

Kauê Correa Riffel

**AVANÇOS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO TIG: TÉCNICAS
INOVADORAS DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME E PROCEDI-
MENTOS AUTOMATIZADOS COMO CONTRIBUIÇÃO PARA
A UNIÃO DE TUBOS INTERNAMENTE CLADEADOS**

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

Florianópolis
2018

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

Riffel, Kauê Correa

AVANÇOS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO TIG: TÉCNICAS INOVADORAS DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME E PROCEDIMENTOS AUTOMATIZADOS COMO CONTRIBUIÇÃO PARA A UNIÃO DE TUBOS INTERNAMENTE CLADEADOS / Kauê Correa Riffel ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, 2018. 172 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

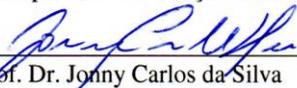
1. Engenharia Mecânica. 2. Processo TIG. 3. Soldagem circunferencial interna. 4. Tubos de aço C Mn cladeados com Inconel 625. 5. Alimentação dinâmica de arame. I. Gonçalves e Silva, Régis Henrique . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Kauê Correa Riffel

**AVANÇOS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO TIG: TÉCNICAS
INOVADORAS DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME E
PROCEDIMENTOS AUTOMATIZADOS COMO
CONTRIBUIÇÃO PARA A UNIÃO DE TUBOS
INTERNAMENTE CLADEADOS**

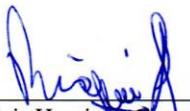
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 09 de Março de 2018.

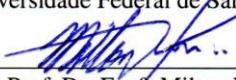


Prof. Dr. Jonny Carlos da Silva
Coordenador do Curso

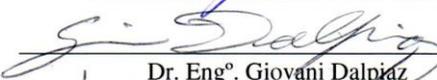
Banca Examinadora:



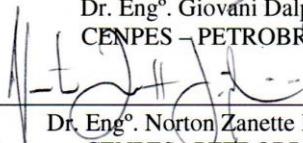
Prof. Dr. Eng.º Régis Henrique Gonçalves e Silva
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



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



Dr. Eng.º Giovanni Dalpiaz
CENPES – PETROBRAS



Dr. Eng.º Norton Zanette Kejelin
CENPES – PETROBRAS

Dedico este trabalho à minha família.
Em especial aos meus pais Dércio e
Sueli, à minha esposa Fernanda e ao
meu irmão Pablo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram direta e indiretamente na construção deste trabalho, o qual foi fruto de grande crescimento pessoal e profissional:

— Ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva pelo conhecimento, contribuições e experiências técnicas transmitidas ao longo do período.

— A toda a equipe administrativa do LABSOLDA, Dr. Eng. Cléber Marques, Prof. Dr. Eng. Mateus Barancelli Schwederky, ao Gerente de Projetos João Facco, pelo suporte técnico e conhecimento transmitido nas atividades realizadas.

— Aos meus amigos e colegas Eng. Rafael Bernardi, Ms. Eng Luiz Eduardo dos Santos Paes, Ms. Eng. Cassiano Godinho, Tec. Cléber Guedes, Ms. Eng. Alberto Bonamigo Viviani, pelo convívio profissional e conhecimentos adquiridos.

— Ao Eng. Rafael Nunes Silva e ao Ms. Eng. Jônathas Alexandre Alves, pela atuação e auxílio em etapas experimentais do trabalho.

— A todos as pessoas, integrantes e ex-integrantes do LABSOLDA com que tive o privilégio de trabalhar e trocar conhecimento: Francisco Sartori, Luciano Cirino, Fernando Costenaro, Gustavo Sousa, Ramon Meller, Mateus Skowronski, Thaffarel Ribas, Felipe Kalil, Mário Nascimento, Hellinton Direne, Renan Kindermann, Prof. Dr. Raul Gohr Jr e Prof^a. Ms. Eng^a. Cleide Marqueze.

— À Fernanda Arend Abreu, pelo apoio e incentivo incondicional nos momentos difíceis. Da mesma forma, à Santina Nelci Arend querida sogra-avó.

— Ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), CAPES e PETROBRAS pelo apoio financeiro.

— Às empresas parceiras do LABSOLDA como a IMC e SPS pelos equipamentos cedidos e apoio técnico.

A persistência é o caminho do êxito.

(Charles Chaplin)

RESUMO

A descoberta de grandes reservas de petróleo, situadas no pré-sal, elevou o posicionamento de Brasil no cenário internacional deste setor. A exploração destas reservas torna-se muito atrativa pelo lado financeiro, porém os poços encontram-se em grandes profundidades de até 7 km abaixo do nível do mar. Devido às cargas maiores e ambientes mais agressivos, surge a necessidade do uso de materiais com alta resistência mecânica. Neste contexto, a aplicação de tubos cladeados fabricados de aços C-Mn, revestidos internamente com ligas de alta resistência à corrosão, como o Inconel 625, tem sido levantada como solução. No método de soldagem tradicional destes tubos, a junta é totalmente preenchida com Inconel 625, que dependendo do substrato gera uma condição conhecida como *undermatching*, pois o metal de solda, com grande teor de níquel, não atinge os requisitos exigidos de resistência mecânica. A alternativa torna-se uma união bilateral externa e interna, permitindo o emprego de consumíveis de aço carbono, no preenchimento da junta, que atendam as propriedades de resistência do substrato. Com este método, o Inconel é depositado pela parte interna da tubulação apenas com o objetivo de garantir a resistência à corrosão da junta. Em vista disto, o presente trabalho tem como objetivo geral o estudo e a aplicação de técnicas do processo TIG para realização da soldagem circunferencial interna com Inconel 625. Também faz parte do trabalho a comparação entre a aplicação das técnicas de alimentação dinâmica e contínua de arame, visando os efeitos sobre a poça de fusão e o desenvolvimento de procedimentos de soldagem robustos. Para tal, os ensaios de soldagem foram divididos em duas etapas. Primeiramente em chapas de aço carbono com e sem revestimento. Estas foram dispostas nas principais posições de soldagem, encontradas em um processo orbital (plana, vertical e sobre cabeça). Durante a soldagem foram realizadas filmagens de monitoramento por vídeo em alta velocidade e termografia. Na segunda etapa, os melhores resultados obtidos na primeira parte, foram reproduzidos em tubos de aço carbono revestidos internamente com Inconel 625. Após, foi realizada uma inspeção visual dos cordões por videoscopia, além do corte da seção transversal das juntas para macrografias. Dos resultados, se indica que a alimentação dinâmica melhora as características de transferência metálica, eliminando a propensão à contaminação do eletrodo para posições fora da plana e, em decorrência de diferenciado comportamento térmico do sistema poça-arame, provê cordões de solda com geometria mais homogênea, possibilitando a execução da

soldagem circunferencial dos tubos em 360° com maior robustez e repetitividade (no processo e na geometria da solda) do que no modo de alimentação contínua.

Palavras-chave: GTAW, Soldagem circunferencial, Técnicas de alimentação de arame, Transferência metálica, Inconel 625.

ABSTRACT

The discovery of large oil reservoirs, under a geological salt layer called pre-salt, raised Brazil in oil overseas oil market. The exploration of these reservoirs becomes very attractive from the financial perspective, but the wells are found about 7 km deep, which create great challenges in oil extraction and transportation. Due to greater loads and hostile environments high performance materials are necessary. In this context, the application of clad pipes made of high mechanical strength steels, internally clad with high corrosion resistant alloys, as Inconel 625, has been used as solution. In the traditional joining weld method of clad pipes, the joint is totally filled with Inconel 625 and depending on steel substrate can result in undermatching condition, since strength requirements are not achieved. In this way, the alternative is a bilateral pipe welding method, allowing the use of steel welding consumables in joint fulfillment passes, which meet the substrate strength properties. With this technique, the Inconel is circumferentially deposited in the pipe internal wall, just with aim of ensure the corrosion resistance. Therefore, the aim of this work is the study and application of TIG welding techniques to accomplish an internal circumferential welding with Inconel 625. The work also compares the use of different wire feed methods as dynamic and continuous wire feed, aiming to verify the effects over the weld pool and the development of a robustness welding process. Thus, the welding tests were divided in two steps. Firstly the welds were carried out in carbon steel plates with and without cladding. These ones were positioned at many welding positions, which are encountered in an orbital process (flat, vertical and overhead). During the welding were carried out tracking filming by high speed camera and thermography. In the second step, the bests results reached in first one were reproduced in internally clad steel pipes. Then, it was realized a weld beads visual inspection by videoscropy, in addition to macrography of the welds transversal section. As results, it is emphasized that dynamic wire feed improves the metallic transfer characteristics, avoiding electrode contamination susceptibility in difficult welding positions and, due to differentiated heat behavior in the weld pool and wire, provide weld beads with good surface appearance and homogeneity, enabling the pipes circumferential welding in 360° with higher robustness and repeatability (in process and weld bead geometry) than continuous wire feed.

Keywords: GTAW, Circumferential welding, Wire feed techniques, Metal transfer, Inconel 625.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização e profundidade das reservas do pré-sal [2,3].	29
Figura 2. Embarcação <i>Technip's Apache</i> para instalação <i>reel-lay</i> [7].	30
Figura 3. Curva tensão-deformação conceito de <i>undermatching</i> e <i>overmatching</i> [9].	31
Figura 4. Soldagem de união em tubos cladeados. Em a) Procedimento orbital; b) Macrografia de junta dissimilar aço C-Mn e Inconel 625. Adaptado de [12,13].	32
Figura 5. Soldagem de peças cladeadas com a utilização de material <i>buffer</i> [15].	33
Figura 6. Soldagem bilateral em tubos revestidos internamente [5,11].	34
Figura 7. Técnicas de soldagem que visam melhorias em determinadas características do processo TIG [22-25].	38
Figura 8. Trincas de solidificação em uniões dissimilares entre aço carbono e ligas à base de níquel [15].	39
Figura 9. Esquemático do processo TIG alimentado.	40
Figura 10. Relação V_a x Potência para $V_s= 10$ cm/min [30].	41
Figura 11. Oscilogramas de corrente e V_a em processo TIG com corrente e arame pulsado [33].	42
Figura 12. Interrupção no contato do arame com a poça no pulso de corrente [33].	42
Figura 13. Aplicação da alimentação dinâmica em turbinas de aeronaves [34].	44
Figura 14. Deposições sobre chapa: alimentação dinâmica X alimentação contínua. Em a) e b) Cordões realizados por Silva[25]; c) e d) Cordões realizados por Silwal [38].	45
Figura 15. Movimento ideal de um corpo em avanço e recuo [32].	46
Figura 16. Movimento real do arame em avanço e recuo para alimentação em baixa frequência [32].	47
Figura 17. Aplicações das técnicas com arame quente e arame frio. Adaptado de [38].	48
Figura 18. Transferências metálicas no processo TIG. Em a) Ponte; b) Intermitente.	49
Figura 19. Esquema do sistema massa-mola-amortecedor presente no mangote no processo de soldagem. Adaptado de [44].	51
Figura 20. Perfil térmico da poça de fusão para 200 A e velocidade de soldagem de 15 cm/min. Em a) Autógeno; b) $V_a= 1,0$ m/min contínua. Adaptado de [49].	53
Figura 21. Perfil térmico da poça obtido por meio de termografia. Em a) Autógeno; b) Alimentação contínua; c) Alimentação dinâmica 1Hz; d) Alimentação dinâmica 2 Hz. Adaptado de [32].	54
Figura 22. Vetores de velocidade na poça de fusão devido à ação de forças individuais. Em a) Força de flutuação; b) Força eletromagnética; c) Força devida à tensão superficial. Adaptado de [51].	55

Figura 23. Simulação computacional de diferentes gradientes de tensão superficial na poça. Em a) Negativo sem a adição de TiO ₂ (mais largo); b) Positivo com adição de TiO ₂ (maior penetração). Adaptado de [52].	56
Figura 24. Equivalência das posições de soldagem em tubos. Adaptado de [56].	57
Figura 25. Equipamentos destinados à soldagem TIG orbital. Em a) Cabeçote TIP TIG; b) Cabeçote AMI [57]; c) Cabeçote de câmara fechada SPS [58].	58
Figura 26. Representação alternativa para soldagem orbital.	59
Figura 27. Esquemático da ação das forças no processo TIG com a variação da posição de soldagem. Adaptado de [59].	60
Figura 28. Vista frontal do chanfro	61
Figura 29. Macrografia das soldas realizadas para avaliação dos chanfros. Em a) 60° de abertura total do chanfro; b) 80° de abertura total do chanfro.	62
Figura 30. Esquema representativo chanfro estreito (<i>à esquerda</i>) e chanfro largo (<i>à direita</i>).	63
Figura 31. Fluxograma de etapas dos ensaios.	65
Figura 32. Equipamentos utilizados nos ensaios: 1) Manipulador Tartílope V4; 2) Fonte de soldagem; 3) IHM do manipulador; 4) Unidade de refrigeração; 5) CPU do manipulador; 6) Sistema de aquisição de dados; 7) IHM do TIP TIG.	66
Figura 33. Direcionador desenvolvido no LABSOLDA para parametrização do processo de soldagem TIG.	68
Figura 34. Corpo de prova utilizado para realização dos ensaios. Em a) Vista oposta ao chanfro V. b) Vista superior do chanfro V	68
Figura 35. Junta para soldagem em chapas de aço carbono sem revestimento para simular apenas uma condição de preenchimento em chanfro V.	69
Figura 36. Junta para soldagem bilateral em chapa caldeada.	70
Figura 37. Perfil de deslocamento da tocha com função sincronismo para o passe de base.	73
Figura 38. Perfil de deslocamento da tocha com função sincronismo para o passe de acabamento.	74
Figura 39. Filmagem termográfica e de monitoramento.	77
Figura 40. Posicionamento da câmera para filmagem em alta velocidade.	78
Figura 41. <i>Grid</i> para quantificar a movimentação do arame na técnica de alimentação dinâmica.	79
Figura 42. Bancada para soldagem circunferencial interna	80
Figura 43. Fonte de soldagem Modelo 227 [57].	81
Figura 44. Videoscópio para inspeção de superfícies [66].	81
Figura 45. Serra de tubos Super D.	82
Figura 46. Projeto de junta para união de tubo e chapas cladeadas. Em a) Anel de tubo usinado; b) Junta para união bilateral.	83
Figura 47. Conduíte externo ligando o cabeçote AMI com o alimentador do TIP TIG.	84
Figura 48. Aspecto superficial para C1. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) sobre cabeça.	86
Figura 49. Sinais de corrente e tensão para C1.	87

Figura 50. Aspecto superficial passe de base na sobre cabeça para C3.	88
Figura 51. Sinais de corrente e tensão para C3 em conjunto com o comportamento da transferência metálica durante a soldagem.	89
Figura 52. Soldagem em chapas cladeadas, aspecto superficial e macrografias para C4. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) Plana; d) Sobre cabeça.	91
Figura 53. Sinais de corrente e tensão no passe de base para C4 em conjunto com o comportamento da transferência metálica.	92
Figura 54. Sinais de corrente e tensão para o passe de acabamento para C4.	93
Figura 55. Comportamento da transferência metálica com a mudança na posição de soldagem. Em a) Posição plana; b) Posição sobre cabeça.	94
Figura 56. Aspecto superficial da condição C5 para posição sobre cabeça.	95
Figura 57. Soldagem em chapas cladeadas, aspecto superficial C7. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) Plana; d) Sobre cabeça.	96
Figura 58. Aspecto superficial referente à condição C8 na posição sobre cabeça.	97
Figura 59. Soldagem em chapas cladeadas, aspecto superficial C9. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) Plana; d) Sobre cabeça.	98
Figura 60. Sequência de quadros da filmagem do passe de base para C7.	99
Figura 61. Ação da tensão superficial durante o recuo do arme no processo com alimentação dinâmica.	99
Figura 62. Período de movimentação do arame para C7.	101
Figura 63. Períodos de movimentação do arame para C9.	102
Figura 64. Sinais de corrente e tensão no passe de base para a posição vertical ascendente.	103
Figura 65. Sinais de corrente e tensão no passe de base posição vertical descendente.	104
Figura 66. Filmagem em alta velocidade do processo TIG pulsado com alimentação dinâmica. Em a) Posição vertical ascendente; b) Posição vertical descendente.	105
Figura 67. Gota maior que as normalmente observadas.	106
Figura 68. Espectro termográfico por trás da chapa. Em a) Alimentação contínua; b) Alimentação dinâmica.	107
Figura 69. Perfil térmico transversal filmagem por trás da chapa.	107
Figura 70. Perfil térmico longitudinal filmagem por trás da chapa.	109
Figura 71. Espectro termográfico da superfície da poça. Em a) Alimentação contínua; b) Alimentação dinâmica.	110
Figura 72. Perfil térmico longitudinal filmagem por cima da chapa.	111
Figura 73. Deposição sobre chapa. Em a) Alimentação dinâmica filetado; b) Alimentação constante filetado.	112
Figura 74. Deposição sobre chapa. Em a) Alimentação contínua nível alto de energia (A); b) Alimentação dinâmica nível alto de energia (B); c) Alimentação contínua nível baixo de energia (C); d) Alimentação dinâmica nível baixo de energia (D).	113

Figura 75. Deposição sobre chapa com nível alto de energia. Em a) Alimentação dinâmica; b) Alimentação contínua.	115
Figura 76. Detalhe flanco do cordão. Em a) C4- Corrente pulsada com arame contínuo e Va pulsada; b) C7- Corrente pulsada com alimentação dinâmica. .	116
Figura 77. Detalhe do movimento do metal de adição na posição plana. Em a) Recuo; b) Período estático; c) Avanço.	117
Figura 78. Soldagem orbital interna, divisão da circunferência interna e sentido de soldagem.	118
Figura 79. Aspecto superficial ao longo do passe de base para C4.	119
Figura 80. Perfilometria do passe de base na condição C4. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.	120
Figura 81. Aspecto superficial do passe de acabamento para C4.	121
Figura 82. Perfilometria passe de acabamento para a condição C4. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.	122
Figura 83. Aspecto superficial do passe de base para C9.	123
Figura 84. Perfilometria passe de base para a condição C9. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.	124
Figura 85. Posição vertical ascendente para C7.	125
Figura 86. Aspecto superficial do passe de acabamento para C9.	125
Figura 87. Perfilometria passe de acabamento para a condição C9. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.	126
Figura 88. Macrografias relativas à C4. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre cabeça; d) Descendente.	128
Figura 89. Macrografias relativas à C9. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre cabeça; d) Descendente.	129
Figura 90. Primeiro protótipo do CSI.	130
Figura 91. Fixação do CSI em posicionamento para soldagem.	131
Figura 92. Ensaio de soldagem com o CSI.	131
Figura 93. Sensor de deslocamento acoplado no Tartilope V4.	148
Figura 94. Sensor de deslocamento acoplado no cabeçote orbital AMI M81.	148
Figura 95. Gráfico para amplitude de oscilação no Tartilope.	150
Figura 96. Gráfico de velocidade de arame utilizada para passe de acabamento com cabeçote STA.	151
Figura 97. Curva de indicações para os valores ideais e reais de amplitude de oscilação.	152
Figura 98. Curva de erros para a faixa de amplitudes de tecimento.	153
Figura 99. Roletos tracionadores de arame AMI M81.	153
Figura 100. Velocidade de arame cabeçote M81.	154
Figura 101. Revestimento PTA-P. Em a) flanco de chapa de aço carbono; b) tubo de grau API X65.	156
Figura 102. Chapa usinada com chanfro V em revestimento de Inconel 625. .	157
Figura 103. Passe de raiz com aço carbono. Em a) Vertical; b) Sobre cabeça; c) Plana.	158
Figura 104. Passe de raiz com MIG CCC. Em a) Vertical descendente; b) Vertical ascendente; c) Sobre cabeça; d) Plana.	159

Figura 105. Bancada de soldagem do passe de raiz em tubos.....	161
Figura 106. Aspecto superficial passe de raiz com MIG CCC em tubo X65...	162
Figura 107. Reforço da raiz, aspecto de penetração ao longo da junta.	163
Figura 108. Macrografia em MEV do cordão realizado para C4.	166
Figura 109. Espectros de composição química para C4.....	167
Figura 110. Macrografia em MEV do cordão realizado com a condição C7. ...	168
Figura 111. Espectros de composição química para C7.....	169
Figura 112. Macrografia em MEV do cordão realizado com a condição C9. ...	170
Figura 113. Espectros de composição química para C9.....	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de soldagem medidos em chanfro V 60° e 80°.	62
Tabela 2. Parâmetros para soldagem em chapas com Inconel 625 em chanfro V 80°.	71
Tabela 3. Matriz de ensaios com variantes de alimentação de arame no processo TIG.	74
Tabela 4. Parâmetros regulados na câmara para termografia.	77
Tabela 5. Valores médios de movimentação do arame obtidos durante a soldagem com a condição C7.	100
Tabela 6. Dados médios de movimentação do arame medidos durante a soldagem com a condição C9.	102
Tabela 7. Parâmetros de soldagem para ensaios com diferentes tamanhos de poça.	113
Tabela 8. Valores medidos no perfil geométrico dos cordões com alta e baixa energia.	114
Tabela 9. Parâmetros modificados para soldagem com Inconel 625 em tubo de 1 ½” de espessura de parede.	117
Tabela 10. Parâmetros para revestimento com Inconel 625.	157
Tabela 11. Parâmetros do processo CCC aplicados no passe de raiz.	160
Tabela 12. Composição química da amostra soldada pela condição C4.	166
Tabela 13. Composição química da amostra soldada para C7.	168
Tabela 14. Composição química da amostra soldada para C9.	170

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A1-	Área abaixo do gráfico de velocidade x tempo correspondente ao deslocamento de avanço
A2-	Área abaixo do gráfico de velocidade x tempo correspondente ao deslocamento de recuo
A-TIG-	<i>Active Tungsten Inert Gas</i>
API-	<i>American Petroleum Institute</i>
Ar-	Argônio
At-	Amplitude de oscilação
AVC-	<i>Arc Voltage Control</i>
AWS-	<i>American Welding Society</i>
C-	Carbono
CCC-	Curto-Circuito Controlado
CMT-	<i>Cold Metal Transfer</i>
CO ₂ -	Dióxido de carbono
CPU-	<i>Central Processing Unit</i>
Cr-	Cromo
CRA-	<i>Corrosion Resistant Alloy</i>
CSI-	Cabeçote de Soldagem Interna
CVC-	Alimentação contínua com velocidade constante
CVP-	Alimentação contínua com velocidade pulsada
DAF-	Alimentação dinâmica em alta frequência
DC-	<i>Duty Cycle</i>
DEA-	Distância Eletrodo Arame
E-	Energia/Força eletromagnética
EDS-	<i>Energy Dispersive Spectrometer</i>
E _{Média} -	Energia média
f-	Frequência de oscilação
F-	Força de tração
F _{in} -	Força mínima para puxar o arame da bobina
F _{out} -	Força mínima para tracionar o arame
g-	Força da gravidade
h1-	Distância da ponta do eletrodo até o fundo do chanfro 1
h2	Distância da ponta do eletrodo até o fundo do chanfro 2
H ₂ S -	Ácido sulfídrico
I _{base} -	Corrente de base
I _{ef} -	Corrente eficaz
I _{média} -	Corrente média
I _{pulso} -	Corrente de pulso
IHM-	Interface Homem Máquina

ISO-	<i>International Standardization Organization</i>
K-	Constante de mola do sistema
LP-	% no lado positivo
LN-	% no lado negativo
M-	Força induzida pelo gradiente de tensão superficial
MAG-	<i>Metal Active Gas</i>
MEV-	Microscópio Eletrônico de Varredura
MIG-	<i>Metal Inert Gas</i>
Mn-	Manganês
Mo-	Molibdênio
n-	Rotação
Ni	Níquel
p-	Penetração
P _{média} -	Potência média
PTA-P-	Plasma Transferred Arc with Powder
r-	Raio do tubo
SAE-	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAP-	Sistema de Aquisição Portátil
SCC-	<i>Stress Corrosion Cracking</i>
STA-	Sistema Tracionador de Arame
STT-	<i>Surface Tension Transfer</i>
t-	Tempo
t0-	Tempo correspondente ao início do avanço
t1-	Tempo correspondente ao término do avanço e início do recuo
t2-	Tempo correspondente ao término do recuo
TIG-	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TiO ₂ -	Óxido de titânio
Tf-	Temperatura do fluido
Tmáx-	Temperatura máxima
Tw-	Temperatura do componente
U1-	Tensão eletrodo/peça
U2-	Tensão eletrodo/arame
U _{base} -	Tensão na base
U _{média} -	Tensão média
U _{pulso} -	Tensão no pulso
v-	Velocidade tangencial
Va-	Velocidade de arame
Vs-	Velocidade de soldagem
α-	Ângulo de entrada do arame
ε-	Emissividade

μ - Coeficiente de atrito
 Φ - Somatório dos ângulos de dobras no conduíte
 ω Velocidade angular
3D- Três dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Justificativa: O projeto com a PETROBRAS e o <i>status quo</i> da união de tubos cladeados	31
1.2	Objetivos gerais e específicos	34
1.2.1	Objetivo geral	34
1.2.2	Objetivos específicos	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	Processo de soldagem TIG e variantes existentes atualmente.....	37
2.2	Processo TIG alimentado e algumas técnicas de alimentação de arame.....	38
2.2.1	Alimentação contínua com velocidade constante ou pulsada ..	40
2.2.2	Alimentação dinâmica de arame	43
2.2.3	Alimentação com arame frio (<i>cold wire</i>) e arame quente (<i>hot wire</i>).....	47
2.3	Transferência metálica no processo TIG	49
2.4	Efeitos térmicos e forças atuantes sobre a poça de fusão no processo TIG.....	52
2.5	Soldagem orbital e circunferencial.....	56
2.5.1	Processo TIG em aplicações orbitais	58
3	ENSAIOS PRELIMINARES: DEFINIÇÃO DA JUNTA PARA PREENCHIMENTO COM INCONEL 625	61
4	MATERIAIS E MÉTODOS	65
4.1	Técnicas de alimentação de arame no processo TIG – Comparativo entre alimentação em velocidade constante, pulsada e dinâmica	66
4.1.1	Bancada experimental e equipamentos	66
4.1.2	Corpos de prova e consumíveis de soldagem	68
4.1.3	Metodologia aplicada.....	70
4.1.4	Filmagem de monitoramento por vídeo em alta velocidade e termografia	76
4.2	Soldagem de união bilateral de tubos cladeados.....	79
4.2.1	Bancada experimental e equipamentos	79
4.2.2	Corpos de prova e consumíveis de soldagem	82
4.2.3	Metodologia aplicada.....	83
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO- SOLDAGEM COM O PROCESSO TIG.....	85
5.1	Técnicas de alimentação de arame visando o aumento da robustez na soldagem TIG.....	85

5.1.1	Técnica de alimentação de arame contínua com Va constante	85
5.1.2	Técnica de alimentação de arame contínua com Va pulsada, nível alto e baixo de velocidade em um único sentido.....	90
5.1.3	Técnica de alimentação dinâmica com corrente pulsada e constante	95
5.1.4	Filmagem termográfica.....	106
5.1.5	Comparação por meio de filmagem em alta velocidade.....	115
5.2	Soldagem circunferencial interna em tubos cladeados com Inconel 625.....	117
5.2.1	Arame contínuo com Va pulsada e corrente pulsada (C4)	119
5.2.2	Alimentação dinâmica com corrente pulsada e constante (C7 e C9).....	122
5.2.3	Análise dos resultados por macrografia para as técnicas de alimentação contínua e alimentação dinâmica	127
5.2.4	Desenvolvimento e testes do primeiro protótipo- Cabeçote de Soldagem Interna (CSI)	129
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	135
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
	APÊNDICE A VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM RELATIVOS AOS MANIPULADORES E TRACIONADORES DE ARAME.....	147
A.1	METODOLOGIA DE VERIFICAÇÃO	147
A.2	RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO	149
A.2.1.	TARTÍLOPE V4 E STA	149
A.2.2.	AMI M81.....	151
	APÊNDICE B- SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM PTA-P E PASSE DE RAIZ COM MIG CCC - CONCEPÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	155
B.1	REVESTIMENTO COM PTA-P.....	155
B.2	PASSE DE RAIZ COM MIG CCC	158
	APÊNDICE C- ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).....	165
C.1	ANÁLISE EDS EM JUNTA SOLDADA PELA CONDIÇÃO C4	165
C.2	ANÁLISE EDS EM JUNTA SOLDADA PELA CONDIÇÃO C7	168
C.3	ANÁLISE EDS EM JUNTA SOLDADA PELA CONDIÇÃO C9	170

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional, a demanda pela geração de energia e combustíveis aumentou de forma proporcional, obrigando as empresas do setor de óleo e gás a suprir esta necessidade.

