{v} \right)^4}{v_{ef_v}} = \frac{\left(\frac{u_{C_dres}}{d} \right)^4}{v_{ef_dres}} + \frac{\left(\frac{u_{C_tres}}{t} \right)^4}{v_{ef_tres}}$$

- Incerteza expandida: velocidade média resultante

Encontrar coeficiente t(student) referente a v_{ef_v}

Incerteza expandida

$$U = t(\text{student}) u(v)$$

A.2 - MEDIÇÃO COM O TRANSDUTOR

Neste caso, o procedimento utilizado é análogo ao da medição a partir dos dados da filmagem em alta velocidade. No entanto, deve-se adicionar mais uma etapa de cálculo, já que há uma incerteza relacionada ao mostrador.

Variáveis: resultante

Incertezas	
Combinada: velocidade resultante	u_{C_dres}
Padrão da resolução: velocidade resultante do mostrador	u_{C_tres}
Combinada: velocidade resultante final	$u(v)$
Graus de liberdade	
Efetivos: velocidade resultante	v_{ef_v}
Efetivos: resolução	v_{R_m}
Efetivos: velocidade resultante final	v_{ef_vfinal}

Cálculos

$$\frac{(u(v_final))^4}{v_{ef_vfinal}} = \frac{(u(v))^4}{v_{ef_v}} + \frac{(u_{R_m})}{v_{R_m}}$$

- **Incerteza expandida:** velocidade média resultante final

Encontrar coeficiente $t(\text{student})$ referente a v_{ef_vfinal}

Incerteza expandida

$$U = t(\text{student}) u(v_final)$$

- Observações

No caso do processo com alimentação contínua (0 Hz), todas as variáveis de recuo de arame são nulas.

Os procedimentos descritos acima foram baseados na metodologia apresentada por Gonçalves Jr. e Sousa [64].