As explorações nacionais no ano de 2006 resultaram na descoberta de grandes reservas de petróleo na camada do pré-sal, localizadas cerca de 300 km da costa brasileira, no litoral dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro [1]. Esta região estende-se por cerca de 800 km, chegando a profundidades de 7 km abaixo do nível do mar, conforme mostrado nos esquemas da Figura 1.

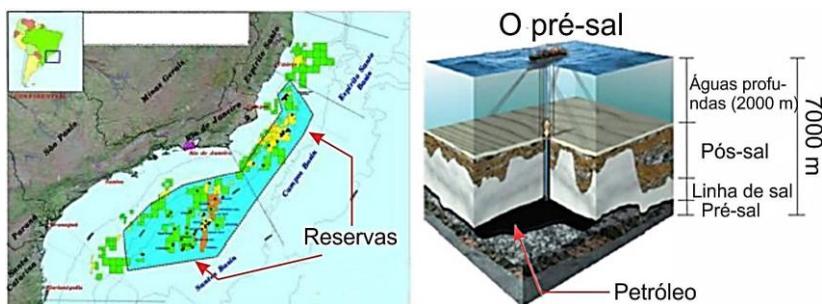


Figura 1. Localização e profundidade das reservas do pré-sal [2,3].

Em termos econômicos, a exploração destes poços constitui para o Brasil, a maior fonte de petróleo, alcançando em média 2,11 milhões de barris por dia [4]. As reservas existentes no pré-sal possuem altos teores de H_2S e CO_2 as quais são substâncias altamente corrosivas. Além disso, condições mais severas de pressão, temperatura e cargas devem ser enfrentadas quando comparadas às reservas tradicionais de petróleo e gás [5,6].

Pela localização das reservas ser relativamente longe da costa, torna atraente a utilização do método de lançamento de tubulações chamado de *reel-lay*, onde parte da linha dutoviária é construída *onshore*, em uma instalação na costa conhecida como *spool base*, e em seguida é bobinada em uma embarcação como a da Figura 2, e levada até o local de instalação.



Figura 2. Embarcação *Technip's Apache* para instalação *reel-lay* [7].

A ligação entre a base de processamento e sistemas subaquáticos, que possibilita o fluxo do material extraído do poço é realizada por tubulações chamadas de *risers*. Atualmente existem duas configurações básicas de *risers* os rígidos e os flexíveis [7].

Para garantir a resistência mecânica e alta resistência à corrosão, os *risers* rígidos são fabricados de aços de alta resistência C-Mn, revestidos internamente com ligas de alta resistência à corrosão, sendo denominados deste modo como *clad pipes*. Neste caso, a camada de revestimento interno ou CRA (*Corrosion Resistant Alloy*) em aplicações de alto requisito é geralmente fabricada com ligas à base de níquel como o Inconel 625.

Neste contexto, a união de *clad pipes* (tubos cladeados) para a fabricação de *risers* rígidos constitui uma demanda significativa no cenário brasileiro. Atualmente esta união é realizada por meio de uma soldagem externa, onde a tocha percorre a circunferência do tubo, e posteriormente é realizada a etapa de inspeção. A junta soldada deve atender a alguns requisitos propostos em normas. Por exemplo, deve atender à condição onde o limite de escoamento do metal de solda é de superior em relação ao substrato de aço C-Mn, condição chamada de *overmatching*, mantendo ao mesmo tempo as propriedades de resistência à corrosão da CRA [8]. O conceito de *overmatching* é ilustrado na Figura 3, na qual a curva 3 (em vermelho) representa o material de base enquanto as curvas 1 e 2 representam dois metais de solda distintos.

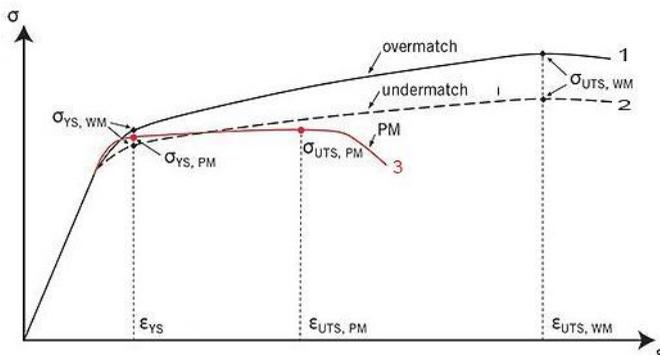


Figura 3. Curva tensão-deformação conceito de *undermatching* e *overmatching* [9]

1.1 Justificativa: O projeto com a PETROBRAS e o status quo da união de tubos cladeados

Este trabalho encontra-se inserido em um projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em parceria com a PETROBRAS, intitulado: *Desenvolvimento de um Sistema Automatizado para Soldagem Circunferencial Interna em Tubos de Aço Cladeados com Liga 625*. Seu objetivo principal diz respeito à modificação da técnica de união de tubos cladeados de forma que possibilite, durante a etapa de preenchimento, a aplicação de consumíveis de aço carbono similares ao substrato do tubo, com maior resistência mecânica que a CRA. Além disto, propõe-se uma equalização das propriedades mecânicas da junta de modo a evitar falhas durante o bobinamento da tubulação, no método de lançamento *reel-lay*.

Para tal, o projeto propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado, que seja capaz de percorrer o interior de tubos com 6" de diâmetro interno e 12 m de comprimento, realizando então uma soldagem circunferencial interna. O mesmo deve estar dotado de sistemas de controle e correção de trajetória via *laser* e câmera de monitoramento. Em uma escala menor, o presente trabalho também se ramifica de outro projeto em parceria com a PETROBRAS, intitulado *Avanços no Processo TIG Aplicado à Soldagem Orbital Automática e Semiautomática de Tubulações*, que aborda pesquisa e desenvolvimento tecnológico de técnicas não convencionais de alimentação de arame. Deste modo, a presente dissertação trata de uma das etapas mais importantes do primeiro projeto, relacionada ao desenvolvimento do procedimento de soldagem interna.

A aplicação de tubos cladeados na construção de *risers* alia os benefícios da alta resistência mecânica do aço com a alta resistência à corrosão do revestimento [10,11]. Dentre as principais vantagens presentes nesta configuração, está o menor custo quando comparado a tubos fabricados inteiramente de materiais nobres, além do substrato de aço proporcionar uma maior versatilidade e variedade de ligas, fato que aumenta a gama de aplicações.

A técnica atualmente empregada para a união destes componentes consiste no preenchimento total da junta utilizando material similar ao presente na CRA. Neste caso, o processo de soldagem orbital externo é comumente utilizado, como exemplifica a Figura 4.

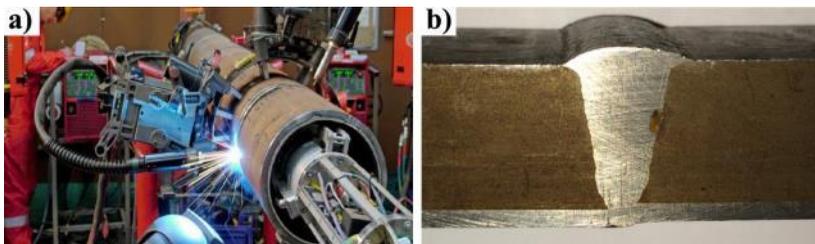


Figura 4. Soldagem de união em tubos cladeados. Em a) Procedimento orbital; b) Macrografia de junta dissimilar aço C-Mn e Inconel 625. Adaptado de [12,13].

Com o aumento da profundidade de exploração, e, portanto a operação em ambientes mais agressivos em termos de pressão e temperatura, além de elementos corrosivos como o H_2S e CO_2 , materiais cada vez mais resistentes são exigidos para suprir a demanda dos projetos. São exemplos os aços API X80, X100 e X120 [12,14]. Neste contexto, com a soldagem realizada de modo convencional, as ligas de níquel contribuem para que a junta não atenda aos requisitos de resistência mecânica destes aços ao C-Mn. Obtém-se, deste modo, uma condição conhecida como *undermatching*, onde a resistência mecânica do metal de solda é menor que a do metal de base, propiciando a formação de uma zona crítica propensa ao escoamento [5].

A utilização, no passe de raiz, de material similar ao revestimento interno presente no tubo mantém a continuidade metalúrgica, bem como as suas propriedades de resistência à corrosão. Porém, uma vez iniciada a soldagem com consumível à base de níquel, torna-se difícil a aplicação de consumíveis similares ao substrato do tubo, sob o risco de fragiliza-

ção da junta em decorrência da diluição de ferro e difusão de elementos de liga, bem como a geração de defeitos de soldagem [10].

Algumas abordagens alternativas têm sido estudadas na tentativa de viabilizar a utilização de consumíveis de aço carbono. Isto é feito por meio da aplicação de materiais intermediários, chamados de *buffer*, entre a raiz da junta com material compatível à CRA e os demais passes de preenchimento com aço carbono. Porém, os resultados obtidos até o presente momento mostram uma baixa robustez da técnica, ou seja, há grande tendência de surgimento de defeitos, conforme indicado na Figura 5.



Figura 5. Soldagem de peças cladeadas com a utilização de material *buffer* [15].

Diante do exposto, uma alternativa diz respeito à união bilateral por meio da soldagem interna e externa, onde é possível a equalização das propriedades da junta, tornando factível a aplicação de metal de adição com a mesma resistência mecânica do substrato. Deste modo a CRA é depositada internamente apenas com o objetivo de garantir a continuidade metalúrgica do revestimento. Esta abordagem é oriunda da soldagem longitudinal de costura ou selamento, aplicada na fabricação de tubos a partir de uma chapa conformada [9]. A Figura 6 exhibe um esquema de uma junta, bem como uma aplicação realizada pela empresa Subsea 7 [12] em tubos de aço X80 revestidos internamente.

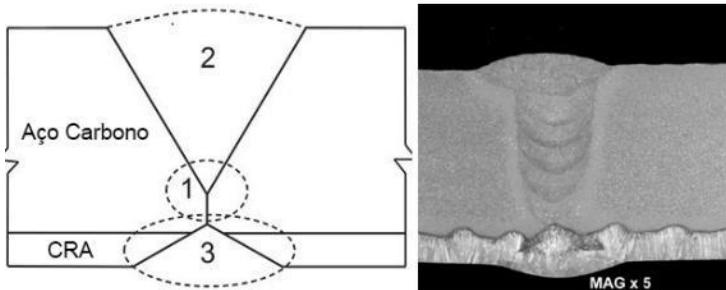


Figura 6. Soldagem bilateral em tubos revestidos internamente [5,11].

Em face da importância estratégica do setor de petróleo e gás e da PETROBRAS para o Brasil, é de grande importância o desenvolvimento de inovações nacionais, o que proporciona o domínio tecnológico, maior aplicabilidade de técnicas modernas e um menor custo, mantendo-se os requisitos de qualidade de nível internacional em suas operações.

Para o procedimento de soldagem internamente ao tubo é de fundamental importância a realização de um processo de soldagem robusto, o que significa para este trabalho, uma soldagem com baixa susceptibilidade a falhas, defeitos e retrabalho. Deste modo, torna-se de grande mérito abordar as tecnologias atuais em processos de soldagem, dentre as quais destaca-se a alimentação dinâmica no processo TIG e os processos com controle em malha fechada para o MIG/MAG.

1.2 Objetivos gerais e específicos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é o estudo e desenvolvimento de técnicas (tecnologias e parametrização) para realização da soldagem circunferencial interna em tubos cladeados internamente com Inconel 625. As técnicas envolvem o processo TIG automatizado e alimentação dinâmica de arame. O passe circunferencial interno, objeto do trabalho, é parte integrante da operação de união de tubos, via soldagem bilateral.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os aspectos operacionais do processo TIG quando aplicado fora de posição com Inconel 625, buscando um procedimento de soldagem robusto e estável.
- Aplicar e avaliar diferentes técnicas de alimentação de arame no processo TIG, como a dinâmica e a contínua, do ponto de vista aplicativo, tendo em vista os benefícios que cada uma pode trazer à execução do processo e a viabilidade da futura aplicação em campo.
- Estudar os impactos da aplicação da técnica de alimentação dinâmica em junta com chanfro sobre o comportamento térmico da poça e resultados geométricos do cordão, os correlacionando com aspectos de robustez do processo.
- Desenvolver parametrização para a soldagem TIG automatizada interna de tubos cladeados, utilizando metal de adição Inconel 625 (Er NiCrMo 3).
- Gerar contribuições de ordem mecânica e mecatrônica para concepção e desenvolvimento de equipamentos destinados ao processo TIG automatizado com alimentação dinâmica em aplicação circunferencial interna.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentado o estado da arte para o processo TIG alimentado, voltado para os conceitos e desenvolvimentos mais atuais em termos de processo de soldagem, mostrando especificamente a técnica de alimentação dinâmica de arame.

2.1 Processo de soldagem TIG e variantes existentes atualmente

Com as primeiras aplicações industriais datadas por volta de 1942, o processo TIG tem apresentado uma evolução constante ao longo dos anos. É conhecido por proporcionar ao soldador um ótimo controle sobre a poça de fusão, gerando cordões com excelente qualidade. Por isto, é aplicado em situações nas quais o produto final exige um elevado requisito, ou seja, uma união isenta de defeitos e com alta qualidade [16,17].

Por outro lado, também lhe é atribuída uma baixa produtividade, principalmente quando aplicado de forma manual. Com o objetivo de melhorar algumas características do processo TIG, como aspectos operacionais que podem impactar em baixa produtividade, a automatização e a mecanização do processo têm sido incorporadas aos equipamentos. Nesse contexto, também está alocado o desenvolvimento de novas técnicas para a adição de material [18,19]. Isto tudo mantendo as características de qualidade que tornam o TIG convencional conhecido. Com o aumento da sua operacionalidade, cresce também a gama de aplicações, uma vez que soldadores menos experientes podem executar o procedimento [20,21].

Algumas das variantes atuais do processo TIG são apresentadas na Figura 6. Como exemplos se têm o modo *Keyhole* para altas penetrações, o duplo eletrodo visando um aumento na produtividade e a realização de revestimentos, a alteração no ângulo de inserção do metal de adição, chamada de alimentação tangencial, além da alimentação dinâmica de arame com um movimento de avanço e recuo proporcionado pelo cabeçote alimentador [22-25].

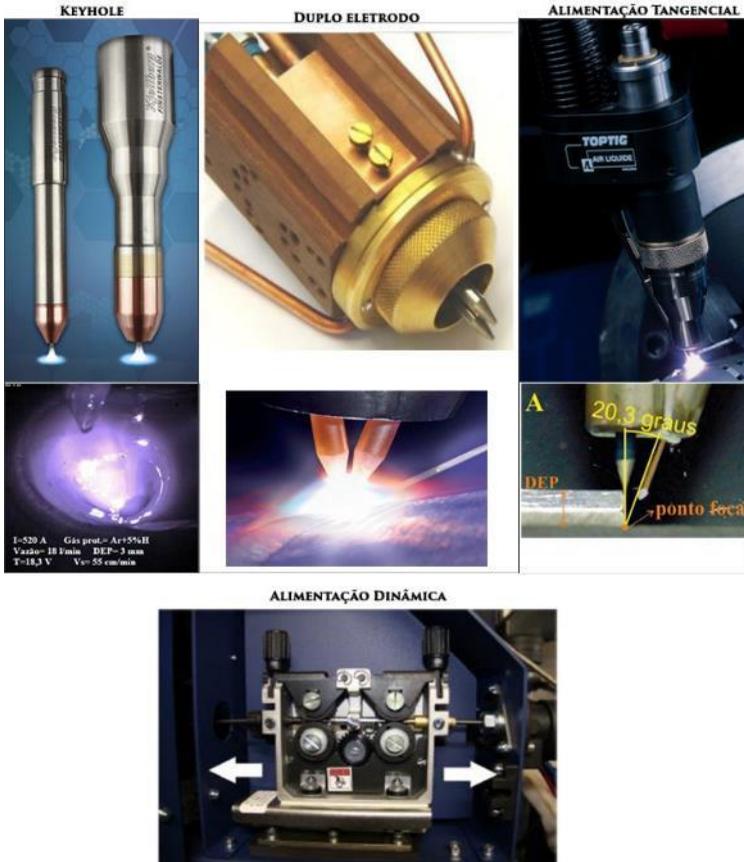


Figura 7. Técnicas de soldagem que visam melhorias em determinadas características do processo TIG [22-25].

2.2 Processo TIG alimentado e algumas técnicas de alimentação de arame

Quando comparado a processos que utilizam eletrodo consumível, o TIG possui a vantagem de não necessitar a utilização de metal de adição. Porém, em muitas das suas aplicações os requisitos de projeto exigem a necessidade de adição de material, como no preenchimento de juntas e em soldas de revestimento [26].

A soldagem com metal de adição também pode ajudar na prevenção defeitos como o *humping*, caracterizado pela formação de protube-

râncias intercaladas com cavidades na superfície do cordão, ou trincas de solidificação, descontinuidades muito comuns na soldagem sem a adição de material e em soldas dissimilares [27].

A susceptibilidade a trincas pode ser aumentada no caso da soldagem dissimilar entre aço carbono e ligas de níquel. Estas podem ocorrer em virtude da alta diluição de ferro, ou pelo uso de altas energias de soldagem. As trincas se originam no estágio final da solidificação, quando há tensões externas e internas agindo sobre os contornos de grão. Tais tensões excedem a suportada pelo material quase solidificado, fazendo com que o líquido remanescente entre em colapso [28,29]. O'Brien [15] realizou a soldagem de preenchimento em chanfro U, de peças de aço C-Mn cladeadas com Inconel 625. Na ocasião, o autor enfrentou problemas com trincas de solidificação, conforme mostra a Figura 8.

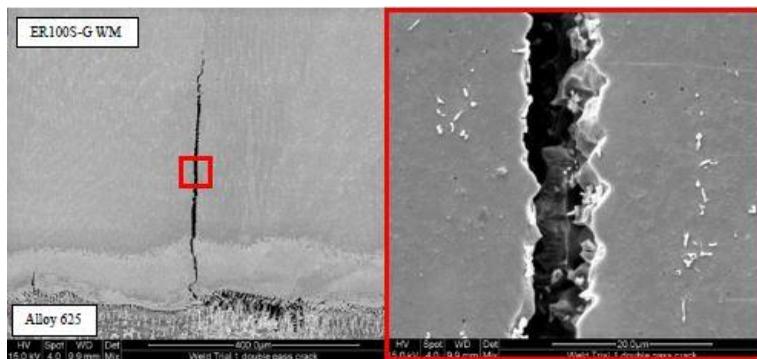


Figura 8. Trincas de solidificação em uniões dissimilares entre aço carbono e ligas à base de níquel [15].

Deste modo, a forma como é adicionado o arame no processo TIG torna-se de suma importância, além de impactar diretamente na qualidade do cordão e na estabilidade do processo de soldagem, podendo prevenir tais defeitos.

Com a adição de material também surgem novos fatores que devem ser parametrizados. Dentre eles podem-se destacar o ângulo (α) e a distância eletrodo/arame (DEA), conforme o esquema apresentado na Figura 9.

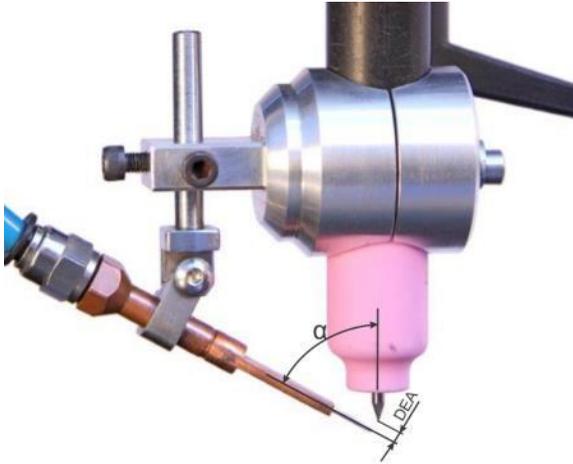


Figura 9. Esquemático do processo TIG alimentado.

Atualmente, existem diferentes técnicas de alimentação automatizada para o processo TIG. Cada método possui suas próprias características de trabalho que impactam diretamente no resultado do processo de soldagem.

Tendo em vista o desenvolvimento de um procedimento robusto para a aplicação circunferencial interna, a escolha da técnica de alimentação é de essencial importância no processo. Estas se diferem em relação à temperatura do metal de adição, disposição geométrica em relação ao eletrodo, além do modo de movimentação do mesmo.

2.2.1 Alimentação contínua com velocidade constante ou pulsada

O processo TIG alimentado de modo automatizado normalmente utiliza a adição de arame de forma contínua, em velocidade constante. Nesta técnica, deve-se seguir a relação sugerida por Delgado [30] e Figueroa et al. [31], na qual, para cada valor de velocidade de arame (V_a) existe uma energia necessária que funde o metal de adição de forma contínua. Esta relação é apresentada na Figura 10, para uma velocidade de soldagem (V_s) de 10 cm/min e metal de adição de aço carbono com 1,2 mm de diâmetro.

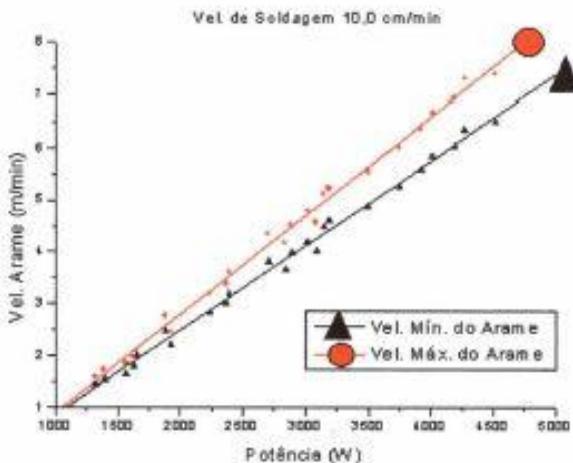


Figura 10. Relação V_a x Potência para $V_s= 10$ cm/min [30].

A relação entre V_a e potência possui uma forte tendência linear e se mostra uma boa alternativa na parametrização do processo de soldagem e busca pela estabilidade. Porém, na soldagem de peças espessas, a necessidade de uma alta potência para fusão do metal de base faz com que a estabilidade na fusão do arame seja obtida apenas com velocidades de arame relativamente altas. Isto pode ocasionar defeitos no cordão, principalmente a falta de molhamento e o escorrimento da poça em soldagem fora da posição plana, conforme observado por Paes [32].

Em processos com a aplicação de corrente pulsada, o alimentador de arame deve ser capaz de acompanhar a variação da onda de corrente, adicionando mais ou menos material a depender do seu patamar. Esta técnica se insere na alimentação de forma contínua, pois o arame avança em um único sentido sem interrupções. Porém, pode também ser chamada de alimentação pulsada, pois os valores e tempos são definidos pelo operador, acompanhando a pulsação da corrente. Pigozzo [33] utilizou esta técnica para a execução do passe de raiz e realizou a medição do movimento do arame, conforme mostra o oscilograma da Figura 11.

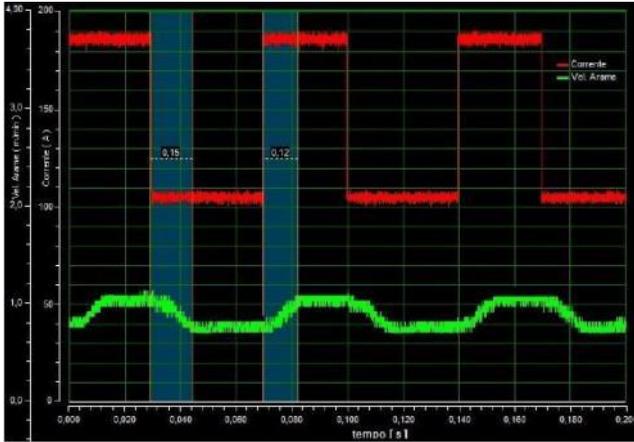


Figura 11. Oscilogramas de corrente e V_a em processo TIG com corrente e arame pulsado [33].

Observa-se um comportamento retangular da onda de corrente (linha vermelha), porém o mesmo não ocorre para a alimentação (linha verde). Esta característica se deve à elevada dinâmica da fonte, a qual o cabeçote alimentador não consegue acompanhar e forma uma rampa de subida e descida do arame. Isto ocorre pois é mais rápido atuar em uma variável elétrica do que em uma variável mecânica. Como consequência há a alteração no modo de transferência do metal de adição para a poça, de forma que ocorre a interrupção do contato do arame com a mesma, de acordo com a Figura 12.



Figura 12. Interrupção no contato do arame com a poça no pulso de corrente [33].

Conforme ponderado por Pigozzo [33], para soldagem fora da posição plana, as mudanças no comportamento do contato do arame com a poça podem acarretar na formação de gotas na ponta do arame e a contaminação do eletrodo, com a conseqüente interrupção do processo. As formas de transferência metálica no processo TIG serão abordadas adiante, na Seção 2.3.

2.2.2 Alimentação dinâmica de arame

Uma alternativa à alimentação contínua de arame diz respeito à alimentação dinâmica, a qual possui um movimento de avanço e recuo executado pelo cabeçote alimentador. Criada por volta de 1982, esta técnica surgiu para suprir a demanda em reparos de turbinas de aeronaves, e vem nos últimos anos, se difundido no ramo da soldagem [34,37]. Na época de sua criação, a alimentação dinâmica foi uma solução encontrada pela equipe de engenharia da *General Electric* (GE) para a reconstrução de aletas no interior dos motores, semelhante à manufatura aditiva, onde o TIG alimentado de forma contínua não obteve êxito.

Rudy [34] relata a obtenção de um cordão mais uniforme, com menor tendência de escorrimto, e que se sustenta quando empilhado. Segundo o autor, isto ocorre devido ao resfriamento na poça de fusão, causado pela movimentação do arame que, no caso, possuía uma frequência de 3 Hz a 11 Hz. Deste modo, o resultado final foi um cordão mais convexo, que atendeu às exigências da aplicação. A Figura 13 mostra o esquemático da aplicação, bem como a seção transversal de uma aleta reconstruída.

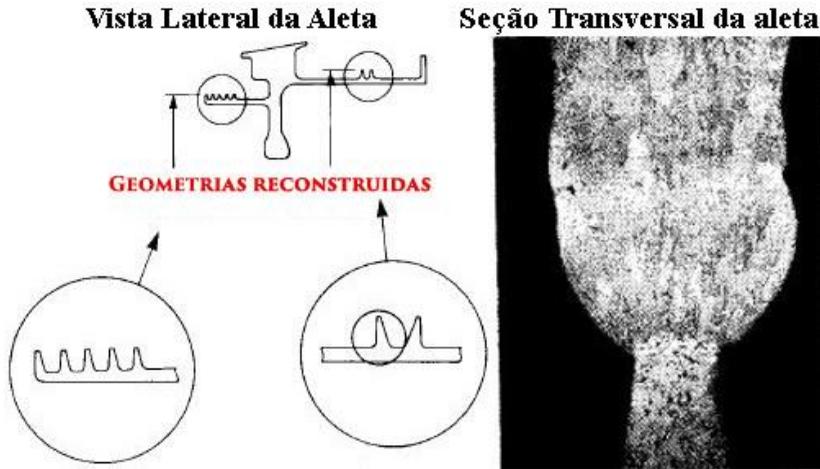


Figura 13. Aplicação da alimentação dinâmica em turbinas de aeronaves [34].

Atualmente, a técnica é replicada por algumas empresas, que anunciam algumas vantagens como o aumento na molhabilidade, redução de porosidade e a maior operacionalidade, tanto na versão manual como na mecanizada. Ressalta-se a existência de pouca literatura técnica em relação aos reais benefícios do emprego da alimentação dinâmica, já que em sua grande maioria são fontes com cunho comercial.

Paes [32] desenvolveu em seu trabalho um equipamento destinado à alimentação dinâmica, que foi classificada por este como baixa frequência quando se utiliza valores abaixo de 2 Hz. Nesta condição, a proposta da oscilação no arame é simular o movimento da mão do soldador na soldagem manual.

Nos ensaios com termografia, Paes [32] notou uma pequena redução na temperatura média da poça, quando a frequência de oscilação do arame foi incrementada de 0 Hz (contínua) até 2 Hz. Para frequências maiores, os efeitos sobre a poça podem ser intensificados, destacando-se o aumento na troca de calor por convecção. Em equipamentos comerciais, as frequências são relativamente altas, como no TIP TIG [35] em torno de 20 Hz, TIG Speed [36], de 15 Hz e o Dabber TIG [37], em torno de 10 Hz.

Em relação ao aumento no ângulo de molhamento causado pela possível agitação da poça, é importante ressaltar que alguns autores compararam a geometria dos cordões com e sem o emprego da oscilação no arame. Em depósitos sobre chapa, Silva [25] encontrou cordões com

diferença geométrica pouco significativa ao comparar a condição convencional de arame contínuo e a dinâmica. Silwal [38], também não notou diferenças geométricas entre cordões depositados pela técnica de alimentação dinâmica e a alimentação contínua. Os cordões obtidos por ambos podem ser visualizados na Figura 14.

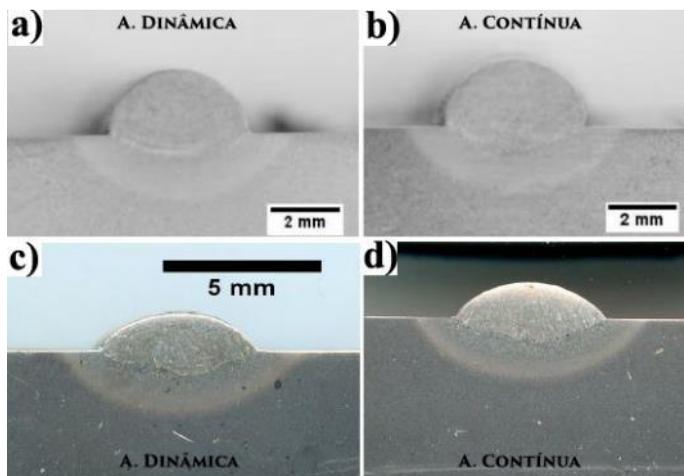


Figura 14. Deposições sobre chapa: alimentação dinâmica X alimentação contínua. Em a) e b) Cordões realizados por Silva[25]; c) e d) Cordões realizados por Silwal [38].

Embora tal comportamento tenha sido observado, os autores não explicam os fenômenos que influenciaram na obtenção da geometria resultante dos cordões.

Deste modo, para que seja possível uma análise detalhada sobre o movimento do arame na técnica de alimentação dinâmica, torna-se importante o conhecimento sobre o conceito cinemático referente ao movimento de avanço e recuo do metal de adição, mostrado no esquema da Figura 15.

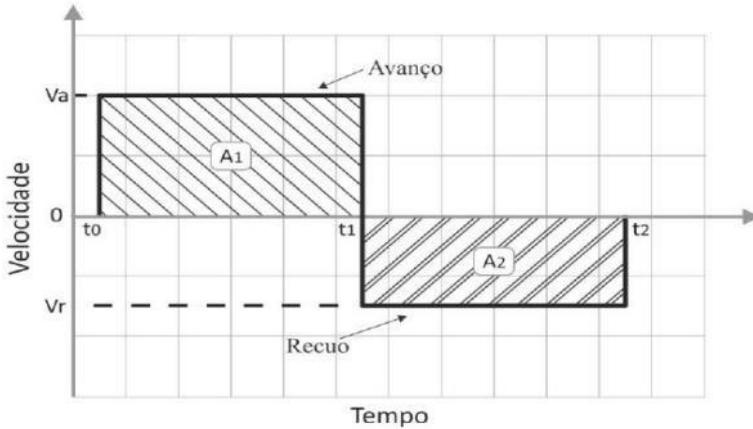


Figura 15. Movimento ideal de um corpo em avanço e recuo [32].

Analisando o gráfico, nota-se que o tempo de avanço é dado por $(t_1 - t_0)$ quando a velocidade é positiva, enquanto que o tempo de recuo é dado por $(t_2 - t_1)$. As áreas A1 e A2 indicam a variação da posição no avanço e no recuo. Para um corpo estar em avanço, obrigatoriamente o deslocamento do avanço deve ser um valor superior ao de recuo.

A velocidade resultante de avanço é dada por uma equação matemática, conforme a integral apresentada na relação abaixo.

$$\int_{t_0}^{t_2} v(t) dt = \frac{A1 - A2}{(t_2 - t_0)} \quad (1)$$

Tal comportamento teórico não corresponde ao executado na prática, devido a inúmeros fatores. Paes [32] observou que o movimento realizado pelo arame possui divergências quando comparado ao ideal. O arame não atinge os patamares de avanço e recuo instantaneamente, possuindo rampas de subida e descida, além de tempos em que permanece estático entre as fases de avanço e recuo. Isto torna a curva do movimento realizado semelhante à mostrada na Figura 16.



Figura 16. Movimento real do arame em avanço e recuo para alimentação em baixa frequência [32].

Silva [25], em seu estudo abordando as características da alimentação dinâmica em alta frequência, notou comportamento semelhante, onde embora o cabeçote alimentador realizasse o movimento de avanço e recuo, o mesmo não era reproduzido na saída do conduíte. Deste modo, o que se visualizou foram ciclos de avanço e parada, sem o recuo.

2.2.3 Alimentação com arame frio (*cold wire*) e arame quente (*hot wire*)

Considerando a temperatura em que o metal de adição pode ser inserido na poça de fusão, existem duas modalidades. O arame frio é caracterizado quando o mesmo se encontra em temperatura ambiente. Por outro lado, o arame quente diz respeito à denominação utilizada quando o mesmo é pré-aquecido pela passagem de uma corrente elétrica (efeito Joule).

Uma das principais características da técnica com arame quente relaciona-se com a possibilidade de aumento da velocidade de alimentação para uma determinada corrente, já que com o pré-aquecimento, o metal de adição exige menos calor sensível para atingir a fusão. Isto torna o processo muito atrativo para aplicações que requerem altas taxas de deposição [23]. Em contrapartida, este significativo aumento na taxa de deposição, torna o processo complexo para aplicações fora da posição plana. Conforme apresenta Henon [39], posições como a sobre cabeça tendem a apresentar o escorrimento da poça e formar cordões com geometria não uniforme, fato que restringe aplicações do *hot wire*. O autor também cita a necessidade de um circuito extra para pré-aquecer o

arame que dependendo da infraestrutura disponível pode ser um limitante.

O processo com *hot wire* é muito conhecido para aplicações de revestimento, que comparado ao *cold wire* torna possível a redução da corrente principal de soldagem para uma mesma V_a , diminuindo assim o nível de diluição. Porém, a mesma técnica com arame quente pode ser aplicada em condições que exigem maiores penetrações. Um exemplo disto é mostrado na Figura 17. Silwal [38] em ensaios com alimentação dinâmica mostrou que o *hot wire* pode apresentar uma penetração muito maior que o *cold wire*, caso mantido em ambos a mesma corrente e V_a .

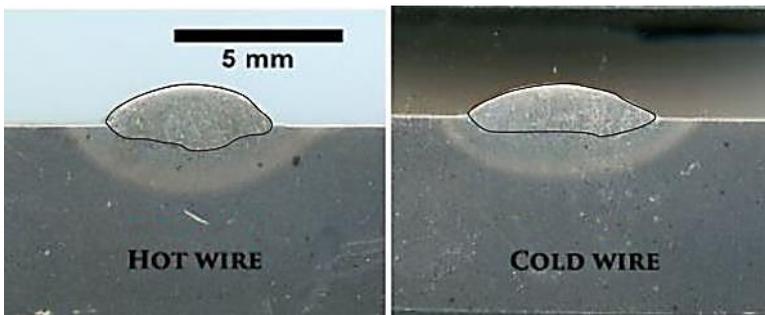


Figura 17. Aplicações das técnicas com arame quente e arame frio. Adaptado de [38].

Este é um fato intuitivo, visto que a energia entregue à poça é maior, o que promove maior penetração.

Comparando o emprego de arame quente com o de arame frio, alguns autores mostram também resultados diferentes dependendo da posição de entrada do arame na poça. Conforme ensaios realizados por Delgado [30], Pigozzo [33] e Godinho [24], usualmente no processo TIG convencional e *cold wire* utiliza-se a alimentação pela parte frontal da poça, também conhecida como frente de fusão. Para justificar tal prática os autores afirmam a ocorrência de uma perturbação na poça, quando a alimentação é por trás, que por ser uma região mais fria já em solidificação, propicia a formação de defeitos como falta de fusão. Não obstante, na utilização do arame quente, a alimentação por trás torna-se uma alternativa, já que pelo seu pré-aquecimento necessita de menos calor para fundir, o que promove a formação de cordões com bom molhamento e isentos de defeitos [40].

2.3 Transferência metálica no processo TIG

Um fator de grande importância e preocupação no processo TIG é a probabilidade de contaminação do eletrodo. Dependendo da ocasião, a emissão termiônica é comprometida, e o processo deve ser interrompido. No TIG alimentado de forma automatizada, tal probabilidade está diretamente ligada à transferência do material de adição para a poça, que influencia diretamente no comportamento do processo.

A forma normalmente aceita e reconhecida para transferência do metal de adição é conhecida como ponte, ou não interrompida, na qual o metal de adição funde continuamente, garantindo continuidade no contato com a poça. Porém, com o surgimento de novas variantes e técnicas de alimentação de arame no processo TIG, abriu-se espaço para reflexões e o surgimento de novos modos de transferência, como por exemplo, a chamada por alguns autores de intermitente [24,25,32]. Na transferência intermitente ou interrompida, não há o contato constante do metal de adição com a poça. Um exemplo de ambas as condições são apresentadas na Figura 18.

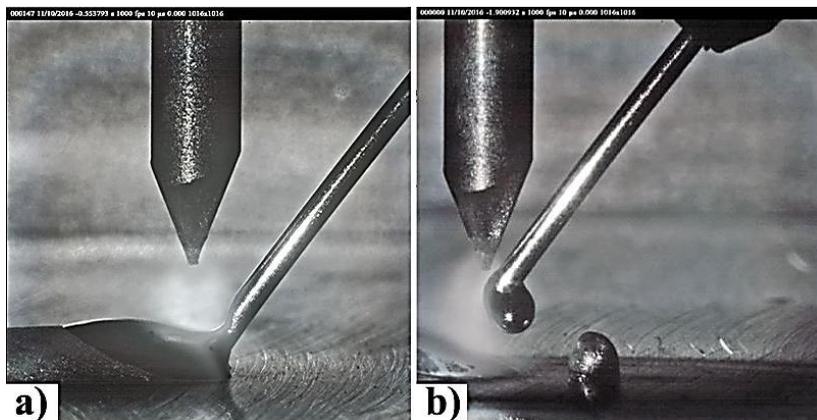


Figura 18. Transferências metálicas no processo TIG. Em a) Ponte; b) Intermitente.

O modo de transferência metálica é dependente de vários parâmetros de soldagem, e pode ser alterada entre ponte e intermitente com uma simples mudança na região de entrada do arame no arco ou até mesmo pela mudança nos parâmetros elétricos [24]. Pigozzo [33] cita

que observou a mudança na transferência de ponte para intermitente com uma alteração de apenas $1,5^\circ$ no ângulo de inserção do arame.

Em aplicações fora da posição plana, é conveniente a utilização da transferência metálica em ponte, na qual a força devido à tensão superficial no contato poça/arame atua de forma a puxar o metal líquido para si, formando uma componente contrária à força da gravidade. Em velocidades de arame constantes e relativamente baixas, segundo Shipilov [41], o arco pode formar uma espécie de barreira e impedir que o arame chegue à poça, gerando uma transferência intermitente, o que leva à formação de gotas. Desta forma, quanto maior a massa da gota formada, maior é a dependência da gravidade em virtude da intensificação da força peso. No caso das posições sobre cabeça, vertical e horizontal (dependendo, para as duas últimas, da posição relativa entre arame e eletrodo), isto aumenta a tendência de contaminação do eletrodo. Esta afirmação reforça que na relação $V_a \times \text{Potência}$, apresentada na Seção 2.2.1, a estabilidade do processo só é alcançada para valores relativamente altos de V_a .

Para tal, aponta-se como alternativa o uso da alimentação dinâmica [34]. No caso de Rudy [34] e Silwal [38], o movimento de avanço e recuo promove obrigatoriamente a transferência de modo intermitente, sem o contato constante do arame com a poça, fato que gera a formação de pequenas gotas na ponta do arame pela vibração do mesmo.

Paes [32] também identificou alterações no modo de transferência ao longo de um procedimento de soldagem orbital com arame contínuo, em decorrência da alteração do vetor da força gravitacional. Porém, dentre os principais causadores das mudanças no comportamento da transferência metálica ao longo do processo de soldagem, também podem ser citados: o atrito arame/conduíte provocando o fenômeno *stick slip*, e a curvatura do arame devido à sua deformação no bobinamento. Este raio da curvatura se altera conforme o mesmo é consumido, alcançando os níveis mais críticos ao final da bobina, onde o raio de dobramento é menor e a sua deformação é maior. Isto pode provocar mudanças no local de entrada do mesmo no arco, fazendo o mesmo incidir em isoterma de maior temperatura, e assim fundindo precocemente [42,43].

O *stick slip*, no entanto é um comportamento estudado em diversas áreas da engenharia em aplicações onde há atrito pelo deslizamento entre duas superfícies. No caso da soldagem, pode ser definido como uma interrupção no movimento ou uma redução na velocidade do arame enquanto o mesmo desliza no interior do conduíte. Autores abordam o problema no processo GMAW, mostrando que o fenômeno pode gerar

travamentos no arame impactando diretamente sobre o comportamento do processo de soldagem [44,45]. No TIG, por ser um processo relativamente sensível, este fenômeno pode causar a modificação no comportamento de movimentação do arame e, conseqüentemente, na transferência metálica.

A Figura 19 esquematiza um sistema massa-mola-amortecedor presente no conduíte, causador do efeito *stick slip*.

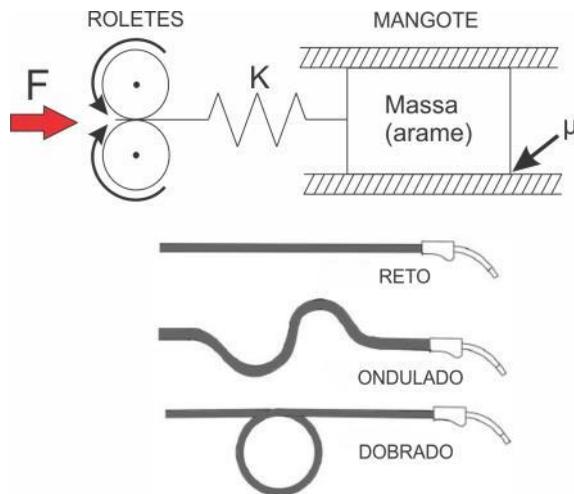


Figura 19. Esquema do sistema massa-mola-amortecedor presente no mangote no processo de soldagem. Adaptado de [44].

A força (F) que empurra o arame é diretamente proporcional à força de atrito entre arame e conduíte. Esta, por sua vez, depende basicamente do coeficiente de atrito (μ), bem como da disposição do mangote durante a soldagem (reto, ondulado ou dobrado), conforme o esquema da Figura 19. Esta disposição resulta em uma determinada constante de mola chamada de (K) do sistema, gerando um efeito de mudança na movimentação do arame. Por conta disso, verifica-se a redução da velocidade de avanço e mudanças abruptas no arame [44,45]. Em soldagem orbital, comumente ocorre alteração na disposição do mangote, e, conseqüentemente, do conduíte, ao longo da solda, devido a constante alteração da posição de soldagem ao redor do tubo.

Segundo a Equação 2, dada por Euler-Eytelwein [46], a força necessária para tracionar o arame (F_{out}) é diretamente proporcional a três variáveis, as quais são: a força mínima de entrada para puxar o metal de

adição da bobina (F_{in}), o coeficiente de atrito (μ) e o somatório dos ângulos de dobra ao longo do conduíte (Φ).

$$F_{out} = F_{in}e^{\mu\Phi} \quad (2)$$

Esta relação traduz o fenômeno *stick-slip*, levando em consideração os ângulos de dobra ao longo do mangote.

2.4 Efeitos térmicos e forças atuantes sobre a poça de fusão no processo TIG

Pelas leis da física, a transmissão de calor está associada a uma diferença de temperatura entre duas regiões. Existem três mecanismos fundamentais de transferência de calor: condução, convecção e radiação [47].

A condução é um fenômeno descrito por uma relação matemática criada por Fourier em 1822. Neste caso, a transmissão de calor ocorre da região com maior energia para a de menor energia, existindo uma diferença de temperatura entre ambas. A convecção trata de um mecanismo de troca de calor existente entre o contato de um fluido com uma superfície sólida, e também há uma diferença de temperatura entre ambas. A efetividade da transmissão de calor por convecção depende do movimento do fluido, e conseqüentemente das características físicas de escoamento. A radiação, por sua vez, é um meio de transferência de calor por ondas eletromagnéticas, emitidas por fontes que se encontram em uma temperatura não nula [47,48].

Em um processos de soldagem tem-se os três meios de transmissão de calor, que atuam simultaneamente sobre a poça de fusão. No processo TIG, Traidia et al. [49] investigaram, por meio de simulações numéricas, a influência da alimentação de arame, de forma contínua empregando *cold wire*, sobre o gradiente térmico da poça de fusão. Os perfis de temperatura foram obtidos em uma análise com 200 A, comparando o processo TIG autógeno com o alimentado, conforme mostrados na Figura 20.

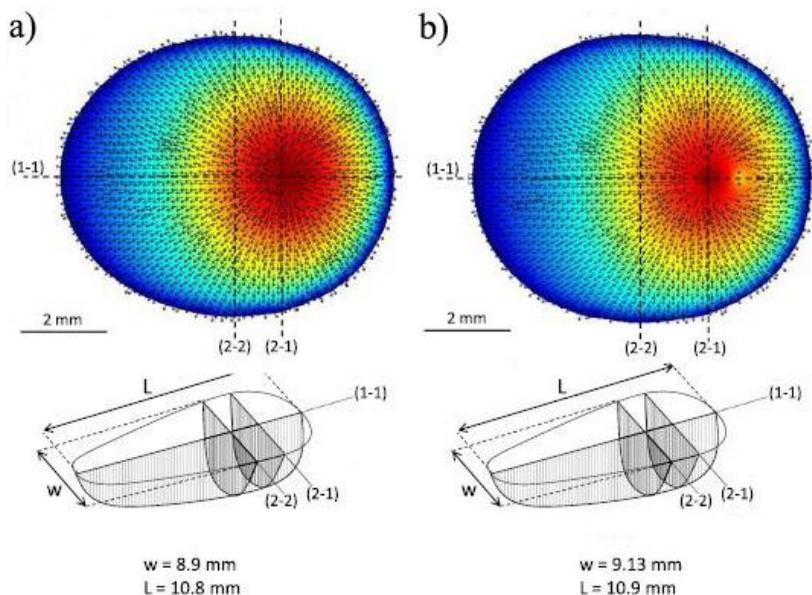


Figura 20. Perfil térmico da poça de fusão para 200 A e velocidade de soldagem de 15 cm/min. Em a) Autógeno; b) $V_a = 1,0$ m/min contínua. Adaptado de [49].

Deste modo, observa-se que quando alimentado, parte do calor gerado pelo arco é destinada ao arame para elevar sua temperatura até a fusão, reduzindo assim a temperatura média da poça. No processo autógeno, tal fato não existe, e o calor do arco é destinado à obtenção de penetração na peça.

É importante ressaltar que, com a criação de novas técnicas de adição de arame no processo TIG, estas características podem ser alteradas. Desta forma, na técnica de alimentação dinâmica, tanto Paes [32] quanto Silva [25] notaram reduções na temperatura média da poça. Os gradientes térmicos obtidos por Paes [32] são mostrados na Figura 21.

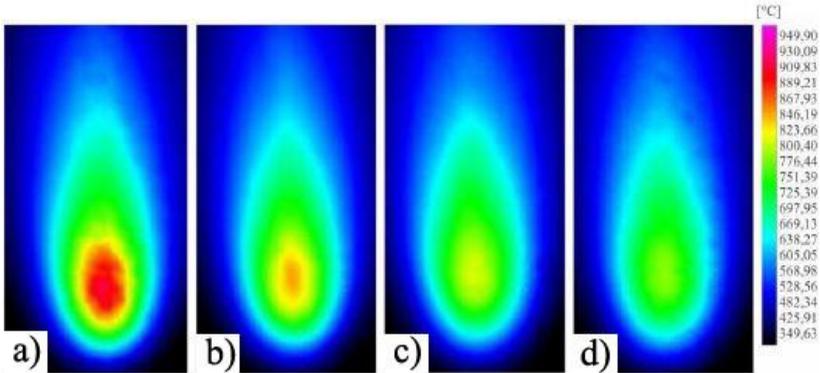


Figura 21. Perfil térmico da poça obtido por meio de termografia. Em a) Autógeno; b) Alimentação contínua; c) Alimentação dinâmica 1Hz; d) Alimentação dinâmica 2 Hz. Adaptado de [32].

Este fato pode estar relacionado ao aumento na transferência de calor por convecção devido à movimentação do arame e consequentemente da poça. Na literatura técnica algumas áreas da engenharia como a Transferência de Calor e Massa, abordam este mecanismo chamando-o de agitação linear intermitente ou vibração linear intermitente, o qual consiste da movimentação ou agitação de um corpo ou fluido em sentido de avanço e recuo e até mesmo avanço e pausa, proporcionando um aumento significativo no coeficiente de troca de calor por convecção [50].

Kou [51] aborda em seu trabalho três forças que atuam sobre a poça no processo TIG, e influenciam diretamente na geometria final do cordão formado. Estas forças são denominadas de flutuação, eletromagnética e devido à tensão superficial (efeito Marangoni), e são mostradas na Figura 22.

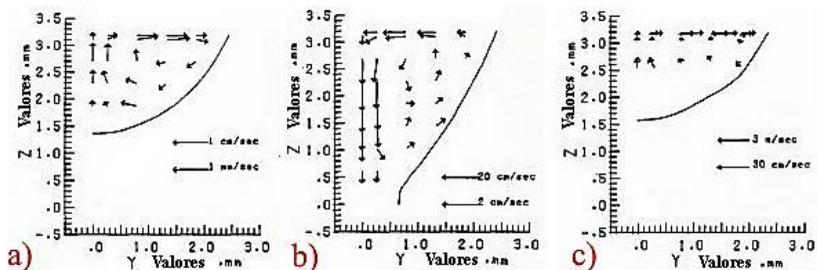


Figura 22. Vetores de velocidade na poça de fusão devido à ação de forças individuais. Em a) Força de flutuação; b) Força eletromagnética; c) Força devida à tensão superficial. Adaptado de [51].

Analisando o sentido dos vetores, observa-se que as forças de flutuação e devida à tensão superficial atuam fortemente sobre o espalhamento do metal fundido, conseqüentemente, na largura do cordão depositado, enquanto que a força eletromagnética atua principalmente no sentido do centro do cordão, de forma a gerar a penetração do metal fundido.

É importante ressaltar que o sentido da força de tensão superficial pode ser modificado de algumas formas, com o aumento da temperatura, com a adição de elementos tenso-ativos ao processo de soldagem que tem o objetivo de aumentar a penetração, ou ainda com o nível de impurezas no material de base, como o enxofre, que tendem a dificultar a penetração e aumentar a largura do cordão [54,55]. A Figura 23 apresenta a simulação da ação de um arco com 100 A e duas condições, comparando o processo TIG convencional e o processo chamado A-TIG (TIG com adição de óxidos de Ti (TiO_2) na superfície da peça a ser soldada).

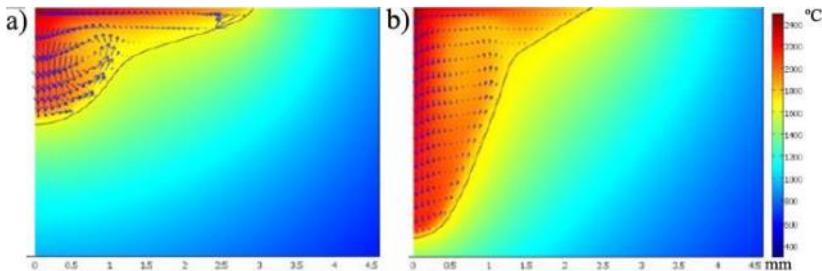


Figura 23. Simulação computacional de diferentes gradientes de tensão superficial na poça. Em a) Negativo sem a adição de TiO_2 (mais largo); b) Positivo com adição de TiO_2 (maior penetração). Adaptado de [52].

Observa-se que no processo TIG, normalmente a força predominante no centro da poça é a eletromagnética, enquanto que o efeito Marangoni atua do centro (região de maior temperatura) para as bordas (região de menor temperatura), com um coeficiente de tensão superficial negativo como mostrado na Figura 23a. Com a adição de TiO_2 , o efeito Marangoni muda seu sentido de atuação, modificando também o gradiente de tensão superficial para positivo. Portanto, esta componente atua juntamente com a força eletromagnética, de modo a aumentar a penetração no centro do cordão.

No caso da aplicação de alimentação dinâmica, a movimentação do arame pode causar uma perturbação mecânica nas linhas de fluxo da poça de fusão, contribuindo para a alteração da força de flutuação e reduzindo a chance de haver gases aprisionados na poça. O nível de espalhamento do metal líquido também pode ser modificado pelo avanço e recuo.

2.5 Soldagem orbital e circunferencial

Uma soldagem para união de tubulações pode ser realizada de duas formas: por meio do deslocamento da tocha ao longo da circunferência do tubo enquanto o mesmo permanece estático, chamada de soldagem orbital, ou em alguns casos, com a tocha estática e o tubo girando, conhecida como soldagem estacionária ou circunferencial estacionária [54]. Ambas podem ser chamadas de soldagem circunferencial, porém apenas quando o manipulador da tocha percorre a circunferência do tubo o processo é orbital. Devido à impossibilidade de rotação dos tubos em campo, a primeira opção é normalmente utilizada em obras de dutos.

Em tal condição, o processo de soldagem deve ser capaz de ser realizado nas posições plana, vertical e sobre cabeça. Deste modo, os processos como o arco submerso tornam-se de difícil execução fora da posição plana, devido à adição de fluxo em pó. Assim, a escolha por processos como o MIG/MAG, TIG e o Eletrodo Revestido são opções difundidas na indústria petroquímica, naval e alimentícia [55].

A norma AWS 3.0 [56] sugere uma equivalência entre as posições de soldagem com a circunferência de um determinado tubo. Para tal divide-se o diâmetro em ângulos de 0° a 180° , sendo o 0° o início do cordão conforme o diagrama da Figura 24.

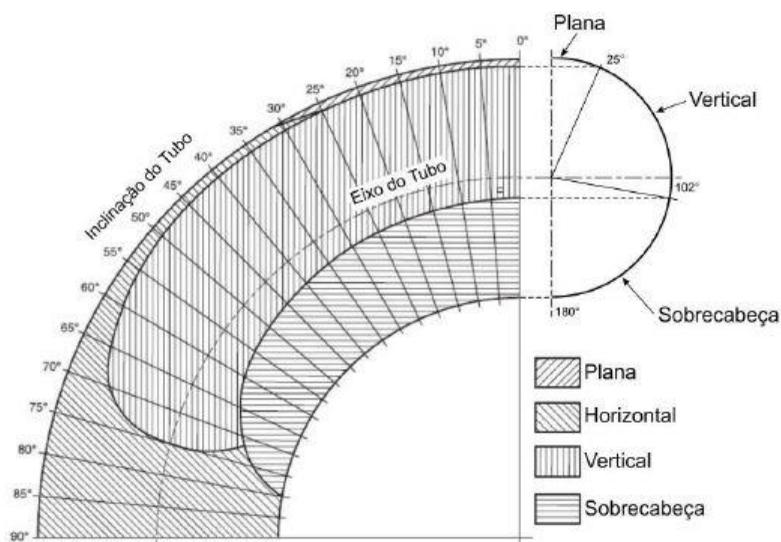


Figura 24. Equivalência das posições de soldagem em tubos. Adaptado de [56].

Na Figura 24, o eixo de inclinação do tubo representa qual plano o mesmo encontra-se. Por exemplo, um tubo posicionado em 90° , encontra-se na vertical, onde a tocha ao percorrer sua circunferência realiza o cordão puramente na posição horizontal. Deste modo, entende-se que o comportamento da poça de fusão para chapas dispostas nas respectivas posições assemelha-se muito à observada em tubos na correspondente faixa angular, fato que auxilia na parametrização e desenvolvimento de novos procedimentos de soldagem, por conta da fabricação de corpos de prova. É importante ressaltar que no caso da aplicação

interna, para um tubo posicionado na horizontal, as posições plana e sobre cabeça são invertidas.

2.5.1 Processo TIG em aplicações orbitais

Equipamentos de automação e mecanização da soldagem com o processo TIG têm sido cada vez mais utilizados em suas aplicações. Porém, tais dispositivos devem garantir no mínimo a mesma qualidade que o processo TIG manual provém, além de melhorar quesitos como a produtividade, operacionalidade e a robustez do processo criando assim uma condição de boa aceitabilidade industrial [24].

O conjunto de equipamentos destinados ao processo TIG orbital é muito grande e variável. Existem opções para a aplicação em tubulações de grande diâmetro, na área petroquímica, até tubos de pequenas dimensões na indústria alimentícia e de trocadores de calor. A Figura 25 mostra alguns mecanismos, chamados de cabeçotes, para soldagem TIG orbital.

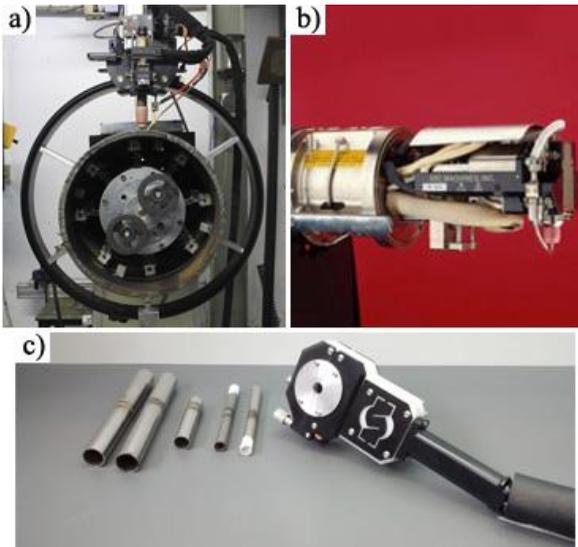


Figura 25. Equipamentos destinados à soldagem TIG orbital. Em a) Cabeçote TIP TIG; b) Cabeçote AMI [57]; c) Cabeçote de câmara fechada SPS [58].

Esta variedade mostra também uma grande vantagem do processo TIG, que devido à independência entre o metal de adição e a tocha, pos-

sibilita uma maior flexibilidade dimensional de seus componentes, viabilizando tochas de tamanhos reduzidos para aplicações específicas em espaço reduzido, como no interior de tubos.

Em trabalhos recentes desenvolvidos no LABSOLDA, Pigozzo [33] e Paes [32] utilizaram o processo TIG para o desenvolvimento de passe de raiz em tubulações de aço carbono. Em ambos os casos foi necessário parametrizar o processo utilizando zonas ou setores, ou seja, alterar os parâmetros em função da posição de soldagem. Ambos convencionaram dividir o tubo analogamente às horas de um relógio, conforme a Figura 26.

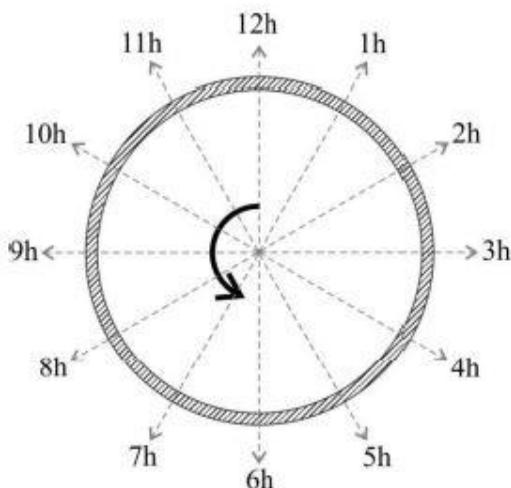


Figura 26. Representação alternativa para soldagem orbital.

É importante ressaltar que no caso de uma soldagem orbital externa, o ponto de início do cordão é geralmente na posição plana situada em 12h, sendo que para soldagem interna esta é invertida, pois a posição plana é em 6h. Nos casos de Paes [32] e Pigozzo [33], a variação da poça com a ação da gravidade foi de fundamental importância no resultado final do processo, chegando à impossibilidade da realização do processo em 360° no caso de Paes [32], onde pelo volume da poça ser relativamente grande esta acabava por não se sustentar em regiões críticas como na sobre cabeça.

Conforme Shirali [59], no processo TIG, o comportamento da poça varia a depender da direção das forças atuando sobre ela. Neste caso,

além das forças de flutuação, eletromagnética e devida à tensão superficial abordadas por Kou [51], também existe a força da gravidade em decorrência das variações na posição de soldagem. O esquema de forças da Figura 27 representa as mudanças na geometria do metal líquido ao longo de uma soldagem orbital.

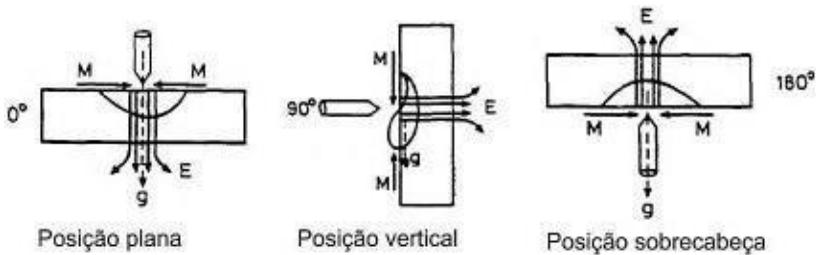


Figura 27. Esquemático da ação das forças no processo TIG com a variação da posição de soldagem. Adaptado de [59].

A posição plana apresenta uma condição favorável à penetração, visto que as forças da gravidade e eletromagnética atuam na mesma direção. Para a posição vertical, existe a presença de dois comportamentos a depender da progressão da tocha, que neste caso pode ser vertical ascendente ou descendente. No primeiro caso a poça tende a escorrer no sentido contrário da direção de avanço, criando uma condição propícia à maior penetração. Em contrapartida, a posição vertical descendente cria uma condição onde a força da gravidade faz a poça escorrer no sentido de avanço da tocha, criando uma barreira sobre o arco, uma condição propícia à menor penetração. Para a posição sobre cabeça, a penetração também é dificultada, pois o vetor da força da gravidade é contrário à força eletromagnética.

Este comportamento da poça sob a ação da gravidade é fortemente influenciado pela tensão superficial do material fundido, criando um fenômeno de auto sustentação que age com maior ou menor intensidade dependendo dos elementos de liga presentes e da temperatura da poça. Geralmente em soldagem fora de posição, para contornar problemas de escorrimento aplica-se corrente pulsada em baixas frequências propiciando uma característica de expansão e contração da poça de fusão que auxilia na sua manutenção [33,62].

3 ENSAIOS PRELIMINARES: DEFINIÇÃO DA JUNTA PARA PREENCHIMENTO COM INCONEL 625

Ensaio preliminares foram conduzidos a fim de definir um perfil de chanfro para ser aplicado na parte interna do tubo que deve receber Inconel 625 em seu preenchimento. Avaliou-se o comportamento do material de adição em dois ângulos de abertura em chanfro V, com o objetivo de identificar qual valor mais se adapta à aplicação. Deste modo, foi fabricada uma junta com ângulo de 60° e outra com ângulo de 80° em cada chapa. A escolha destas duas configurações deve-se ao fato de ambas serem amplamente aplicadas industrialmente, além da característica de fácil usinabilidade no que diz respeito ao seu perfil, facilitando a preparação das juntas.

O estudo foi feito por meio de cordões depositados na posição plana em chapas de aço carbono com espessura de 9,5 mm ($3/8''$). Os chanfros fabricados nos corpos de prova são representados pela Figura 28.

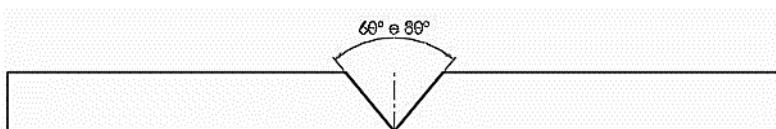


Figura 28. Vista frontal do chanfro .

A dificuldade na soldagem de ligas especiais como o Inconel 625 (AWS ER NiCrMo3) é bastante conhecida. Um dos grandes obstáculos relaciona-se à obtenção de um bom molhamento do cordão de solda, onde muitas vezes torna-se necessária a utilização de técnicas como o emprego de gases com adições de He e H_2 , que apresentam alto potencial de ionização. Tais gases requerem mais calor para ionizar, aumentando a tensão do arco e consequentemente a potência, propiciando um aumento na molhabilidade da poça.

A baixa molhabilidade inerente ao Inconel 625 é decorrente dos teores de cromo e molibdênio, que possuem maior tensão superficial no estado líquido [61]. Assim, é gerada uma condição propícia ao surgimento de defeitos de soldagem caso o perfil da junta não seja selecionado de forma correta.

A Figura 29 exibe o resultado de um passe de preenchimento com Inconel 625 em corpo de prova de aço carbono SAE 1020, mostrando a seção transversal das soldas realizadas nesta etapa com dois ângulos distintos, onde foi aplicado em ambas os mesmos parâmetros de soldagem, mostrados na Tabela 1.

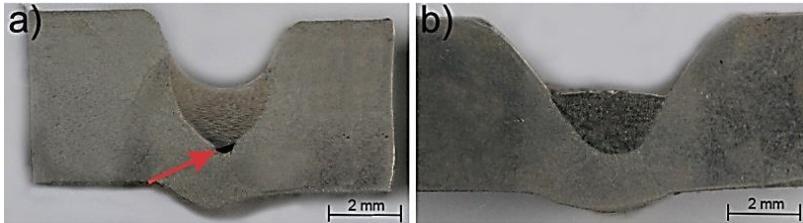


Figura 29. Macrografia das soldas realizadas para avaliação dos chanfros. Em a) 60° de abertura total do chanfro; b) 80° de abertura total do chanfro.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem medidos em chanfro V 60° e 80°.

Parâmetro	Valor
Corrente de pulso	200 A
Corrente de base	120 A
Tempo de pulso	0,4 s
Tempo de base	0,4 s
Velocidade de arame no pulso	2,0 m/min
Velocidade de arame na base	1,3 m/min
Velocidade de soldagem	10 cm/min
Gás de processo	Argônio puro

A junta fabricada com ângulo de 60° mostrou-se mais susceptível ao surgimento de defeitos como falta de fusão no fundo do chanfro. Tal fato poderia ser eliminado mediante o aumento da corrente de soldagem. Porém, isto acarretaria no aumento da diluição de ferro na liga de níquel, podendo alterar suas propriedades de resistência à corrosão, além de aumentar a probabilidade do surgimento de descontinuidades metalúrgicas. Alguns autores também citam o aumento das Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD), que são regiões com alta dureza entre o metal de solda e

o metal de base, além de trincas e o aparecimento de rechupe, em inglês *shrinkage porosity* [14,64].

O comportamento observado com o ângulo mais fechado foi que o arco elétrico ancora nas bordas do chanfro, abrangendo menos o fundo do mesmo, se em ambos for mantida a mesma tensão de referência. Este comportamento gera uma elevada densidade de calor naquela área, causando maior fusão das laterais da junta, conforme visto nas macrografias da Figura 29 e ilustrado no esquema da Figura 30.

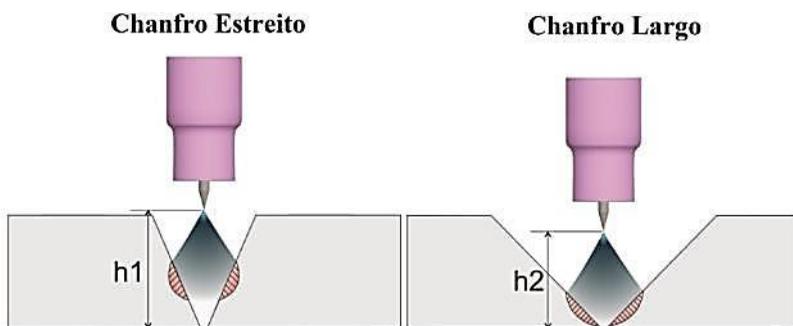


Figura 30. Esquema representativo chanfro estreito (*à esquerda*) e chanfro largo (*à direita*).

Com o chanfro mais aberto, a distância “h” entre o eletrodo e a raiz da junta é diminuída, facilitando a fusão completa desta área. Deste modo, o ângulo 80° mostrou-se mais adequado à obtenção de maior distribuição do arco sobre a junta e uma fusão completa desta. Este espaço disponível no chanfro mais aberto facilita também a utilização de movimentos como a oscilação da tocha, também conhecida como tecimento. Porém sua desvantagem está o fato de necessitar mais material para o preenchimento da junta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os materiais, equipamentos e periféricos utilizados para realização dos ensaios de soldagem, bem como a metodologia aplicada. Para tanto, o capítulo foi dividido em duas etapas. Utilizando a junta dos ensaios preliminares da Seção 3, a primeira etapa está relacionada a ensaios de soldagem investigativos fora de posição, além da parametrização da soldagem com Inconel 625 em chapas planas. Nesta também foram comparadas as técnicas de alimentação de arame no processo TIG, juntamente com um estudo acerca das características propiciadas pela alimentação dinâmica no comportamento da poça e do cordão depositado. A segunda etapa foi destinada aos ensaios de soldagem em tubos cladeados com Inconel 625, reproduzindo as configurações que obtiveram melhor desempenho na primeira etapa. O fluxograma da Figura 31 apresenta esta sequência.

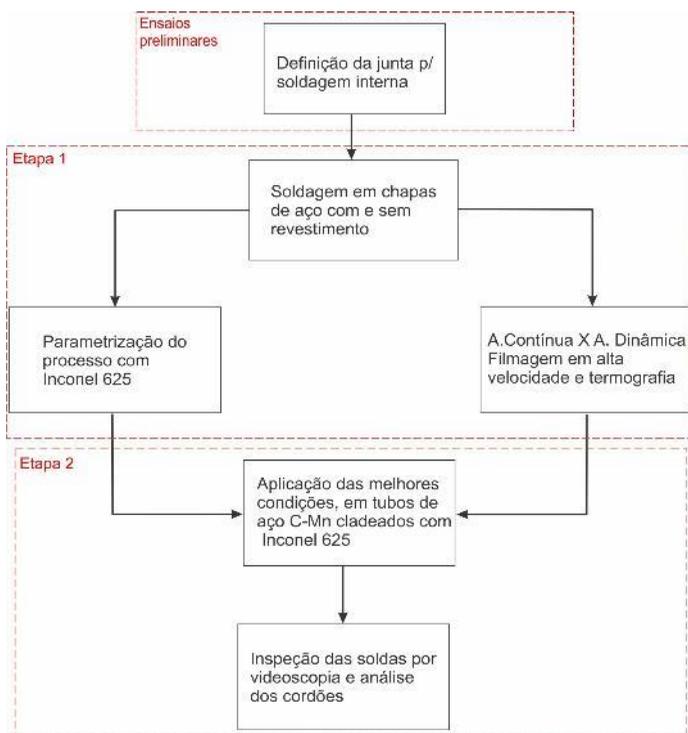


Figura 31. Fluxograma de etapas dos ensaios

4.1 Técnicas de alimentação de arame no processo TIG – Comparativo entre alimentação em velocidade constante, pulsada e dinâmica

Esta etapa do trabalho consistiu em conhecer o comportamento de três técnicas de alimentação de arame, com a utilização de corrente constante e pulsada. O objetivo foi encontrar a técnica que apresentasse menor risco de instabilidades e problemas na soldagem fora de posição. Para tal, foi empregada a alimentação de arame de forma contínua com V_a constante (CVC), a alimentação contínua com V_a pulsada em único sentido (CVP) e a alimentação dinâmica em alta frequência (DAF).

4.1.1 Bancada experimental e equipamentos

Para realizar os ensaios utilizou-se uma bancada basculante para fixação dos corpos de prova. Deste modo, foi possível simular as posições plana, vertical e sobre cabeça, alternando entre as posições sem a necessidade de remover a peça e o manipulador robótico da mesma, conforme mostra a Figura 32.

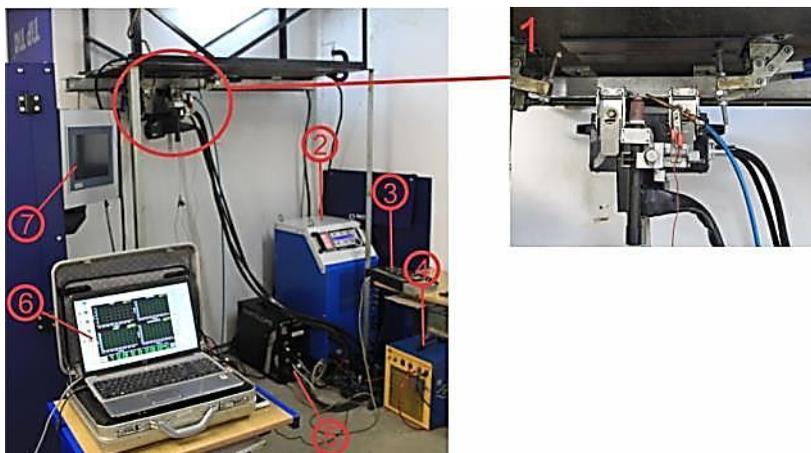


Figura 32. Equipamentos utilizados nos ensaios: 1) Manipulador Tartilope V4; 2) Fonte de soldagem; 3) IHM do manipulador; 4) Unidade de refrigeração; 5) CPU do manipulador; 6) Sistema de aquisição de dados; 7) IHM do TIP TIG.

Para a movimentação da tocha, foi utilizado um manipulador robótico Tartilope V4 com controle *Arc Voltage Control* (AVC), fabricado

pela SPS, o qual possui 3 eixos de deslocamento (X, Y e Z) e permite a execução de trajetórias lineares e orbitais [58].

O manipulador Tartilope V4 possui grande flexibilidade de movimentos durante a soldagem. Com ele, é possível realizar oscilação triangular, senoidal ou trapezoidal. Se necessário, estes movimentos podem ser sincronizados com o formato de onda de corrente por meio de uma porta serial, a qual é responsável pela comunicação entre a fonte de soldagem e o manipulador.

Nestes ensaios, foi utilizada uma fonte de soldagem multiprocessos Digiplus A7 da fabricante IMC, que opera na faixa de 30 A a 600 A. Para o processo TIG, tem-se a possibilidade de corrente alternada, constante e pulsada, além da possibilidade de trabalhar-se com alimentação de arame pulsada e sincronizada com a onda de corrente. Para tal, foi utilizado o cabeçote alimentador STA do mesmo fabricante (IMC). O STA trabalha com faixa de alimentação de 0,2 a 20,0 m/min.

Para os ensaios realizados com alimentação dinâmica em alta frequência, foi necessária a troca do cabeçote alimentador. Utilizou-se o cabeçote da fabricante TIP TIG com faixa de velocidade média de alimentação situada entre 0,2 e 18,0 m/min de arame.

Na aquisição de dados foi empregado o Sistema de Aquisição Portátil (SAP), também fabricado pela IMC. Este sistema possibilita a obtenção de sinais de corrente, tensão, vazão de gás e velocidade de arame, com uma taxa de aquisição de 5 kHz. Estes sinais podem ser avaliados em forma de gráficos e histogramas ao longo da soldagem.

Para parametrização do processo, foi empregado o dispositivo direcionador de arame TIG desenvolvido pelo LABSOLDA, o qual possui 4 graus de liberdade, com 3 eixos de translação e 1 de rotação, mostrado na Figura 33. Este equipamento proporciona maior facilidade para obtenção de uma condição de estabilidade do processo, importante para a fase inicial do trabalho [63].

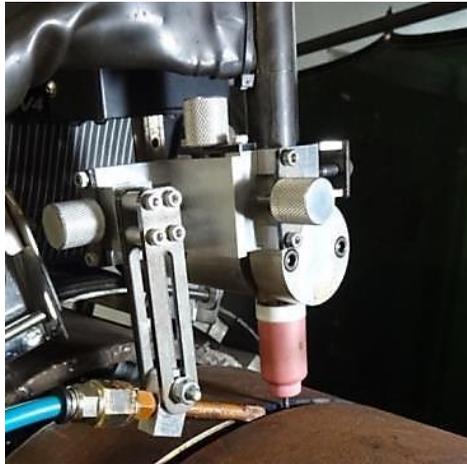


Figura 33. Direcionador desenvolvido no LABSOLDA para parametrização do processo de soldagem TIG.

4.1.2 Corpos de prova e consumíveis de soldagem

Para esta primeira etapa do trabalho utilizou-se como material de base o aço carbono de classificação SAE 1020. Os corpos de prova foram cortados com 300 mm de comprimento e 100 mm de largura em chapas com espessura de 6,4 mm (1/4"), e em seguida chanfrados com 40° em cada chapa.

Para reproduzir uma condição de preenchimento, similar à encontrada na soldagem interna, foi depositado um cordão de solda filetado no lado posterior ao chanfro V, conforme mostrado na Figura 34.

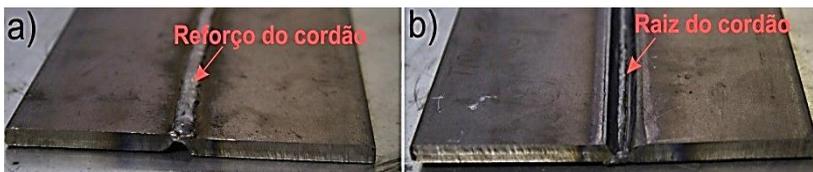


Figura 34. Corpo de prova utilizado para realização dos ensaios. Em a) Vista oposta ao chanfro V. b) Vista superior do chanfro V

Para este passe foi empregado metal de adição de aço carbono e o processo MIG com transferência por curto-circuito de forma a simular

um passe de raiz realizado previamente ao preenchimento. A Figura 35 ilustra a seqüência de soldagem que foi seguida em um corpo de prova.

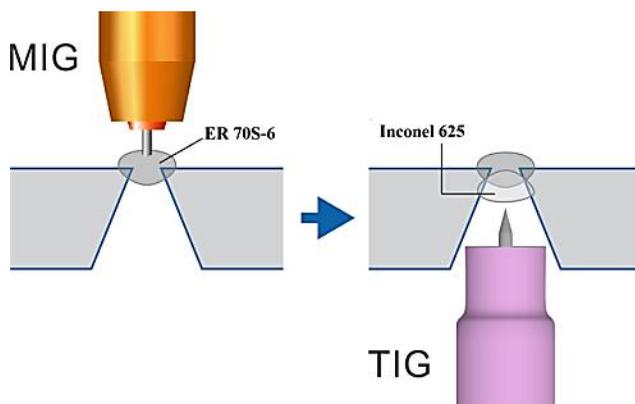


Figura 35. Junta para soldagem em chapas de aço carbono sem revestimento para simular apenas uma condição de preenchimento em chanfro V.

Na Figura 35 é possível visualizar que o primeiro passe com o processo TIG funde o reforço da raiz do cordão com aço carbono. Nestes corpos de prova não há um chanfro “externo” visto que o processo MIG foi aplicado diretamente sobre a parte oposta da chapa, de modo a simplificar os ensaios. Sendo assim, nesta etapa ignorou-se o chanfro externo, pois o foco foi no estudo e desenvolvimento da técnica para soldagem interna de preenchimento.

Na seqüência, para simular uma condição mais próxima da encontrada em tubos cladeados, os corpos de prova tiveram uma nova concepção. Para tal, foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1020 de 12,7 mm (1/2”) de espessura e 200 mm de comprimento por 100 mm de largura. Estas foram revestidas com uma camada de Inconel 625 de 30 mm de largura e aproximadamente 3 mm de espessura, em sua superfície. Além disso, uma geometria de chanfro externa foi selecionada, no qual foi optado por um perfil U, de acordo com referências em trabalhos desenvolvidos no LABSOLDA. A Figura 36 apresenta uma vista em perspectiva da configuração da junta. A execução do passe de raiz e do revestimento estão detalhados na Seção A de apêndices.



Figura 36. Junta para soldagem bilateral em chapa caldeada.

Como gás de proteção para o passe de raiz com aço carbono, foi utilizada a mistura com 75% Ar e 25% CO₂. Para soldagem com Inconel 625, foi utilizado Ar puro (99,99% de pureza). Nos ensaios com o processo TIG, foi adotado o eletrodo de tungstênio dopado com óxido de Tório (AWS EWTh-2) com diâmetro de 2,4 mm. Como metais de adição foram utilizados os arames AWS ER70S-6 e AWS ERNiCrMo-3 com diâmetros de 1,2 mm e 1,0 mm, respectivamente.

4.1.3 Metodologia aplicada

Em chapas de aço carbono sem revestimento, foi realizado o desenvolvimento e parametrização de um procedimento de soldagem com liga 625, utilizando dois passes para preenchimento total do chanfro V. O critério de aceitação dos parâmetros foi a manutenção da estabilidade da poça de fusão e o preenchimento total da junta, de modo que proporcionasse um cordão sem defeitos em todas as posições. Inicialmente, foi optado pela utilização da corrente pulsada, pois sua característica de expansão e contração da poça poderia auxiliar na soldagem fora de posição.

Algumas condições de contorno foram assumidas inicialmente, sendo estas: a alimentação do arame contínua e pela frente do arco (frente de fusão), arame frio (*cold wire*) e ângulo de alimentação radial (de 60° a 70°). Este procedimento serviu como base para as demais variantes. Os parâmetros elétricos e geométricos medidos nos ensaios são mostrados na Tabela 2.

Nos ensaios com corrente constante, optou-se por utilizar os valores médios dos parâmetros encontrados no procedimento de referência com corrente pulsada, estes que também são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para soldagem em chapas com Inconel 625 em chanfro V 80°.

Fonte Digiplus A7	Valor	
Tipo de corrente	Pulsada	Constante
I_{pulso}	150 A	---
I_{base}	80 A	---
* T_{pulso} 1° passe	0,4 s	---
* T_{base} 1° passe	0,2 s	---
* T_{pulso} 2° passe	0,4 s	---
* T_{base} 2° passe	0,4 s	---
$I_{\text{média}}$ 1° passe	127 A	127 A
$I_{\text{média}}$ 2° passe	115 A	115 A
Va no pulso	1,6 m/min	---
Va na base	1,1 m/min	---
Va média	1,4 m/min	1,4 m/min
$P_{\text{média}}$ 1° Passe	1467 W	1467 W
$P_{\text{média}}$ 2° Passe	1300 W	1300 W
Parâmetros do Tartilope V4	Valor	
Velocidade de soldagem (Vs)	7,5 cm/min	7,5 cm/min
U_{pulso} (referência AVC)	12,3 V	---
U_{base} (referência AVC)	10,3 V	---
$U_{\text{média}}$	11,3 V	11,3 V
Tipo de Oscilação	Triangular	Triangular
Amplitude no 1° passe	3,5 mm	3,5 mm
Amplitude no 2° passe	10,0 mm	10,0 mm
Frequência no 1° passe	0,8 Hz	0,8 Hz
Frequência no 2° passe	0,6 Hz	0,6 Hz

Sincronismo	Valor	
LP no 1º passe	33	---
LN no 1º passe	33	---
LP no 2º passe	25	---
LN no 2º passe	25	---
Demais Parâmetros do Processo	Valor	
Diâmetro do eletrodo	2,4 mm	
Distância eletrodo-peça	2,5 mm	
Distância eletrodo-aramé	2,5 mm	
Ângulo de entrada do arame	67°	

*Obs: Parâmetros executados pela fonte de soldagem, porém, controlados pelo Tartilope através da função sincronismo, por meio da porta serial de comunicação.

Na literatura técnica, alguns autores propõem a utilização da corrente eficaz (I_{ef}) como melhor indicativo para comparação entre os processos TIG com corrente pulsada e corrente constante [64]. Porém o objetivo deste trabalho não é a comparação entre os efeitos da corrente diretamente, mas sim a técnica de alimentação de arame no que tange o aumento da robustez do processo. Portanto, a metodologia adotada, que condiz com a seleção da corrente média ($I_{média}$), obtida mantendo-se a mesma potência média e fixando-se os parâmetros geométricos de entrada do arame, torna-se perfeitamente cabível para avaliar o tipo de alimentação empregado. Além disso, a diferença entre a $I_{média}$ e a I_{ef} no caso deste trabalho é de apenas 3 A no primeiro passe, e 5 A no segundo passe. Esta é uma diferença irrelevante, a qual deve ser absorvida por um processo de soldagem estável e robusto.

Conforme mencionado, para a geometria e dimensões do chanfro selecionado foram necessários dois passes de preenchimento, o que condiz com normas para soldagem de revestimentos, visando baixas diluições de ferro na liga de níquel [65]. Os cordões para preenchimento da junta foram chamados neste trabalho de *passé de base* para o primeiro, e *passé de acabamento* para o segundo, visto que alguns parâmetros diferem a depender do passe executado.

Com corrente pulsada, foi necessário definir os parâmetros LP e LN disponíveis no Tartilope para a sincronização da oscilação da tocha

com a onda de corrente. Estes parâmetros representam uma porcentagem da amplitude de tecimento, conforme mostra o esquema da Figura 37.

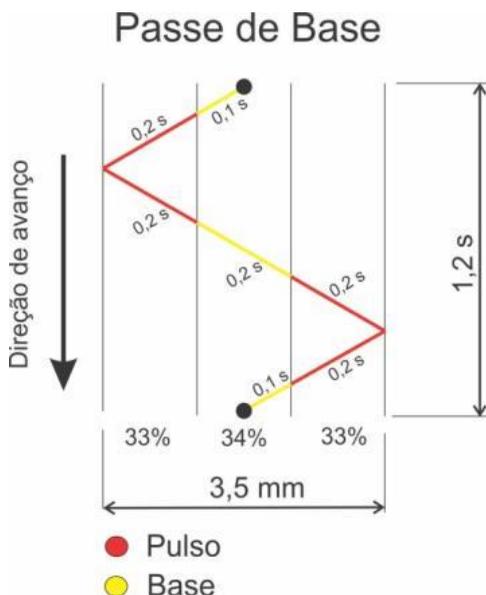


Figura 37. Perfil de deslocamento da tocha com função sincronismo para o passe de base.

Para o passe de base, LP e LN foram definidos como 33, ou seja, 33% da amplitude de tecimento em cada flanco do chanfro, totalizando 66%. Deste modo a amplitude é dividida em 3 partes, sendo que a central possui 34%. Com estes parâmetros e uma frequência de 0,8 Hz informada na IHM do manipulador, a fonte de soldagem executa a pulsagem da corrente. É mostrado em amarelo os locais nos quais é imposta a corrente de base no tempo de 0,2 s, e em vermelho o local onde é imposta a corrente de pulso, no tempo de 0,4 s. Estes tempos foram verificados e comprovados através de aquisições de dados via SAP.

Para o passe de acabamento, aumentou-se a amplitude de tecimento para preencher a junta, reduzindo-se também a frequência de oscilação da tocha para 0,6 Hz. O período resultante é mostrado na Figura 38.

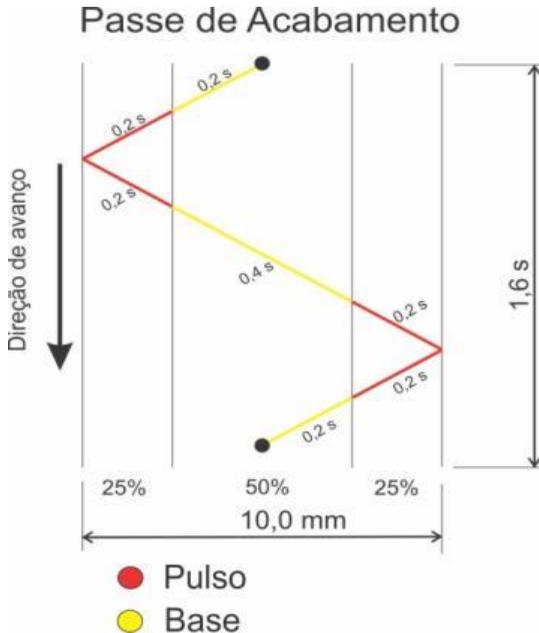


Figura 38. Perfil de deslocamento da tocha com função sincronismo para o passo de acabamento.

Com os parâmetros LP e LN reduzidos para 25% em ambos os lados da oscilação e restando 50% na parte central, o tempo de base aumentou para 0,4 s e o tempo de pulso permaneceu inalterado com valor de 0,2 s, isto em função do período ser de 1,6 s.

Com um procedimento de referência definido, ainda utilizando chapas de aço sem revestimento, alterou-se a técnica de alimentação de arame e o controle da corrente, realizando a soldagem nas principais posições encontradas em um orbital (vertical ascendente, descendente e sobre cabeça), excluindo a posição plana nesta etapa. Com isto, obteve-se a matriz de ensaios da Tabela 3.

Tabela 3. Matriz de ensaios com variantes de alimentação de arame no processo TIG.

Configuração	Técnica de alimentação	Corrente	Sincronismo
C1	Constante	Pulsada	Sim
C2	Constante	Pulsada	Não

C3	Constante	Constante	N/A
C4	Pulsada	Pulsada	Sim
C5	Pulsada	Pulsada	Não
C6	Pulsada	Constante	N/A
C7	Dinâmica	Pulsada	Sim
C8	Dinâmica	Pulsada	Não
C9	Dinâmica	Constante	N/A

*Obs: N/A equivalente a não se aplica.

Durante os ensaios, foram observadas as características da alimentação com velocidade constante, pulsada e dinâmica no que tange ao aumento de estabilidade, molhamento do cordão de solda, além da redução na susceptibilidade de contaminação do eletrodo.

Da Tabela 3, apenas as configurações onde se obteve a qualidade do cordão depositado foram repetidas nas 3 posições de soldagem. As situações de não estabilidade foram descartadas, sendo definidas como não satisfatórias para a realização do procedimento de soldagem em 360°.

Dos ensaios 1 ao 3 e 7 ao 9, o valor utilizado de V_a foi uma média calculada entre os níveis alto e baixo da V_a pulsada, mantendo deste modo a mesma taxa média de deposição.

Na sequência, a soldagem foi realizada nos copos de prova fabricados em chapas cladeadas. Procedeu-se desta forma, pois a fabricação dos chanfros em chapas é mais simples e apresenta menor custo do que em tubos, tornando-se uma alternativa mais rápida na simulação das condições de soldagem. Nesta condição mais próxima da real, apenas as configurações da Tabela 3 que apresentaram bons resultados, é que foram repetidas em todas as posições.

Na sequência, as chapas já revestidas foram soldadas nas 4 principais posições da soldagem presentes no procedimento orbital, sendo incluída a posição plana nesta ocasião. Primeiramente foi realizado o passe de raiz com MIG e consumível de aço carbono no chanfro U, sem que a penetração da solda atingisse o revestimento de Inconel 625. Em seguida, o chanfro V foi preenchido com a liga de níquel em dois passes.

A disposição do conduíte, componente muito importante nos resultados, foi mantida de acordo com a necessidade do processo, dependendo da posição de soldagem. O comprimento utilizado para todos os ensaios foi de 3,5 m. Todas as condições ensaiadas tiveram os sinais de

corrente e tensão medidos em dois canais. Um canal monitorando a queda de tensão eletrodo/peça chamada de U1 e o outro medindo eletrodo/arame chamado de U2, onde foi possível verificar o comportamento do metal de adição e da transferência metálica confrontando com o observado nas filmagens.

Nas configurações mais relevantes foram retirados corpos de prova da seção transversal e realizada macrografia para avaliar o perfil de penetração e a ocorrência de possíveis descontinuidades.

4.1.4 Filmagem de monitoramento por vídeo em alta velocidade e termografia

Na realização dos ensaios da Tabela 3, escolheu-se as configurações mais relevantes para realizar filmagens de monitoramento do processo por meio de vídeo. A filmagem buscou observar o comportamento da poça de fusão e do metal de adição, bem como os fenômenos que ocorreram na sua interação. Para este ensaio utilizou-se uma câmera XIRIS XVC 1000 com função *High Dynamics Range* a uma taxa de aquisição de 55 quadros/s a 1280 *pixels* x 1024 *pixels*, específica para a filmagem do arco elétrico, sendo também chamada de *welding camera*. Esta deve ser utilizada para monitoramento da soldagem interna, em futuras aplicações em campo, do equipamento desenvolvido pelo projeto do LABSOLDA em conjunto com a PETROBRAS.

Durante os ensaios, também foi realizada a filmagem com câmera térmica de modo a verificar de forma qualitativa o gradiente térmico na peça devido à mudança na técnica de alimentação de arame. Para tal foi utilizada uma câmera FLIR modelo SC7000 com faixa de medição de -20 °C a 3000 °C. Para a análise térmica empregou-se o *software Altair*. Estes ensaios foram executados na posição vertical descendente conforme a Figura 39.

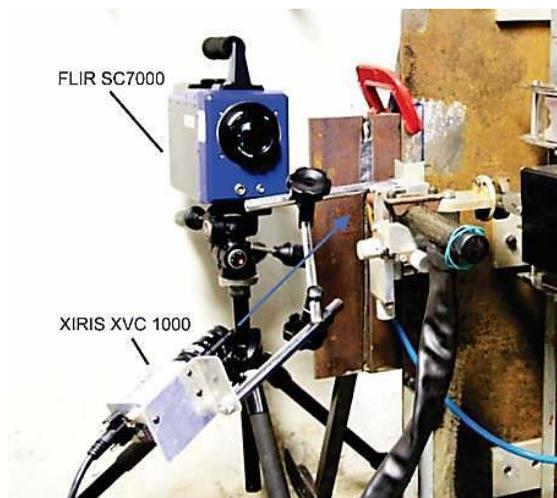


Figura 39. Filmagem termográfica e de monitoramento.

Os corpos de prova utilizados nestes ensaios foram os mesmos mostrados na Figura 34.

A termografia foi realizada de duas maneiras. A primeira com a câmera posicionada na parte posterior da chapa e a segunda técnica com a câmera por cima na tentativa de focar a poça de fusão. Porém, interferências provenientes do arco acabaram por saturar a imagem, deixando-a inconclusiva, quando apontada diretamente para o mesmo. Deste modo, uma forma encontrada para contornar tal problema surgiu durante a realização do passe de acabamento na junta, que possui uma amplitude de oscilação de 10 mm. Esta amplitude relativamente grande tornou possível medir a superfície do cordão diretamente enquanto o arco encontrava-se no flanco oposto do movimento de oscilação da tocha, eliminando a saturação da parte desejada no campo de visão da câmera. Os parâmetros regulados na câmera para os ensaios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros regulados na câmera para termografia.

Parâmetro	Valor
Emissividade (ϵ)	0,8
Escala	300 a 1500 °C
Transmissividade	97%

A soldagem em chapas também facilitou o monitoramento do processo por meio de filmagem em alta velocidade, uma vez que seria uma tarefa mais complexa no interior do tubo devido à restrição de espaço. Com isto, foi possível visualizar fenômenos imperceptíveis macroscopicamente na interação entre o arame e a poça.

Para tal, foi utilizada uma câmera do tipo IDT modelo Y4-S2. A câmera foi configurada com uma taxa de aquisição de 1000 imagens (quadros) por segundo, em uma resolução de 1016 *pixels* x 1016 *pixels*. A distância da câmera à região de interesse foi de aproximadamente 500 mm com um ângulo de 45° em relação ao corpo de prova possibilitando a visualização interna do chanfro V. Para atenuar variações de luminosidade, foi utilizado um sistema de iluminação *laser* da CAVI-LUX. Seu comprimento de onda possui 800 nm e uma potência de 500 W. O foco deste foi posicionado coincidindo com o foco da câmera. Da mesma forma, na lente da câmera foi aplicado um filtro passa-banda de mesmo comprimento de onda do *laser* de modo a ofuscar o arco elétrico. A Figura 40 mostra a disposição do equipamento.

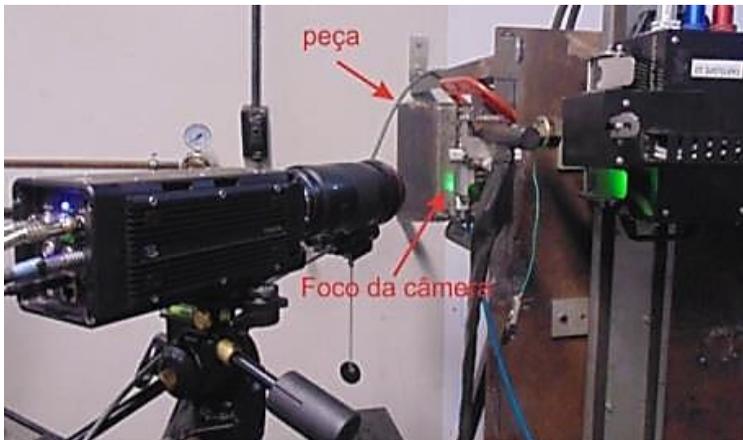


Figura 40. Posicionamento da câmera para filmagem em alta velocidade.

O método de avaliação incluiu a análise detalhada quadro a quadro da filmagem. Para alimentação dinâmica, foram quantificados os valores de frequência, velocidade média de avanço e de recuo, além dos tempos de parada em cada sentido do arame. Para tal, foi necessária a

introdução de um *grid* no vídeo com 0,5 mm em cada divisão de escala, conforme a Figura 41.

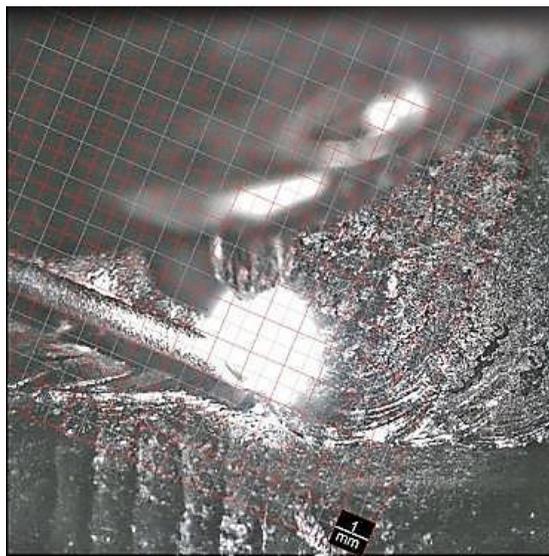


Figura 41. *Grid* para quantificar a movimentação do arame na técnica de alimentação dinâmica.

4.2 Soldagem de união bilateral de tubos cladeados

A terceira etapa do trabalho teve como meta a aplicação das configurações com melhor desempenho dentre as nove da Tabela 3, objetivando a união de tubos revestidos.

4.2.1 Bancada experimental e equipamentos

Para processar os tubos foi necessário o desenvolvimento de uma bancada dedicada, a qual suportasse a tubulação bem como os demais equipamentos, conforme a mostrada na Figura 42.

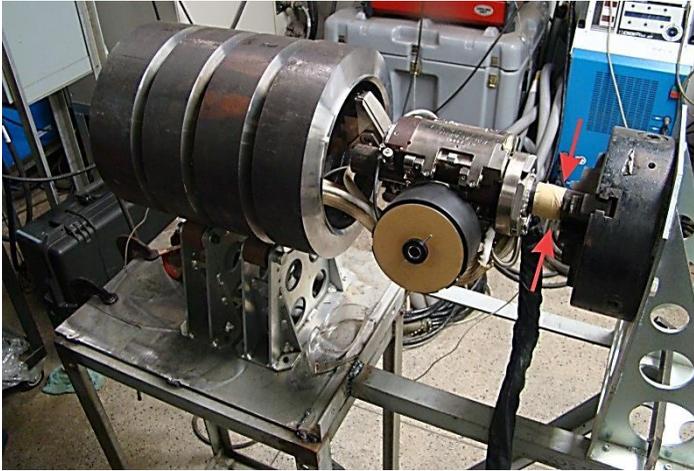


Figura 42. Bancada para soldagem circunferencial interna

Na soldagem circunferencial interna foi utilizado um cabeçote da fabricante *Arc Machines* modelo 81 (AMI M81), que possui as configurações de soldagem externa e interna dependendo da disposição da tocha e o sentido de atuação do motor do *Arc Voltage Control* (AVC). Para aplicação interna, o mesmo foi fixado em um tubo de menor diâmetro, centralizado com a peça a ser soldada e preso por uma placa de três castanhas, conforme indicado pelas setas vermelhas na Figura 42.

O cabeçote trabalha em conjunto com uma fonte Modelo 227 da mesma fabricante, mostrada na Figura 43. Esta fonte trabalha em comando de corrente e é destinada apenas ao processo TIG, tendo a opção de corrente constante ou pulsada. Também disponibiliza uma modalidade chamada de *syncro pulse*, o qual sincroniza o movimento de tecimento do manipulador com a onda de corrente, semelhante ao disponível entre o Tartilope V4 e a fonte Digiplus A7.



Figura 43. Fonte de soldagem Modelo 227 [57].

Após a soldagem circunferencial nos tubos, foi realizada inspeção visual dos cordões com o videoscópio Mentor IQ da *General Electric*, mostrado na Figura 44. Este equipamento possui ponteiros de medição 3D com diâmetros de 6 mm, ideais para inspeção em locais de difícil acesso. Com a medição 3D, foi possível uma análise quantitativa do perfil geométrico da superfície dos cordões, o que serviu de ferramenta de comparação das mudanças ao longo da junta soldada.



Figura 44. Videoscópio para inspeção de superfícies [66].

Para o corte dos anéis de tubos, foi utilizada uma serra pneumática da marca E.H.Wachs modelo Super D. Esta possui a capacidade de cortar tubos de 2” até 32” de diâmetro. O equipamento é mostrado na



Figura 45. Serra de tubos Super D.

4.2.2 Corpos de prova e consumíveis de soldagem

Nesta fase, os corpos de prova foram construídos de forma a simular tubos cladeados com Inconel 625 aplicados na construção de *risers*.

Como substrato, foi utilizado um aço baixo carbono X65 com 197 mm (7 ¾”) de diâmetro interno e 38 mm (1 ½ “) de espessura de parede. Este foi cortado em fatias de 100 mm de largura e então revestido internamente, com uma camada de 30 mm de largura e 3 de espessura, com o processo PTA-P. A Figura 46 mostra uma vista isométrica do tubo, bem como do projeto de junta aplicado.

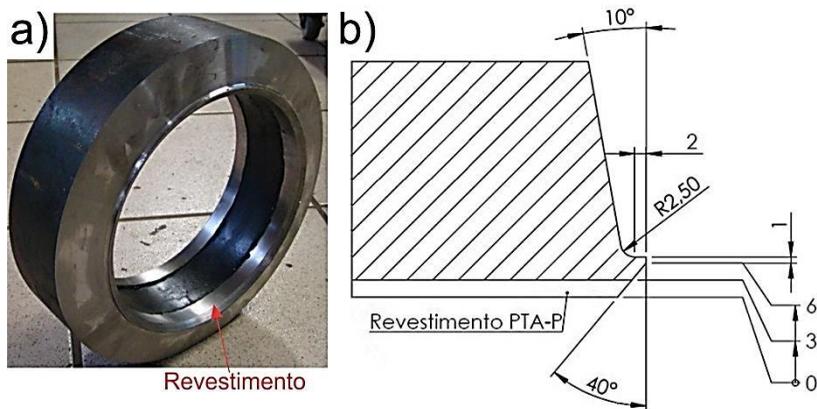


Figura 46. Projeto de junta para união de tubo e chapas cladeadas. Em a) Anel de tubo usinado; b) Junta para união bilateral.

Ressalta-se que as dimensões do chanfro V são equivalentes à espessura da chapa de aço carbono dos ensaios da Etapa 1, aproximadamente 6 mm de profundidade mostrando uma continuidade e ligação entre as etapas. Cada anel de tubo foi usinado com o chanfro nas duas faces, em seguida para facilitar o manuseio os mesmos foram unidos em sequência, por ponteamento com cerca de 1 mm de abertura de raiz (*gap*), formando três juntas, conforme mostrado anteriormente na Figura 42.

O gás de processo utilizado na soldagem com Inconel 625 foi o Argônio puro (99,99% de pureza) e o eletrodo de tungstênio dopado com óxido de Tório (AWS EWTh-2) de diâmetro 2,4 mm. O metal de adição foi o AWS ERNiCrMo-3 com diâmetro de 1,0 mm.

4.2.3 Metodologia aplicada

Esta etapa consistiu da reprodução dos ensaios realizados nas chapas. Portanto foi necessário transpassar os parâmetros elétricos da fonte Digiplus A7, e de movimentação do Tartilope V4, para o conjunto da AMI, de modo a repetir os resultados obtidos para o tubo. Este procedimento foi de fundamental importância para reprodutividade dos cordões e está detalhado na Seção de Apêndice C.

A soldagem nos tubos iniciou pela reprodução da condição C4 com arame pulsado e corrente pulsada. Para tal, foi utilizada a função

syncro pulse disponível no equipamento AMI. Para esta condição, foram realizadas três repetições.

Como o cabeçote de soldagem circunferencial não possui uma função de alimentação dinâmica, foi necessária a adaptação de um conduíte externo, ligando o cabeçote alimentador da TIP TIG com o direcionador do dispositivo, conforme mostra a Figura 47.



Figura 47. Conduíte externo ligando o cabeçote AMI com o alimentador do TIP TIG.

Para a aplicação de alimentação dinâmica foram soldadas três juntas de tubo, como forma de repetição, uma com a aplicação de corrente pulsada na condição C7 e duas com corrente constante, condição C9.

Posteriormente uma inspeção da superfície dos cordões foi realizada por videoscopia. Os passes de base e acabamento foram medidos por meio do *software* do equipamento, que deu origem ao perfil da seção transversal.

Também foram retiradas amostras para macrografias das posições plana (6h), vertical ascendente (3h), sobre cabeça (12h) e vertical descendente (9h).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO- SOLDAGEM COM O PROCESSO TIG

A seção dos resultados com Inconel 625 foi dividida em duas linhas. A primeira delas está relacionada à investigação das técnicas de alimentação de arame no processo TIG e do comportamento fora de posição, além da soldagem de chapas cladeadas. A segunda mostra a aplicação das melhores condições encontradas na primeira etapa em tubos revestidos.

5.1 Técnicas de alimentação de arame visando o aumento da robustez na soldagem TIG

Foram avaliadas as características provenientes da alimentação contínua e dinâmica de arame, visando os benefícios que cada uma pode acrescentar na realização do processo de soldagem fora de posição com Inconel 625. As análises dos resultados abordam os seguintes tópicos:

- Aspecto da superfície dos cordões depositados e macrografias;
- Análise dos sinais de corrente e tensão do processo como forma de visualizar o modo de transferência metálica;
- Descrição do comportamento da poça durante o processo de soldagem por análise visual e por meio de filmagem;

5.1.1 Técnica de alimentação de arame contínua com V_a constante

Com esta técnica de alimentação foram realizadas três configurações, enumeradas em C1, C2 e C3, que foram descritas previamente na Seção Tabela 3. Com a aplicação de corrente pulsada foram realizadas duas configurações: uma com a oscilação da tocha sincronizada com a onda de corrente (C1), e outra sem a oscilação sincronizada (C2).

Para a posição vertical ascendente e descendente, obteve-se cordões com bom molhamento e bom aspecto da superfície. Foi observada a presença de uma transferência metálica de modo intermitente. Tal situação representou uma tendência de contaminação do eletrodo devido à aleatoriedade no tamanho das gotas formadas na ponta do arame.

Para a posição sobre cabeça a continuidade do processo foi comprometida pela contaminação do eletrodo. Uma gota de grandes proporções foi formada e puxada pela força da gravidade, tocando o eletrodo.

Isto comprometeu a geometria do cordão depositado, conforme mostra a Figura 48 da soldagem em chapas de aço carbono.

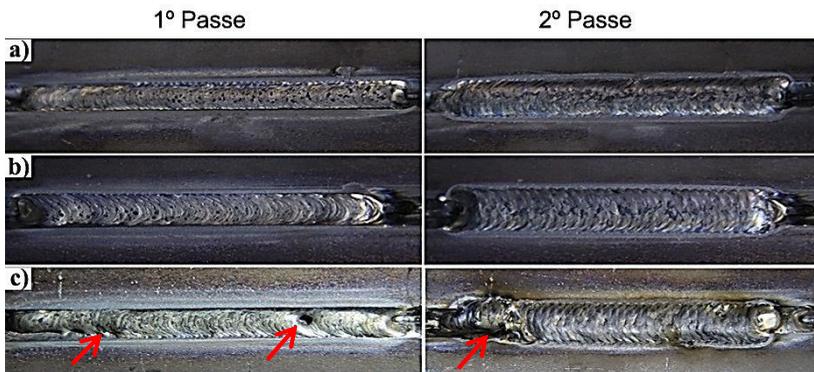


Figura 48. Aspecto superficial para C1. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) sobre cabeça.

Como explicado na seção referente à metodologia, o sinal de tensão foi obtido durante a soldagem em dois canais, como mostra a Figura 49. O canal U1 (curva em vermelho na Figura 49) exibe valor correspondente à diferença de potencial entre o eletrodo e a peça, e o canal U2 (curva em azul) correspondente à diferença de potencial entre o eletrodo e o metal de adição. Se as tensões U1 e U2 possuírem valores semelhantes, o arame apresenta o mesmo potencial da peça, e a transferência metálica resultante é em ponte.

Mediante o sinal elétrico de tensão referente ao passe de acabamento, mostrado na Figura 49, confirma-se que o modo intermitente de transferência metálica foi predominante, com curtos períodos de ponte, conforme indicados pelas setas na imagem.

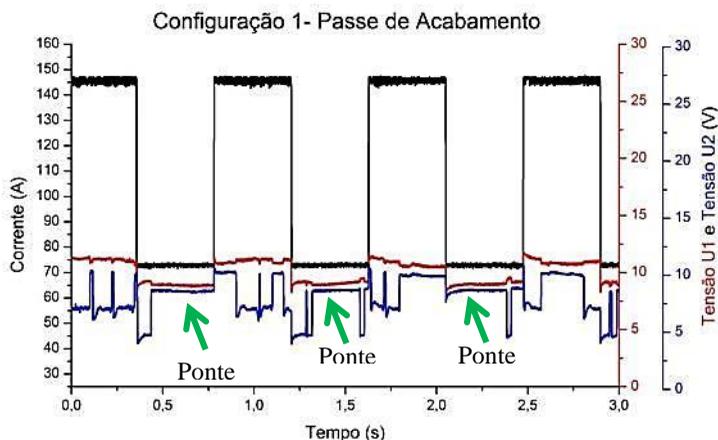


Figura 49. Sinais de corrente e tensão para C1.

É possível notar uma pequena diferença entre os sinais U1 e U2, deslocando a curva eletrodo/arame (azul) para baixo, mesmo nos momentos de transferência em ponte. A diferença entre as curvas foi identificada como sendo de 0,50 V ao longo de todo o monitoramento. Desta forma, realizou-se uma verificação do sistema de medição onde foi encontrado um erro sistemático de 0,17 V entre os canais. O restante, de 0,33 V foi atribuído à impedância da coluna de arco existente entre o eletrodo/arame, que é menor que a existente na coluna de arco eletrodo/peça. Isto permite que parte da corrente passe pelo arame em contato com a poça (local de menor impedância), resultando na diferença observada. Tal análise é válida para as demais configurações ensaiadas, nas quais foi notado o mesmo comportamento. Com base nas variações na tensão U2, visualiza-se que os períodos de duração não são uniformes, fato que está associado a tamanhos diferentes de gotas.

Ao modificar o processo para o emprego de corrente constante, mantendo-se a V_a também constante (C3), houve atenuação das intermitências na transferência metálica.

O maior problema observado na utilização da C3 relaciona-se a repentinas mudanças na transferência metálica entre o modo de transferência em ponte e o intermitente, o que provocou uma tendência de contaminação do eletrodo e geração de defeitos de soldagem. Foi notado que em virtude da velocidade de alimentação média (1,4 m/min) ser relativamente baixa, o processo torna-se susceptível à formação de gotas, pois qualquer variação mínima na entrada do arame no arco, este pode for-

mar uma espécie de barreira fazendo com que o arame funda precocemente.

Embora com a C3 seja possível a obtenção de um cordão com qualidade em posições menos críticas como a plana, o processo não se torna robusto e repetitivo quando aplicado fora de posição. Isto proporciona muitas vezes a origem de cordões como o mostrado na Figura 50, com baixo molhamento e falta de uniformidade geométrica na posição sobre cabeça. Deste modo, a técnica de arame em velocidade constante não foi aplicada em chapas cladeadas.

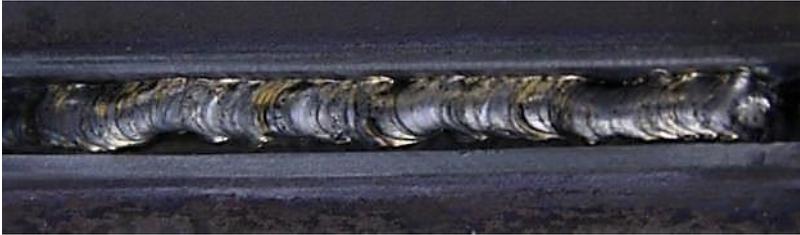


Figura 50. Aspecto superficial passe de base na sobre cabeça para C3.

Por meio de uma filmagem de monitoramento com a câmera XIRIS em conjunto com a aquisição dos sinais foi visualizado o comportamento ao longo do processo. Deste modo o autor selecionou quadros representativos mostrados na Figura 51. O modo de transferência em ponte foi alcançado devido relação entre potência e V_a , conforme apresenta o gráfico dos sinais elétricos, também na Figura 51.

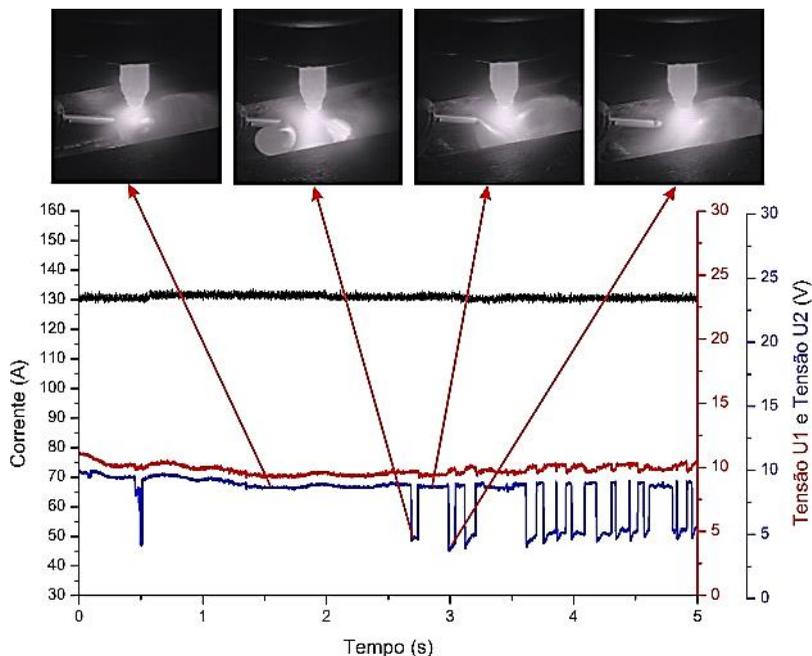


Figura 51. Sinais de corrente e tensão para C3 em conjunto com o comportamento da transferência metálica durante a soldagem.

No primeiro quadro, percebe-se uma condição em que o metal de adição se encontra em contato com a poça de fusão, o que é característico da transferência em ponte. Porém, a partir de determinado momento do processo ocorreram intermitências na transferência metálica, de modo que houve a formação de gotas grandes na ponta do arame, que podem ser visualizadas no segundo quadro. As mudanças repentinas na transferência estão associadas ao fato da velocidade de arame ser relativamente baixa, juntamente com mudanças geométricas na junta como *high-low*, que podem causar variações na potência devido à alterações no comprimento do arco. Travamentos devido ao atrito entre arame/conduíte também causam alterações no modo de transferência, bem como mudanças no ponto de entrada do arame no arco, causadas pelo raio de curvatura do mesmo, que desloca-se com seu desbobinamento.

O terceiro quadro da Figura 51 representa o momento em que a gota grande é transferida e causa uma perturbação na poça, gerando uma onda que se propaga até a energia ser dissipada pelo efeito massa-mola-amortecedor existente na mesma. Este efeito foi assinalado no 4º qua-

dro, no qual a geometria da poça, e conseqüentemente do cordão, foi modificada. Deste modo, quando há a mudança repentina no modo de transferência, a formação aleatória de gotas modifica a frequência dos destacamentos. Isto proporciona mudanças no aspecto da superfície do cordão, fato menos provável na aplicação da alimentação dinâmica, que será apresentado na Seção 5.1.3.

5.1.2 Técnica de alimentação de arame contínua com Va pulsada, nível alto e baixo de velocidade em um único sentido

A técnica de alimentação de arame aplicada nos ensaios desta seção possui dois níveis distintos programados pelo operador, e é também conhecida como pulsada. Com a aplicação de corrente pulsada e a oscilação da tocha em sincronismo, a condição foi designada de C4. Ao aplicar primeiramente em chapas de aço carbono sem revestimento, observou-se boa molhabilidade da poça, estabilidade, e sustentação da mesma para todas as posições. Este fato classificou a condição C4 para utilização nas chapas cladeadas com Inconel 625. É importante ressaltar que foi possível manter os mesmos parâmetros elétricos ao longo da junta, fato que pode auxiliar na manutenção das propriedades metalúrgicas da mesma.

A inspeção visual das juntas e suas respectivas macrografias não indicaram nenhuma descontinuidade macroscópica como falta de fusão, porosidade e mordeduras, conforme mostra a Figura 52.

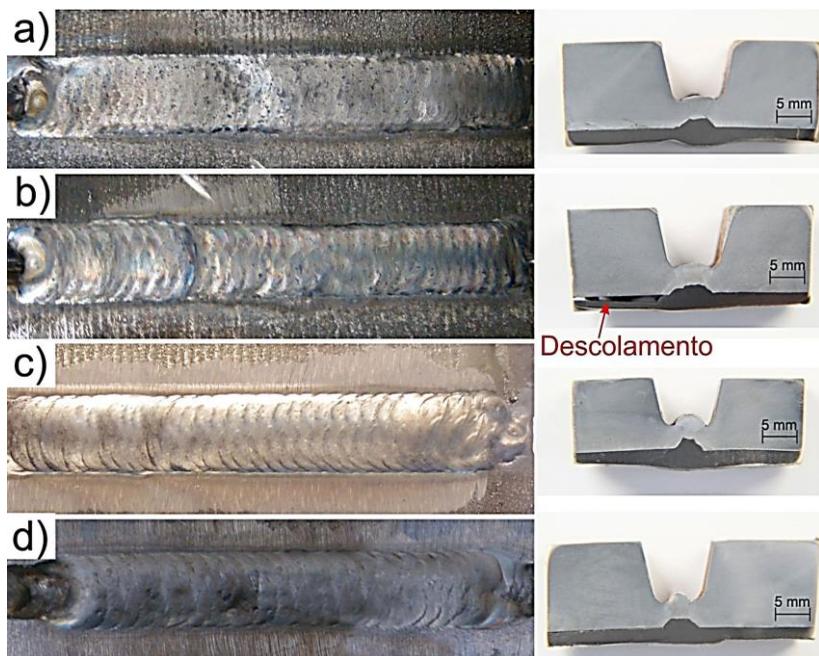


Figura 52. Soldagem em chapas cladeadas, aspecto superficial e macrografias para C4. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) Plana; d) Sobre cabeça.

Durante o processo, verificou-se que os pulsos de corrente nos flancos auxiliaram na fusão homogênea das laterais do chanfro, evitando possíveis discontinuidades como falta de fusão e alterações na geometria do cordão. A baixa energia aplicada inicialmente no revestimento com PTA-P provocou o descolamento da camada durante o processo de usinagem, conforme mostra a Figura 52b. Mesmo assim, o passe com Inconel 625 fundiu uniformemente preenchendo totalmente o perfil do chanfro V e a raiz do passe com aço carbono.

A Figura 53 mostra os sinais elétricos medidos para o passe de base e o comportamento da transferência ao longo do processo de soldagem.

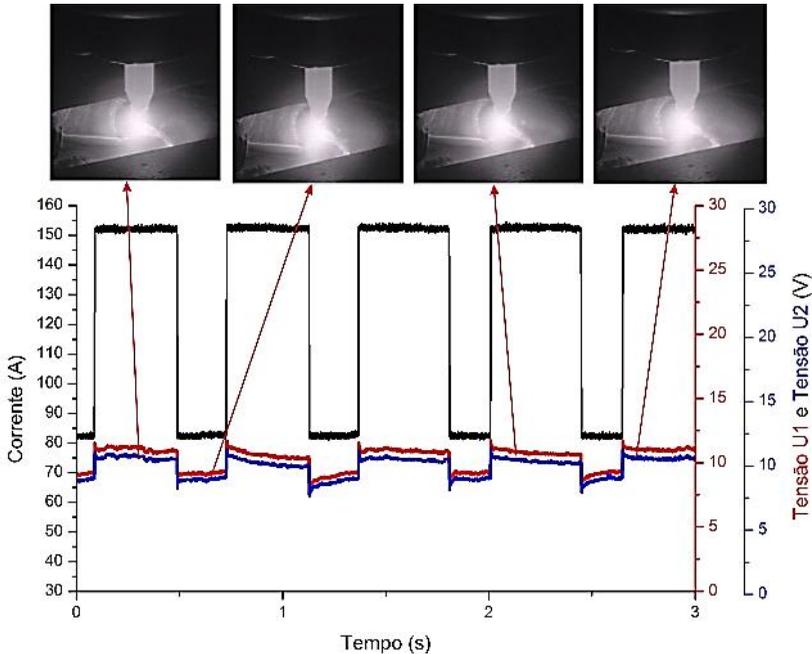


Figura 53. Sinais de corrente e tensão no passe de base para C4 em conjunto com o comportamento da transferência metálica.

Nota-se, na Figura 53, que o valor de tensão U2(em azul) é similar a U1 (em vermelho), sem perturbações ao longo do tempo. Tal fato está associado a uma transferência metálica em ponte. Para a representação e análise do comportamento do processo retirou-se uma sequência de quadros da filmagem com a câmera XIRIS. Observou-se uma transferência metálica predominantemente em ponte, correlacionando com os sinais de tensão durante o processo.

Para este modo de transferência, supõe-se que a poça entra em uma espécie de regime constante no qual não há perturbação das linhas de fluxo convectivo, permanecendo um gradiente de tensão superficial inalterado. Porém, a corrente pulsada força o movimento da poça de fusão por meio da sua expansão e contração. O pulso de corrente e consequente aumento da potência pode auxiliar na modificação da tensão superficial pelo aumento da temperatura média da poça, espalhando o material líquido, além de ser auxiliado pelo aumento da pressão do jato plasma com o acréscimo de corrente. Isto, em conjunto com o sincro-

nismo da oscilação da tocha, proporciona uma ação mecânica sobre o metal fundido e auxilia para que o mesmo seja direcionado nas bordas do chanfro.

No passe de acabamento representado pelo gráfico da Figura 54, é possível notar a ocorrência de perturbações em U2, indicando intermitências (formação de gotas) na transferência metálica.

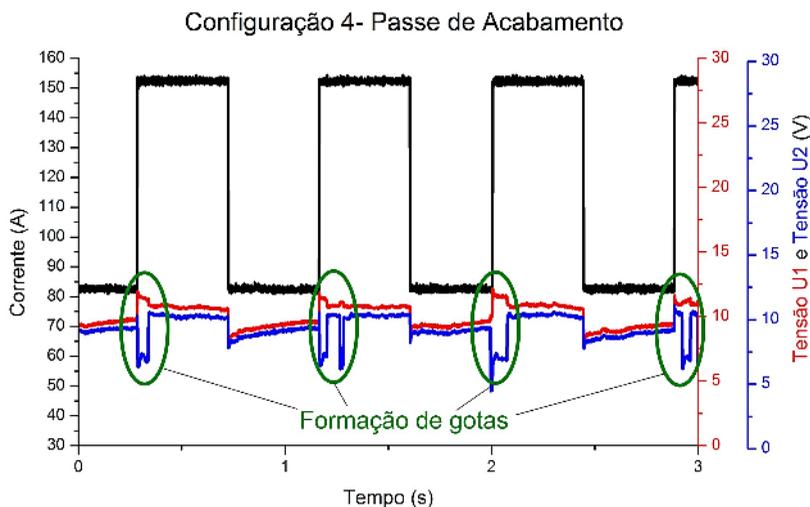


Figura 54. Sinais de corrente e tensão para o passe de acabamento para C4.

Nota-se que as intermitências ocorreram na troca de base para pulso de corrente, comportamento semelhante ao relatado por Pigozzo [33]. A formação de gotas na mudança da corrente de pulso para base, poderia ser atenuada pela implementação de uma rampa de subida e descida da corrente, acompanhando a dinâmica do alimentador. Porém, esta rampa também mudaria em função da frequência de pulsação da corrente, tornando-se mais uma variável a ser parametrizada.

Da filmagem em alta velocidade o autor selecionou dois instantes a fim de representar os fenômenos de alteração no modo de transferência ocorridos durante o processo. A Figura 55 mostra a realização do passe de base nas posições plana e sobre cabeça.

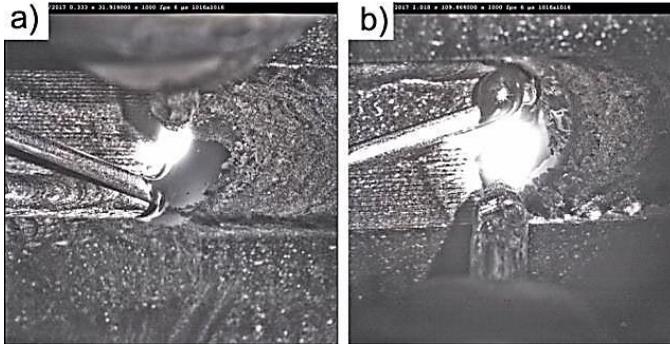


Figura 55. Comportamento da transferência metálica com a mudança na posição de soldagem. Em a) Posição plana; b) Posição sobre cabeça.

A Figura 55a mostra uma transferência por ponte na posição plana a qual teoricamente é uma situação menos crítica. Porém, para a condição mostrada na Figura 55b (posição sobre cabeça) nota-se a formação de uma gota na ponta do arame a qual, devido à ação do pulso de corrente, é empurrada no sentido oposto à força de gravidade, forçando sua transferência para a poça. Desta forma, mesmo com a ocorrência de eventuais intermitências, é possível obter resultados satisfatórios no cordão, desde que a força do jato plasma vença a força peso da gota.

Porém, estes eventos de formação de gotas grandes podem ocorrer de forma aleatória, derivando de fatores como mudanças repentinas na posição de entrada do arame no arco, o travamento do arame no conduto pelo atrito, além de alterações geométricas na superfície de deposição, que podem mudar a altura do arco, a potência e consequentemente o modo de transferência do arame.

Com a função sincronismo do Tartilope desabilitada, repetiu-se o processo nas mesmas condições da C4, condição chamada de C5. Deste modo, a fonte comanda a pulsação da corrente e não mais o manipulador, sendo que cada equipamento (fonte e Tartilope) produz sua ação independente do outro.

O impacto sobre o processo foi perceptível pelo operador, resultando em um cordão com falta de fusão nos flancos. O segundo passe foi o mais crítico, uma vez que a amplitude de tecimento foi maior. Os aspectos da superfície dos primeiro e segundo passes são mostrados na Figura 56.



Figura 56. Aspecto superficial da condição C5 para posição sobre cabeça.

Esta condição não foi replicada em peças cladeadas por conta da falta de robustez do processo. Da mesma forma a aplicação de corrente constante e Va pulsada (C6) não apresentou resultados satisfatórios, por isso foi desconsiderada.

5.1.3 Técnica de alimentação dinâmica com corrente pulsada e constante

A partir desta seção são apresentados os resultados obtidos com a utilização da alimentação dinâmica em alta frequência.

A corrente pulsada possui algumas vantagens consolidadas para a execução do processo como o controle da poça fora de posição e boa fusão dos flancos da junta. Esta também possui vantagens metalúrgicas relativas ao refino de grão e à redução de porosidades. Portanto, torna-se de grande mérito a tentativa de unir tais benefícios com a técnica de alimentação dinâmica.

Com a aplicação de corrente pulsada em sincronismo com o tecimento (C7) obteve-se bons resultados desde os primeiros ensaios de parametrização em chapas de aço carbono sem revestimento. Deste modo foi julgada como adequada para realização do processo fora de posição.

Em peças revestidas, o comportamento não foi diferente, conforme identificado em uma inspeção visual dos cordões representada pela Figura 57.

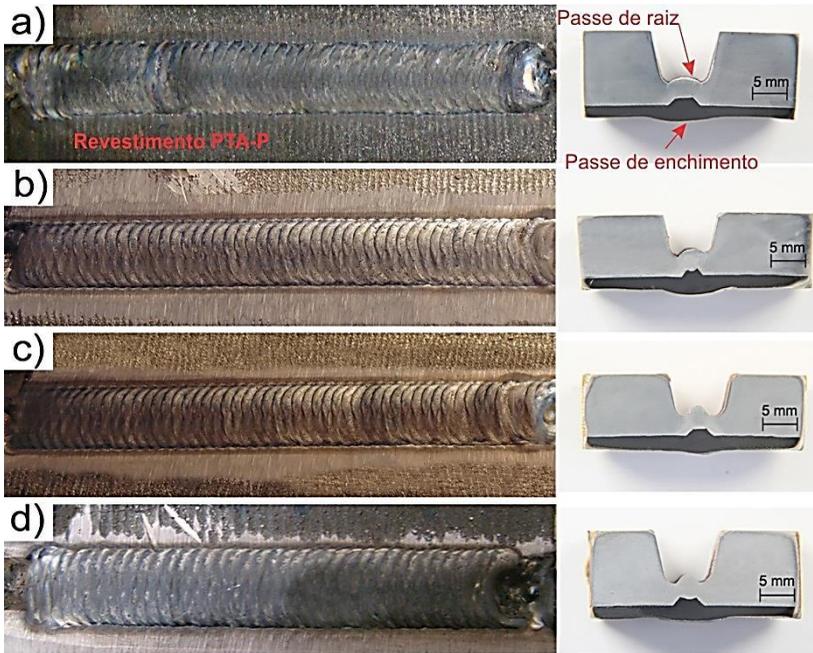


Figura 57. Soldagem em chapas cladeadas, aspecto superficial C7. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) Plana; d) Sobre cabeça.

A análise da superfície dos cordões não apontou o indício de descontinuidades. O mesmo pode ser concluído para as macrografias da seção transversal. Percebe-se uma superfície mais “escamada” para esta condição quando comparada ao arame contínuo.

Uma mudança sutil no perfil de penetração do Inconel foi notada para as posições vertical descendente (Figura 57b) e sobre cabeça (Figura 57d). Tais posições possuem tendência a apresentar menores penetrações, gerando uma situação propícia ao aparecimento de descontinuidades como falta de fusão na interface com o passe de raiz, realizado com aço carbono.

Comparando este resultado com o da C4 (Va pulsada e corrente pulsada) a principal diferença macroscópica se deu pela vibração do arame, passando ao operador de soldagem uma sensação de maior estabilidade no processo e menor tendência de contaminação do eletrodo, embora a C4 também tenha gerado cordões de solda satisfatórios em todas as posições de soldagem.

Não obstante, houve grande diferença comparando-se com a C1 (Va constante e corrente pulsada) onde para a mesma Va média (em torno de 1,4 m/min) com alimentação dinâmica a estabilidade foi mantida em todas as posições.

Ao desabilitar a função sincronismo, o processo foi repetido. Esta condição foi denominada de C8. Diferentemente da aplicação de arame contínuo, obteve-se resultados satisfatórios de estabilidade do processo e aspecto dos cordões. A Figura 58 exibe os passes de base e acabamento realizados na posição sobre cabeça em chapas de aço carbono sem revestimento.

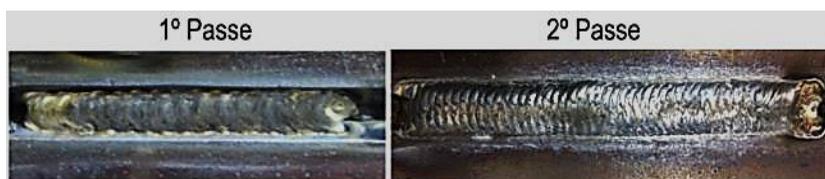


Figura 58. Aspecto superficial referente à condição C8 na posição sobre cabeça.

Os resultados mostram que o sincronismo pode ser opcional para a alimentação dinâmica em alta frequência. A hipótese para isto é que a frequência de transferência das gotas torna-se mais homogênea pela vibração do arame, enquanto que na alimentação de forma contínua existe a formação de gotas grandes, as quais podem se formar de diferentes tamanhos, modificando a frequência de destacamento e gerando falta de fusão nos flancos da junta. Esta ferramenta pode tornar-se útil em aplicações manuais, onde um soldador com pouca experiência não mantém um sincronismo preciso da corrente pulsada com o tecimento. A alimentação dinâmica pode tornar o processo mais amigável e de fácil execução.

Ao alterar o controle da corrente para o modo constante, situação denominada de C9, também verificou-se boa estabilidade bem como uma poça de fusão uniforme sem a formação de gotas grandes como na alimentação contínua (C3).

Com o surgimento da técnica de alimentação dinâmica de arame, é possível afirmar a existência de duas formas de transferência intermitente: uma indesejada para soldagem fora de posição, que dá origem a gotas de diferentes tamanhos na ponta do arame, e é encontrada na alimentação de arame contínuo. E a segunda diz respeito a uma transferên-

cia intermitente, aliada ao avanço e recuo do metal de adição. Neste caso, fora da posição plana é possível obter resultados satisfatórios.

A Figura 59 mostra a vista superior dos cordões para a condição com corrente constante.

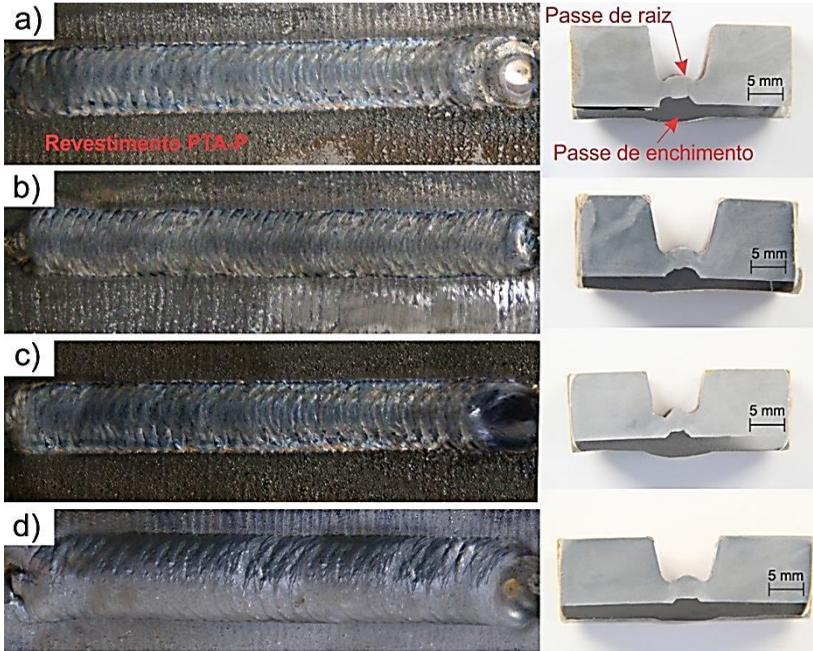


Figura 59. Soldagem em chapas cladeadas, aspecto superficial C9. Em a) Vertical ascendente; b) Vertical descendente; c) Plana; d) Sobre cabeça.

Os resultados mostram a possibilidade de se obter cordões de boa qualidade com corrente constante, por meio da aplicação da vibração no arame. A utilização de corrente pulsada para a sustentação da poça fora de posição é opcional. Nos cordões em chapas cladeadas também foram realizadas análises de composição química por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) as quais são apresentadas e discutidas na Seção B de apêndices.

Com o monitoramento do processo com a câmera XIRIS em 55 quadros/s, tanto para corrente constante quanto para pulsada, observa-se macroscopicamente, durante a soldagem, o comportamento representado pela Figura 60.

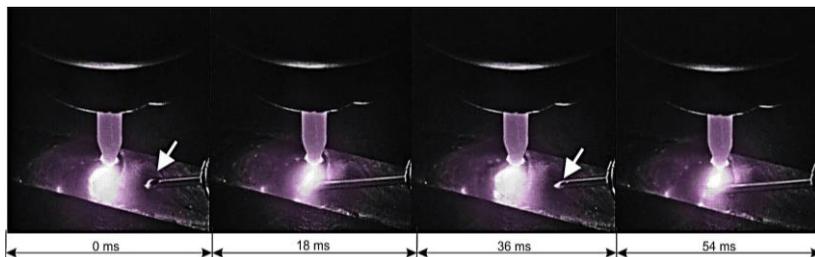


Figura 60. Sequência de quadros da filmagem do passe de base para C7.

Os quadros presentes na Figura 60 são referentes a 4 quadros em sequência. Analisando a imagem, nota-se o movimento de avanço e recuo, que proporciona a formação de uma pequena gota na ponta do arame, mostrada no primeiro e terceiro quadros.

Em outro momento, como na Figura 61, é possível visualizar a ação da tensão superficial arame/poça, puxando a mesma até o rompimento do filete de metal líquido. Em uma ocorrência isolada ao romper o filme metálico, a poça oscilaria até a energia total ser dissipada pelo seu sistema natural de amortecimento. Porém, o importante é que tal fenômeno ocorre a cada avanço e recuo do metal de adição. Deste modo, a resposta dinâmica da poça é lenta e sua constante de amortecimento, baixa o suficiente para não atenuar por completo a oscilação até o próximo ciclo do arame. Assim, é possível afirmar que macroscopicamente a superfície da poça para o processo com alimentação dinâmica está em constante agitação.

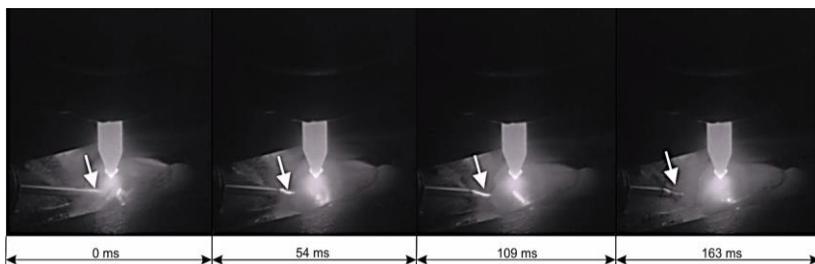


Figura 61. Ação da tensão superficial durante o recuo do arame no processo com alimentação dinâmica.

Com o monitoramento por filmagem em alta velocidade (1000 quadros/s) foi possível quantificar o comportamento médio de movi-

mentação do arame, ilustrado através dos dados da Tabela 5 e do gráfico da Figura 62. Dos resultados mais relevantes, ressalta-se a variação da amplitude de avanço e recuo do arame com a posição de soldagem. Esta posição também que altera o arranjo em que se encontrava o conduíte.

Tabela 5. Valores médios de movimentação do arame obtidos durante a soldagem com a condição C7.

Instante/Posição de soldagem		Plana	Ascendente	Sobre Cabeça	Descendente
Recuo	Em movimento (ms)	9,0	0,0	11,1	23,3
	Parado (ms)	13,5	0,0	11,8	9,3
	Amplitude (mm)	2,4	0,0	3,1	6,3
	Va recuo (m/min)	16,2	0,0	16,9	16,3
Avanço	Em movimento (ms)	11,7	8,7	10,5	17,6
	Parado (ms)	14,1	43,8	14,1	2,1
	Amplitude (mm)	3,5	1,2	4,2	7,3
	Va avanço (m/min)	18,0	8,5	24,3	25,1
Va média resultante (m/min)		1,3±0,2	1,4±0,2	1,4±0,2	1,2±0,1
Período (ms)		48,3±1,2	52,6±0,6	47,4±0,9	52,3±0,8
Frequência de oscilação (Hz)		20,7±0,5	19,0±0,2	21,1±0,4	19,1±0,9

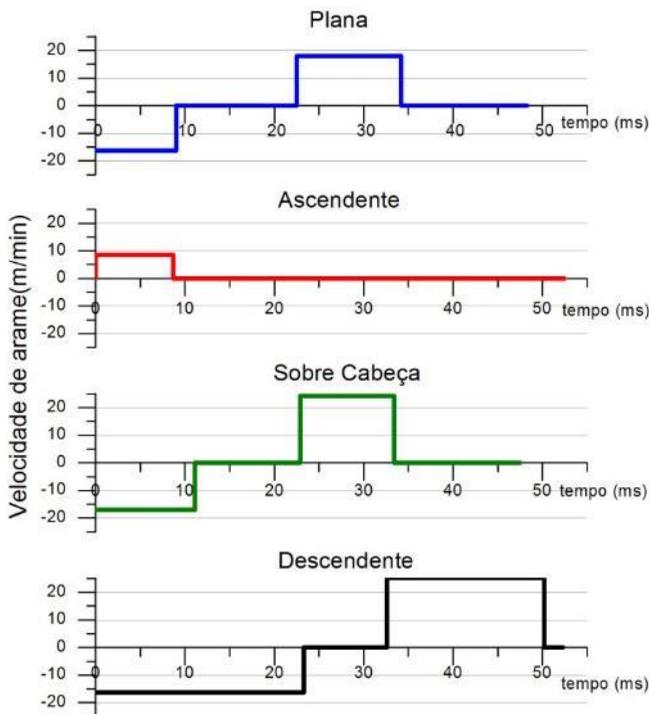


Figura 62. Período de movimentação do arame para C7.

Destaca-se que, para a posição vertical ascendente, não houve recuo, apenas um movimento de avanço e parada. Este comportamento já fora observado por Silva [25], que obteve transferência em ponte, mesmo com o cabeçote alimentador oscilando o metal de adição na entrada do condúite. É importante ressaltar que esta condição não atua conforme o propósito de existência da alimentação dinâmica e assemelha-se a uma alimentação contínua com V_a pulsada.

Para a aplicação de corrente constante, condição C9, também foram encontradas as mesmas variações na oscilação do arame. Comparando os dados da Tabela 5 com os da Tabela 6 é possível notar que os valores de amplitude e tempos de parada diferem inclusive para a mesma posição de soldagem. A Figura 63 mostra os dados em forma de gráficos de movimentação para cada posição de soldagem.

Tabela 6. Dados médios de movimentação do arame medidos durante a soldagem com a condição C9.

Instante/Posição de soldagem		Plana	Ascendente	Sobre Cabeça	Descendente
Recuo	Em movimento (ms)	9,8	8,8	14,5	19,3
	Parado (ms)	13,0	16,2	10,5	7,6
	Amplitude (mm)	2,5	0,8	3,8	4,6
	Va média (m/min)	15,4	5,6	15,9	14,3
Avanço	Em movimento (ms)	11,3	9,7	12,4	14,3
	Parado (ms)	13,9	18,0	10,8	11,8
	Amplitude (mm)	3,6	2,0	5,0	5,9
	Va média (m/min)	19,4	12,8	24,3	24,9
Va média resultante (m/min)		1,4±0,1	1,4±0,1	1,4±0,2	1,4±0,2
Período (ms)		48,0±0,9	52,6±2,2	48,3±0,7	53,4±2,5
Frequência de oscilação (Hz)		20,8±0,4	19,0±0,8	20,7±0,3	18,7±0,9

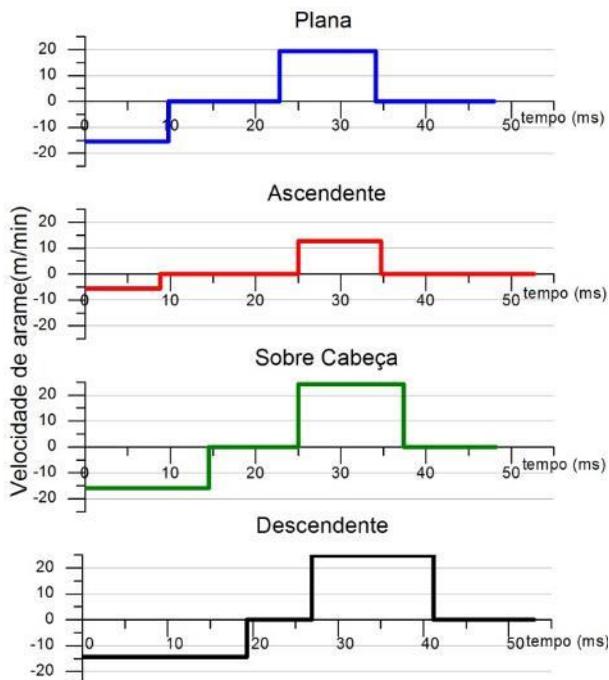


Figura 63. Períodos de movimentação do arame para C9.

Ressalta-se que a posição ascendente teve a menor amplitude de avanço e recuo dentre as quatro posições. Mesmo assim, o valor de velocidade de avanço do arame é cerca de 9 vezes maior que a resultante (1,4 m/min), podendo chegar a ser 18 vezes maior no caso da posição descendente, na qual a amplitude é a maior. Isto gera uma condição em que o arame ultrapassa as isoterms do arco elétrico rapidamente até tocar na poça de fusão, sem fundir nem formar gotas grandes na ponta.

A velocidade de arame resultante, calculada através das filmagens coincidiu com a definida na IHM do equipamento, que foi de cerca de 1,4 m/min. A frequência de oscilação do arame possui valores entre 19 Hz e 21 Hz, em função do período gravado com a câmera que consiste de 1s apenas.

Com a medição dos sinais elétricos durante o processo também foi possível identificar as diferentes amplitudes de movimentação do metal de adição. As oscilações na tensão U2, conforme mostra o gráfico da Figura 64, na posição vertical ascendente, foram identificadas pelo operador durante a soldagem como sendo advindas do movimento do arame. A dinâmica provoca uma alteração do estado de contato entre arame e poça, ocasionando as modificações em U2.

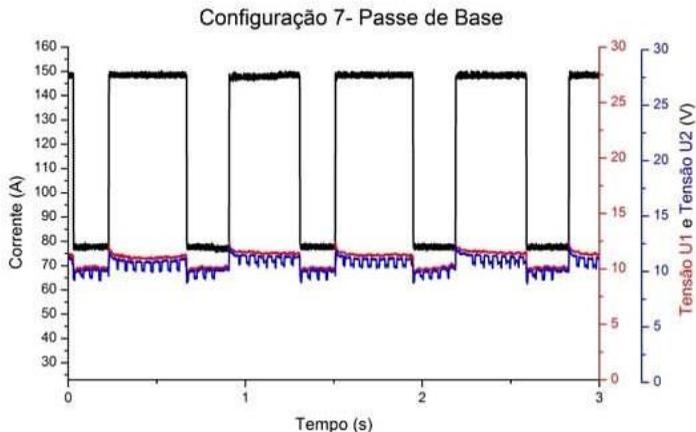


Figura 64. Sinais de corrente e tensão no passe de base para a posição vertical ascendente.

Quando o metal de adição avança e entra em contato com a poça, ambos estão no mesmo potencial elétrico e conseqüentemente a queda de tensão (U2) é próxima da verificada no arco elétrico (U1). Quando o

arame recua ou uma gota é destacada e a tensão U2 é reduzida, pois este se aproxima do eletrodo devido à sua posição geométrica, fazendo com que a diferença de potencial entre ambos seja menor. Esta queda teria valor muito próximo a zero caso o metal de adição tocasse no eletrodo, ou a amplitude de recuo fosse grande o suficiente para puxar o metal de adição para fora do arco, caso em que o sinal de aquisição seria interrompido.

Com a mudança na posição de soldagem para vertical descendente notou-se uma oscilação ainda maior na tensão U2, conforme mostra o gráfico da Figura 65.

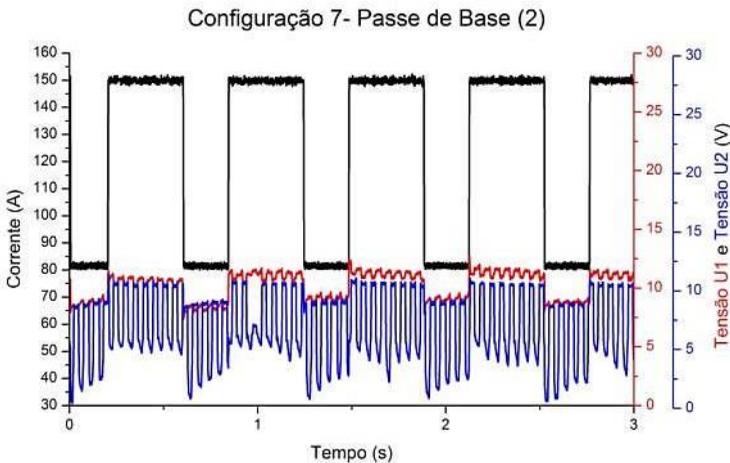


Figura 65. Sinais de corrente e tensão no passe de base posição vertical descendente.

É importante ressaltar que o fato da tensão reduzir a um valor próximo de zero não significa que o arame tocou no eletrodo, mas sim que sua amplitude de recuo foi grande o suficiente para afastá-lo do arco elétrico e, conseqüentemente, abste-lo de potencial elétrico (sem queda de potencial entre os terminais de aquisição dos sinais). A diferença para o gráfico da Figura 64 pode ser atribuída à disposição em que se encontra o condúite, alterando o sistema massa-mola-amortecedor atuante na alimentação [42].

Medindo a frequência da variação da tensão U2 em ambas as posições, verificou-se que a oscilação coincide com a do arame entre 19 Hz e 21 Hz.

O resultado deste comportamento na C7 é representado por dois quadros de filmagem em alta velocidade na Figura 66, onde destaca-se com setas a ponta do arame. Na ascendente, o mesmo permanece sob o arco onde não houve movimento de recuo, diferentemente da posição descendente, na qual há o retorno máximo de 6,3 mm.

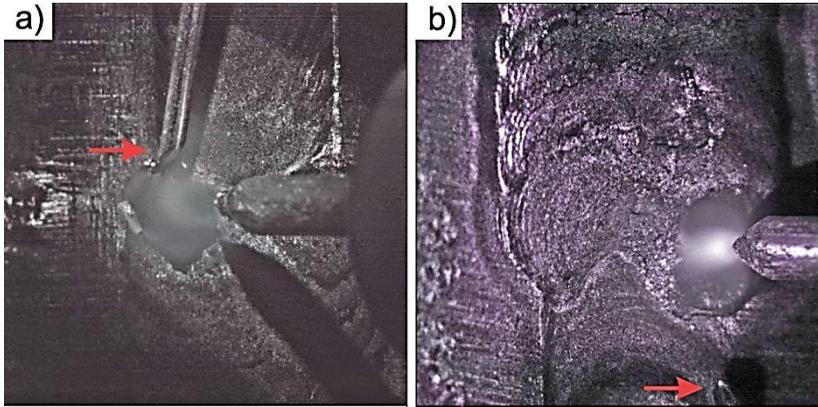


Figura 66. Filmagem em alta velocidade do processo TIG pulsado com alimentação dinâmica. Em a) Posição vertical ascendente; b) Posição vertical descendente.

Na posição vertical descendente, o arame sai totalmente do raio de ação do arco, e há a formação de pequenas gotas na ponta deste. Nesta posição, o somatório dos ângulos de curvatura no conduto foi próximo de 90° , devido à disposição relativa do cabeçote alimentador, fator decisivo para tal comportamento.

Porém, mesmo na alimentação dinâmica é possível a ocorrência de gotas maiores que as normalmente visualizadas, conforme a apresentada na Figura 67.



Figura 67. Gota maior que as normalmente observadas.

A condição da Figura 67 ocorre quando o arame avança e não toca na poça, produzindo dois ou mais ciclos de oscilação sem transferir a mesma. O metal na ponta do arame recebe calor do arco, gerando o crescimento da ponta líquida. Este comportamento ocorre quando há um travamento no interior do conduíte que reduz a amplitude de avanço. Porém, a chance desta gota tocar o eletrodo é menor, devido à velocidade média de avanço do arame ser relativamente alta, levando a mesma sem fundir até tocar na poça.

5.1.4 Filmagem termográfica

Neste tópico, são apresentadas análises termográficas dos processos de soldagem, confrontando as configurações que utilizam alimentação dinâmica com as que utilizam arame de forma contínua. Nestes buscou-se uma transferência predominantemente por ponte.

Ressalta-se que as termografias foram realizadas na soldagem de preenchimento em chanfro V 80°, durante o passe de base. Do primeiro método de filmagem pela parte oposta da chapa, foram obtidos os espectros termográficos da Figura 68, ambos com a aplicação de corrente constante.

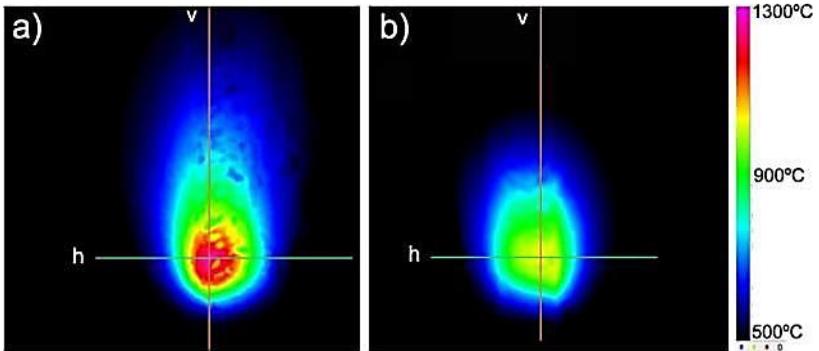


Figura 68. Espectro termográfico por trás da chapa. Em a) Alimentação contínua; b) Alimentação dinâmica.

Observou-se uma redução na temperatura média da superfície de aquisição, sempre que aplicada a alimentação dinâmica independentemente do modo de controle de corrente aplicado (pulsada ou constante). Medindo as temperaturas na direção transversal do espectro, ao longo da linha horizontal (h) plotou-se o gráfico da Figura 69.

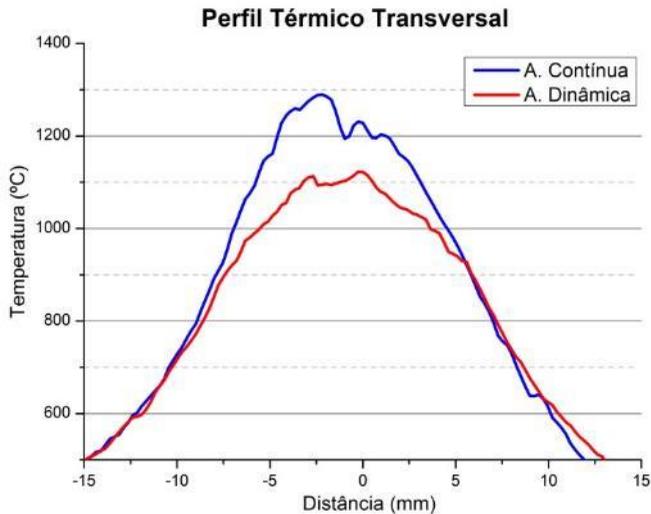


Figura 69. Perfil térmico transversal filmagem por trás da chapa.

No gráfico da Figura 69 o ponto 0 mm coincide com o centro da junta V. Em uma análise, constatou-se uma redução de aproximadamente 200 °C na temperatura máxima atingida na superfície de aquisição para a aplicação de arame dinâmico. A diferença no gradiente de temperatura é mais significativa na faixa entre -5 mm e 5 mm, região onde encontra-se o chanfro V, e portanto o cordão de solda.

Fenômeno semelhante já fora outrora citado por Rudy [34], que relata que os movimentos do arame acarretavam no resfriamento da poça, reduzindo assim o aporte de calor para a peça.

Neste trabalho, a redução na temperatura média observada pode estar associada a dois fatores. O primeiro deles relaciona-se ao movimento de avanço e recuo. Ao avançar o arame adentra a poça rapidamente ultrapassando o arco elétrico praticamente sem fundir devida sua alta velocidade média de avanço. Deste modo, uma parte ainda sólida do arame entra em contato com a poça retirando calor da mesma. Tal fenômeno não ocorre para alimentação contínua, na qual o arame encontra-se sob a ação do arco elétrico durante todo o tempo, fazendo com que o metal de adição seja pré-aquecido por condução devido ao constante contato com o arco.

O segundo fator que pode auxiliar na redução do gradiente térmico relaciona-se ao aumento da troca de calor por convecção na poça e no arco, provocado pela agitação das linhas de fluxo ao movimentar o arame na frequência próxima de 20 Hz. O gráfico da Figura 70 mostra os resultados obtidos nas medições do gradiente longitudinal, representado pela linha vertical (v) da Figura 68.

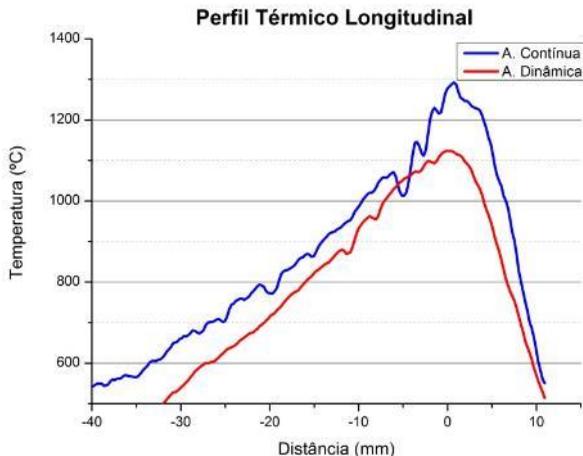


Figura 70. Perfil térmico longitudinal filmagem por trás da chapa.

Nota-se que, neste gráfico, a diferença de temperatura entre dinâmica e contínua segue por toda a extensão do mesmo. Isto ocorre porque a medição longitudinal é feita ao longo do comprimento da junta V, onde não há diferença de espessura na superfície de aquisição, diferentemente da medição transversal.

Os resultados observados corroboram com os obtidos por Paves [32] para utilização de alimentação dinâmica, onde o autor mostrou uma redução na temperatura da superfície de aquisição ao variar a frequência de 0 Hz para 1 Hz e 2 Hz. Porém, o mesmo restringiu-se a frequências relativamente baixas, nas quais os efeitos convectivos na poça possuem menor magnitude.

É importante salientar que uma poça mais fria não significa um cordão mais convexo, conforme mostrado nos cordões da Seção 5.1.3. Existem inúmeros fatores que auxiliam no molhamento de um cordão, como a oscilação da tocha, o modo de transferência metálica, além do próprio formato da junta.

7.1.4.a Medição do gradiente térmico pelo lado superior da chapa com técnica de termografia

O método de medição da temperatura por termografia constitui de uma técnica de difícil execução quando aplicada pelo lado superior da chapa. Isto se deve à radiação emitida pelo arco, que tende a saturar a

imagem e deixar os resultados inconclusivos, conforme apresentado por alguns autores [70,71].

Porém, durante a realização do passe de acabamento na junta, utilizando-se uma amplitude de 10 mm na oscilação da tocha, foi possível visualizar a superfície da poça quando o arco se encontrava na extremidade oposta do movimento. Nesta posição, as interferências radioativas foram amenizadas no campo de visão da câmera, o que permitiu a visualização da superfície desejada. A Figura 71 exibe os espectros de temperatura obtidos.

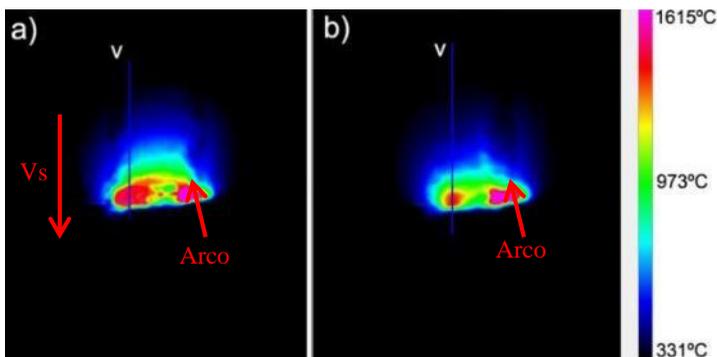


Figura 71. Espectro termográfico da superfície da poça. Em a) Alimentação contínua; b) Alimentação dinâmica.

Assim como na filmagem realizada no lado inferior da chapa, notou-se uma redução do gradiente térmico para a alimentação dinâmica. Tal fato é identificado pela intensidade térmica da região fora do arco elétrico (região saturada e indicada pelas setas). Medindo a temperatura ao longo da linha vertical (v) foi plotado o gráfico da Figura 72.

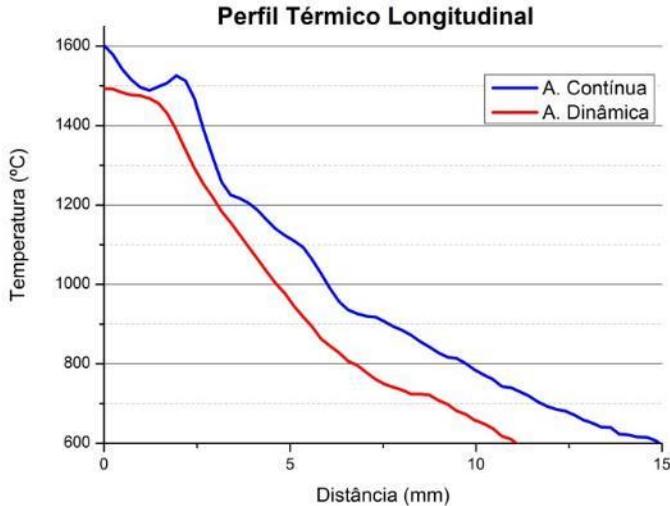


Figura 72. Perfil térmico longitudinal filmagem por cima da chapa.

A medição tem início no ponto de maior temperatura de ambas as condições, definido como a referência em 0 mm. O gráfico exibe um perfil térmico maior para o processo com V_a constante, mostrando que a região aquecida da peça é maior nesta condição. Tal fato corrobora os resultados e efeitos térmicos já ponderados na filmagem pelo lado oposto da chapa.

7.1.4.b Ensaios complementares à termografia

Embora o comportamento geométrico de um cordão realizado sobre chapa seja diferente do mesmo quando aplicado em chanfro, realizou-se ensaios de deposição sobre chapa na posição plana a fim de verificar o comportamento de algumas variáveis do cordão como penetração, largura e reforço.

A Figura 73 apresenta a seção transversal de cordões realizados sem oscilação da tocha, nos quais foi alterada apenas a técnica de alimentação com o objetivo de comparação. Os parâmetros elétricos foram mantidos iguais aos já apresentados na Tabela 2 para o passe de base.

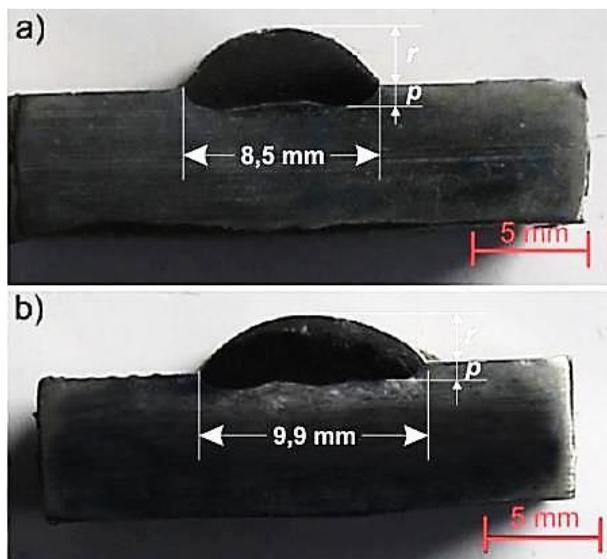


Figura 73. Deposição sobre chapa. Em a) Alimentação dinâmica filetado; b) Alimentação constante filetado.

Comparando os valores de largura dos cordões, nota-se uma diferença de 1,4 mm entre ambos. A penetração (p) foi em torno 0,9 mm para alimentação dinâmica e 1,0 mm para a contínua. Portanto, observa-se um cordão mais convexo para a condição com a movimentação do arame. O reforço (r) foi de 2,4 mm para dinâmica e 2,0 mm para a contínua. Mesmo com um cordão mais convexo sobre a chapa, obtêm-se resultados satisfatórios na aplicação da alimentação dinâmica em juntas V, mostrando que a parametrização do processo deve sempre que possível, ser executada em uma condição próxima da aplicação pretendida.

Para a investigação da influência da alimentação dinâmica em peças de fusão com diferentes tamanhos, foram realizados dois ensaios: o primeiro deles com uma energia de soldagem maior, chamada de *nível alto*, e o segundo, com uma energia menor, denominada de *nível baixo*. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 7 e na Figura 74 os cordões obtidos nos ensaios.

Tabela 7. Parâmetros de soldagem para ensaios com diferentes tamanhos de poça.

Parâmetro/Espessura	Nível Alto	Nível Baixo
Tipo de Corrente	Constante	
Corrente (A)	250	100
$U_{\text{média}}$ (V)	15,3	10,3
V_a (m/min)	1,80	0,85
V_s (cm/min)	7,5	4,5
$P_{\text{média}}$ (W)	3825	1030
$E_{\text{média}}$ (J/mm ²)	30,6	13,7

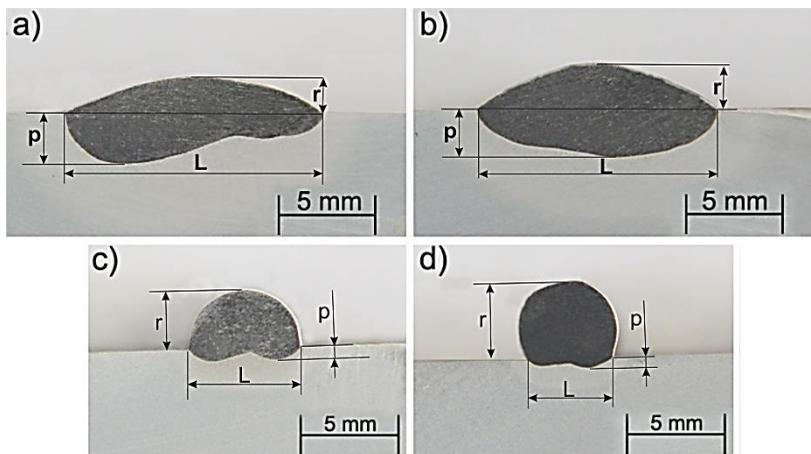


Figura 74. Deposição sobre chapa. Em a) Alimentação contínua nível alto de energia (A); b) Alimentação dinâmica nível alto de energia (B); c) Alimentação contínua nível baixo de energia (C); d) Alimentação dinâmica nível baixo de energia (D).

Para ambos os níveis de energia, a alimentação dinâmica apresentou um cordão mais convexo e estreito quando comparado à contínua. Para uma poça de fusão maior, o movimento de avanço e recuo do arame auxiliou em manter uniforme o perfil de penetração do cordão. A hipótese para tal comportamento é que juntamente com a redução da temperatura média da poça existe o fato do arame puxar a poça para si (por tensão superficial) no momento em que entra e sai da mesma, man-

tendo o metal líquido mais centralizado, conforme visto nas filmagens de monitoramento da Seção 5.1.3. A Tabela 8 apresenta os dados medidos no perfil geométrico dos cordões.

Tabela 8. Valores medidos no perfil geométrico dos cordões com alta e baixa energia.

Cordão	Reforço-r (mm)	Penetração-p (mm)	Largura-L (mm)
A	1,8	2,6	13,4
B	2,4	2,5	12,4
C	3,0	0,6	5,8
D	4,0	0,5	4,4

A vista superior dos cordões da Figura 75, mostra a camada de óxido formada com o aquecimento e resfriamento da peça à temperatura ambiente. Esta camada mostra o aumento progressivo da difusão de oxigênio na superfície da peça, sendo maior quanto maior for a região aquecida [72,73]. É possível constatar que a alimentação dinâmica apresenta uma região de menor intensidade quando comparada à alimentação constante, o que converge com os ensaios de termografia.

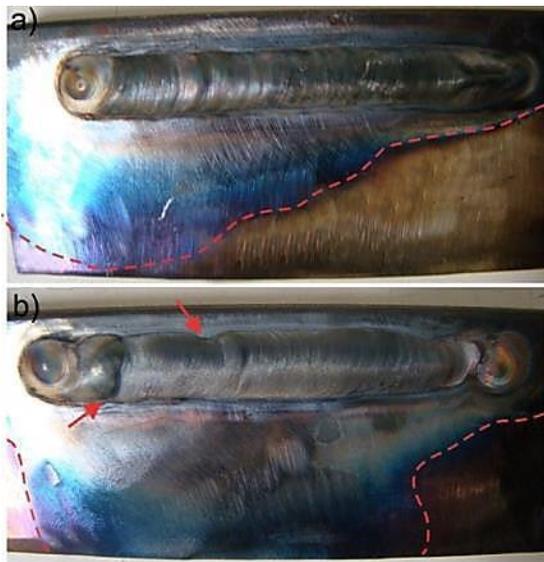


Figura 75. Deposição sobre chapa com nível alto de energia. Em a) Alimentação dinâmica; b) Alimentação contínua.

As setas vermelhas na Figura 75b apontam os locais onde houve variação geométrica no cordão com alimentação constante, que comparado à alimentação dinâmica apresentou geometria menos uniforme ao longo do seu comprimento.

5.1.5 Comparação por meio de filmagem em alta velocidade

Alguns fenômenos distintos entre os processos também foram observados por meio da filmagem em alta velocidade. A Figura 76 mostra em detalhe o flanco da poça de fusão para aplicação de arame contínuo e dinâmico nas chapas cladeadas.

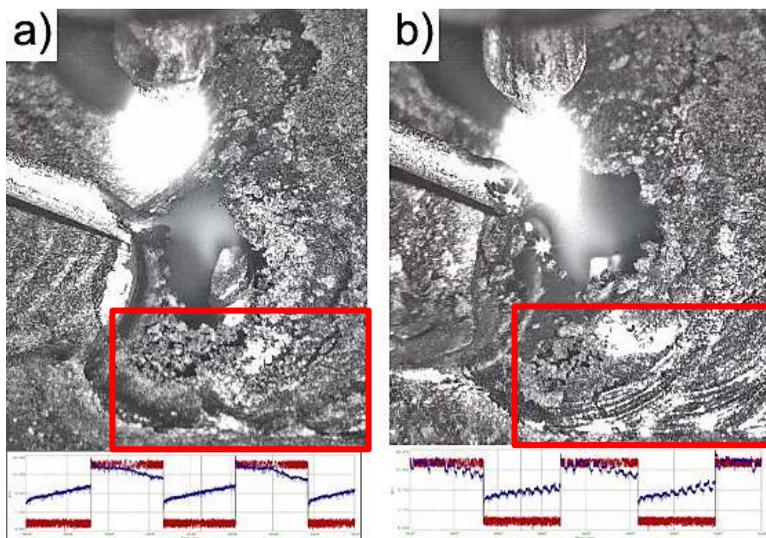


Figura 76. Detalhe flanco do cordão. Em a) C4- Corrente pulsada com arame contínuo e V_a pulsada; b) C7- Corrente pulsada com alimentação dinâmica.

Na região destacada da borda dos cordões notam-se ranhuras conforme a Figura 76b, sendo este comportamento observado apenas para o emprego da alimentação dinâmica.

As marcas presentes podem indicar o efeito do resfriamento na poça e consequentemente uma solidificação antecipada, provocada pela entrada do arame. Por meio de uma linha sólido-líquido, é possível afirmar a existência de uma poça de fusão ligeiramente menor para a condição de alimentação dinâmica. Um dos fatores para a remoção de calor da poça ocorre pelo fato do arame ao avançar ter maior parcela sólida em contato com a poça. Deste modo, há a perda de calor da mesma para o arame, conforme ilustrada pelo ciclo de movimento na Figura 77.

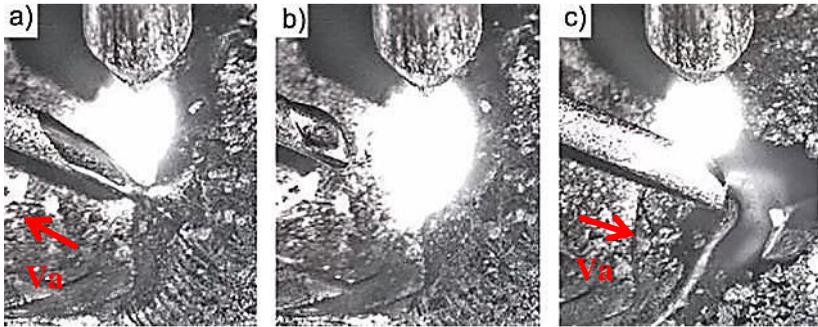


Figura 77. Detalhe do movimento do metal de adição na posição plana. Em a) Recuo; b) Período estático; c) Avanço.

A Figura 77a exibe o início do recuo do arame, até o ponto máximo atingido na Figura 77b. Ao retornar, na situação mostrada na Figura 77c, o arame adentra rapidamente o arco e sem fundir toca na poça, a qual cede parte do calor (sensível e latente) necessário para o arame atingir sua temperatura de fusão e alterar seu estado físico.

5.2 Soldagem circunferencial interna em tubos cladeados com Inconel 625

Migrando para a soldagem em tubo, enfrentou-se problemas relacionados à dissipação de calor em virtude da grande espessura de parede do mesmo. Deste modo, foi necessário o incremento na corrente de soldagem e a modificação da tensão de referência do AVC, de acordo com a Tabela 9. Os parâmetros geométricos de entrada do arame e de movimentação do manipulador foram mantidos os mesmos já apresentados na Tabela 2 da Seção 4.1.3.

Tabela 9. Parâmetros modificados para soldagem com Inconel 625 em tubo de 1 ½” de espessura de parede.

Parâmetro/Espessura	Chapas ½”	Tubo 1 ½”
I_{pulso} (A)	150	190
I_{base} (A)	80	150
$I_{\text{média}}$ 1º Passe (A)	127	176
$I_{\text{média}}$ 2º Passe (A)	115	166

U_{pulso} (V)	12,3	10,6
U_{base} (V)	10,3	9,9
$P_{\text{média}}$ 1° Passe (W)	1467	1810
$P_{\text{média}}$ 2° Passe (W)	1300	1737

Com a maior potência disponível eliminou-se problemas como falta de fusão e o baixo molhamento do cordão, observados em ensaios prévio realizados no tubo. A velocidade de arame média foi mantida preservando a mesma taxa de deposição, mesmo com o aumento na corrente. Isto mostra que no processo TIG a massa do material de base influencia fortemente no processo, sendo maior a energia necessária para fundir uma dada quantidade de arame, devido à maior dissipação de calor.

As posições de soldagem foram divididas em graus de acordo com a Figura 78, seguindo o sentido de soldagem indicado pelas setas.



Figura 78. Soldagem orbital interna, divisão da circunferência interna e sentido de soldagem.

5.2.1 Arame contínuo com Va pulsada e corrente pulsada (C4)

Apesar dos ensaios até então mostrarem que a alimentação dinâmica pode ser uma alternativa com benefícios no que tange à redução da susceptibilidade de contaminação do eletrodo, sua movimentação é muito dependente da disposição e do atrito no conduíte. Neste caso, a possibilidade de realização da soldagem interna com o processo TIG em configurações mais tradicionais, com arame contínuo, é de fundamental importância.

A Figura 79 mostra o aspecto da superfície dos cordões para o passe de base, ao longo da circunferência interna do tubo.

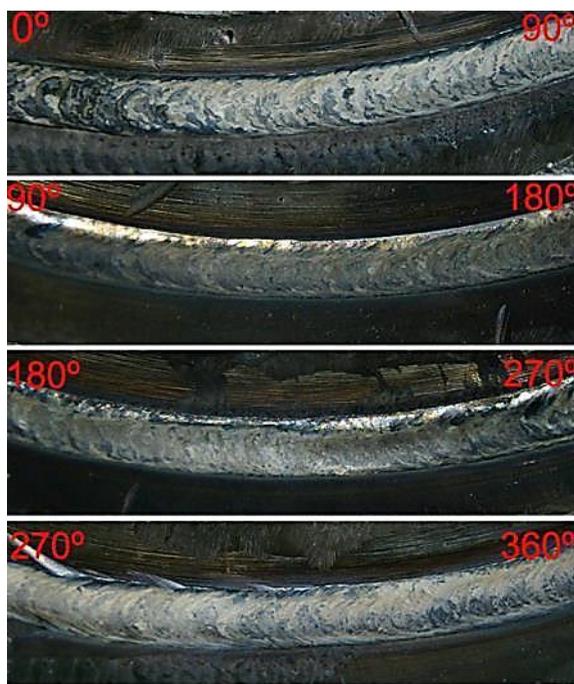


Figura 79. Aspecto superficial ao longo do passe de base para C4.

Em uma primeira análise, observou-se um bom molhamento do cordão ao longo da junta com a tendência de um perfil mais plano nas transições de 90° para 180°, e 180° para 270°.

Por meio do videoscópio foi possível obter em milímetros o ponto de maior profundidade da superfície medida (ponto verde em cada

cordão da Figura 80). Porém este valor não foi assumido como referência absoluta para análise da geometria dos cordões, pois o laser do videoscópio pode sofrer a influência de ruídos em alguns pontos de medição. Deste modo foi considerado o perfil médio da superfície, obtido por uma linha cortando a seção transversal da solda, conforme mostra o espectro abaixo de cada cordão na Figura 80.

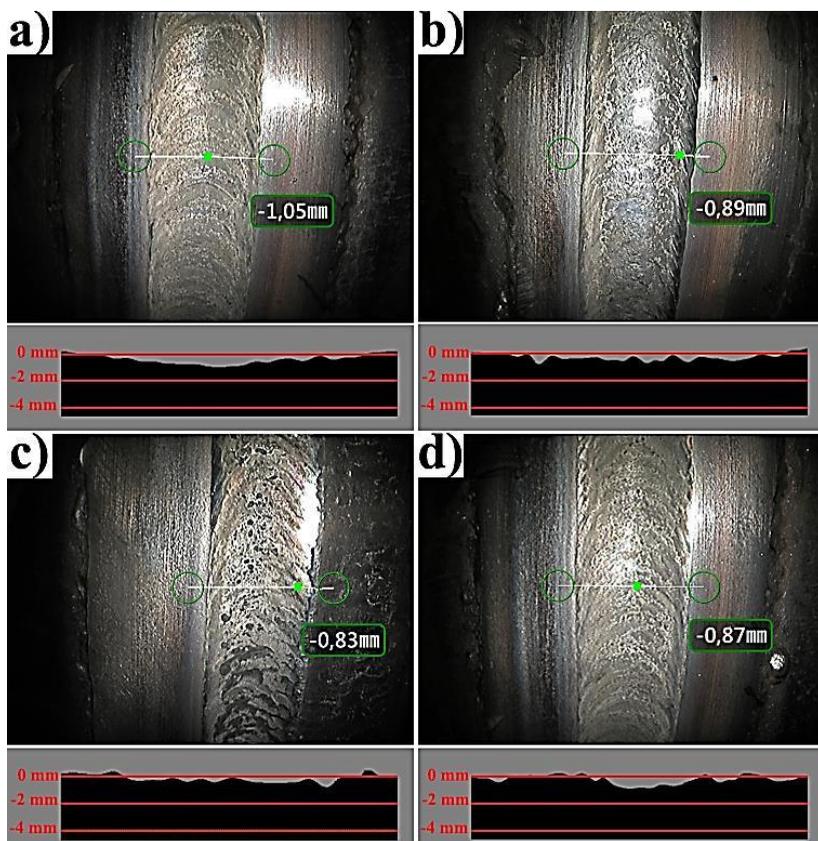


Figura 80. Perfilometria do passe de base na condição C4. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.

A análise das superfícies do passe de base apontou um perfil ligeiramente mais côncavo para as posições plana e descendente, onde o ponto de maior profundidade está localizado no centro do cordão. Porém

a diferença geométrica mostrada pelo espectro foi relativamente pequena podendo ser derivada de variações da própria junta.

No segundo passe também foi obtido um bom resultado ao longo de todo o cordão. A Figura 81 mostra o aspecto das superfícies das regiões de transição, de uma posição para a outra, conforme identificam os ângulos na imagem.

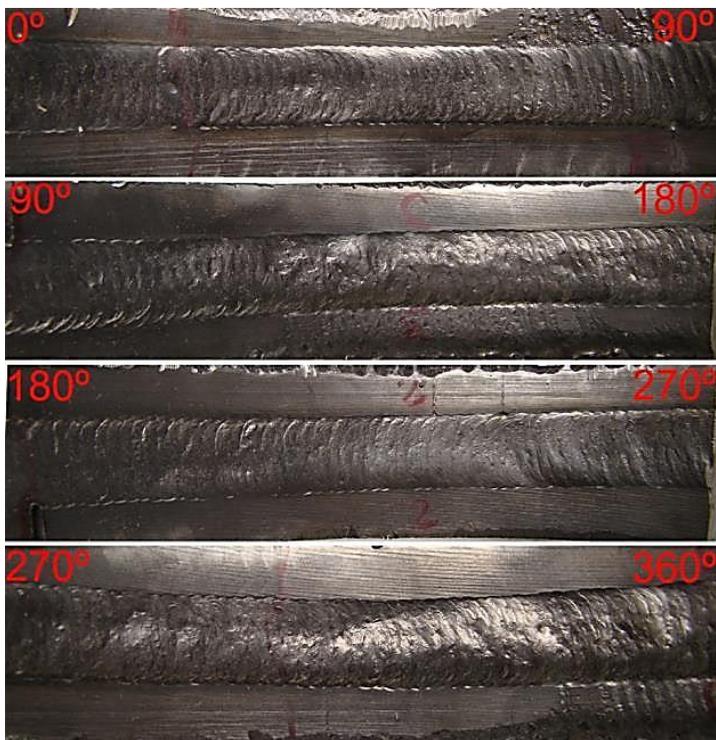


Figura 81. Aspecto superficial do passe de acabamento para C4.

Em uma análise visual foram identificadas ondulações na superfície do cordão na transição entre a posição vertical ascendente (90°) e sobre cabeça (180°). O mesmo foi notado entre a vertical descendente (270°) e a plana (360°). Estas ocorrências coincidiram com regiões onde havia um desalinhamento na junta (*high-low*) que pode ter sido a causa do aspecto não uniforme do cordão. A perfilometria do passe de acabamento é mostrada na Figura 82 onde neste caso, o valor em milímetros representa o ponto de maior reforço na superfície do cordão.

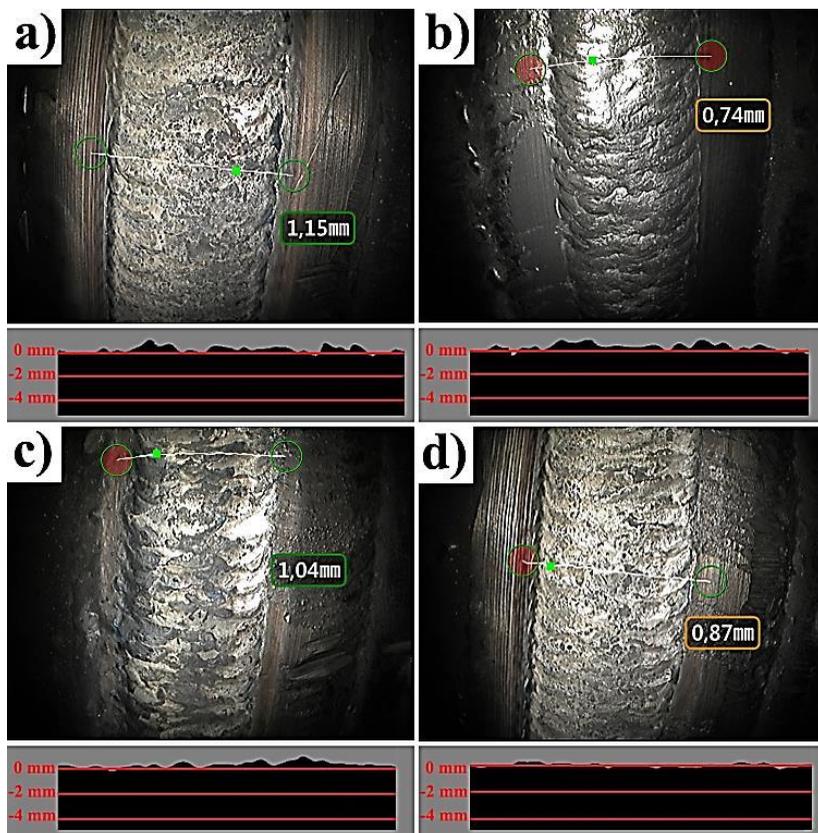


Figura 82. Perfilometria passe de acabamento para a condição C4. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.

Embora visualmente fossem notadas variações geométricas, ondulações na superfície do acabamento, o reforço médio ao longo da junta foi muito semelhante entre as posições de soldagem com um perfil praticamente plano com a superfície do revestimento interno.

5.2.2 Alimentação dinâmica com corrente pulsada e constante (C7 e C9)

Conforme visualizado nos aspectos dos cordões em chapas, com a aplicação de alimentação dinâmica, o cordão tende a apresentar um comportamento muito semelhante, independentemente do modo de controle da corrente. Desta forma, para a alimentação dinâmica foram reali-

zadas três repetições em tubos, sendo duas com corrente constante, e uma com corrente pulsada. Para ambas, o comportamento observado foi muito similar ao longo de toda a circunferência do tubo. O autor optou por mostrar os resultados com corrente constante, conforme mostra a Figura 83.

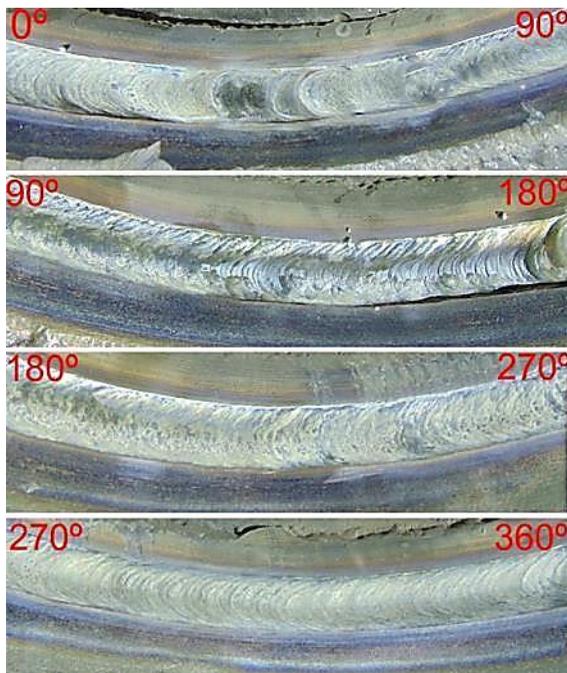


Figura 83. Aspecto superficial do passe de base para C9.

Em uma análise visual, primeiramente foi notada a tendência de um cordão mais convexo nas posições vertical ascendente e sobre cabeça, entre 90° e 180°. Uma hipótese é que pela gravidade puxar a poça no sentido contrário ao sentido de avanço isto proporciona um menor molhamento do cordão. A perfilometria na Figura 84 mostra a diferença entre as posições para o passe de base, com a indicação do ponto de maior profundidade.

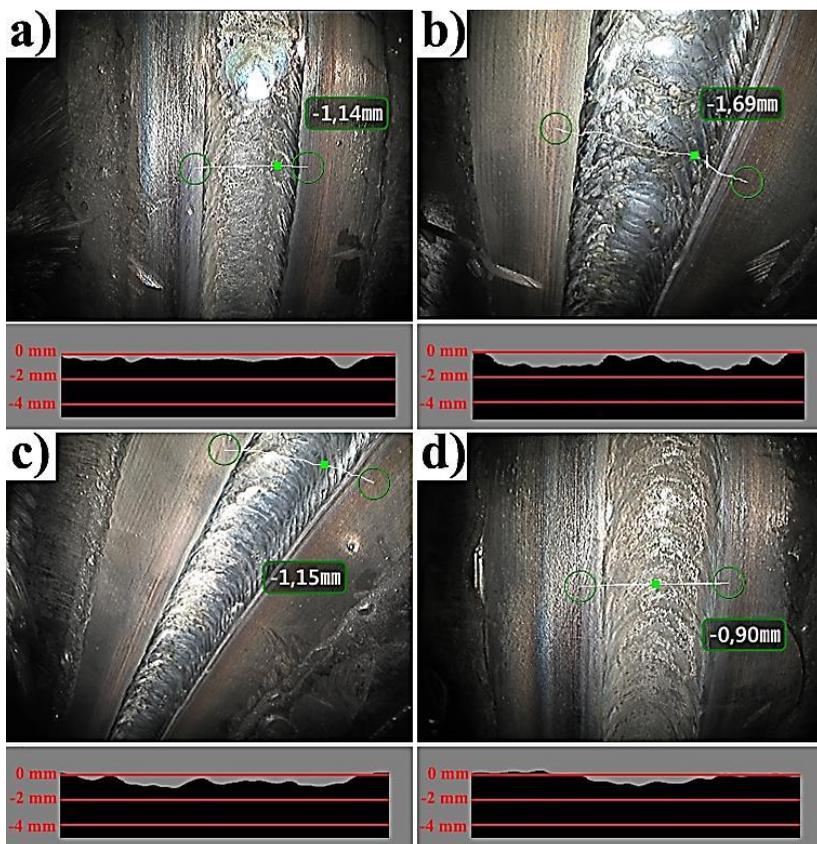


Figura 84. Perfilometria passe de base para a condição C9. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.

O perfil da seção transversal na Figura 84b mostra que o ponto de maior profundidade situa-se no flanco do cordão sendo este, portanto mais convexo no centro. As diferenças geométricas no passe de base foram mais evidentes para a alimentação dinâmica, podendo ser um comportamento agravado por esta possuir a tendência em apresentar um cordão com tal geometria.

O mesmo comportamento também foi observado para a aplicação de corrente pulsada (C7) conforme mostra a perfilometria na vertical ascendente da Figura 85.

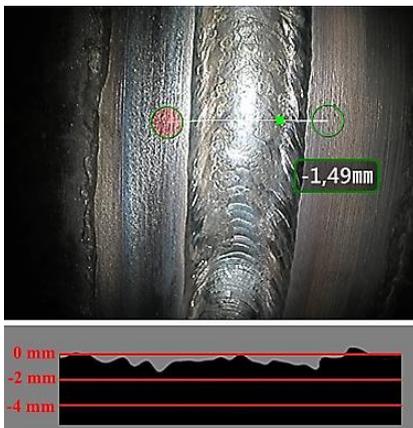


Figura 85. Posição vertical ascendente para C7.

Porém, as diferenças geométricas não comprometeram a realização do passe de acabamento, onde se obteve resultados satisfatórios, de acordo com a Figura 86.

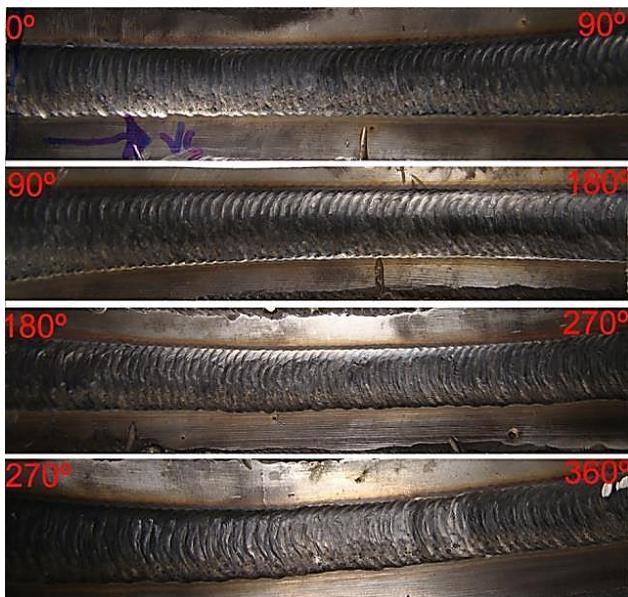


Figura 86. Aspecto superficial do passe de acabamento para C9.

Visualmente a geometria do acabamento apresentou maior uniformidade quando comparada à aplicação de arame de forma contínua, sem as ondulações observadas anteriormente e com uma superfície “escamada”, característica da oscilação do arame, conforme mostra em detalhe a Figura 87.

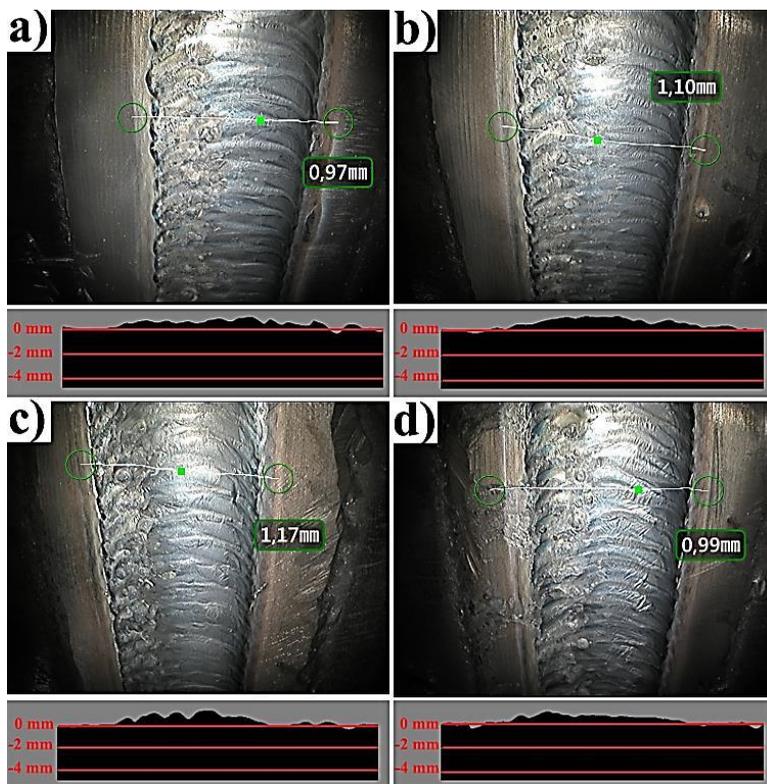


Figura 87. Perfilometria passe de acabamento para a condição C9. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre Cabeça; d) Descendente.

As imagens da perfilometria exibiram um acabamento muito semelhante ao longo da junta, sendo que o reforço é em média muito similar independentemente da posição de soldagem. A hipótese para o comportamento da poça de fusão do Inconel 625 ser semelhante mesmo com a mudança na posição de soldagem é a sua tensão superficial ser relativamente alta devido à presença de elementos de liga como o Molibdênio e o Cromo, que possuem coeficientes mais altos quando no estado líquido.

do [61]. Esta característica faz com que o metal fundido seja sustentado mais facilmente em posições contrárias à força da gravidade.

Em termos de aplicação, sabe-se que um dos grandes empecilhos na utilização da alimentação dinâmica em campo é a sua adaptação para o interior de tubos, em locais com a restrição de espaço e com a necessidade de grande comprimento de conduíte. Neste caso, a oscilação poderia ser realizada de duas formas: por um sistema *push-pull* com dois motores tendo um dentro do tubo próximo ao eletrodo, ou a segunda alternativa pelo cabeçote alimentador fora do tubo, no qual o comprimento do mangote para 12 m e 24 m pode influenciar diretamente sobre o comportamento do metal de adição.

5.2.3 Análise dos resultados por macrografia para as técnicas de alimentação contínua e alimentação dinâmica

Após a análise visual e por videoscopia do aspecto da superfície dos cordões, foram cortadas amostras de 4 regiões do tubo, representando as posições plana, vertical ascendente, descendente e sobre cabeça. As amostras para a técnica de alimentação contínua e corrente pulsada são mostradas na Figura 88, onde a região escura é o Inconel 625 englobando o revestimento com PTA-P e a solda interna com TIG.

É importante ressaltar que foi feita a tentativa de destacar os passes realizados com o processo TIG, em relação ao revestimento com PTA-P. Isto por meio de ataque químico Glicerégia, Água Régia e Marble. Porém não foi obtido o contraste necessário para ser identificado na imagem.

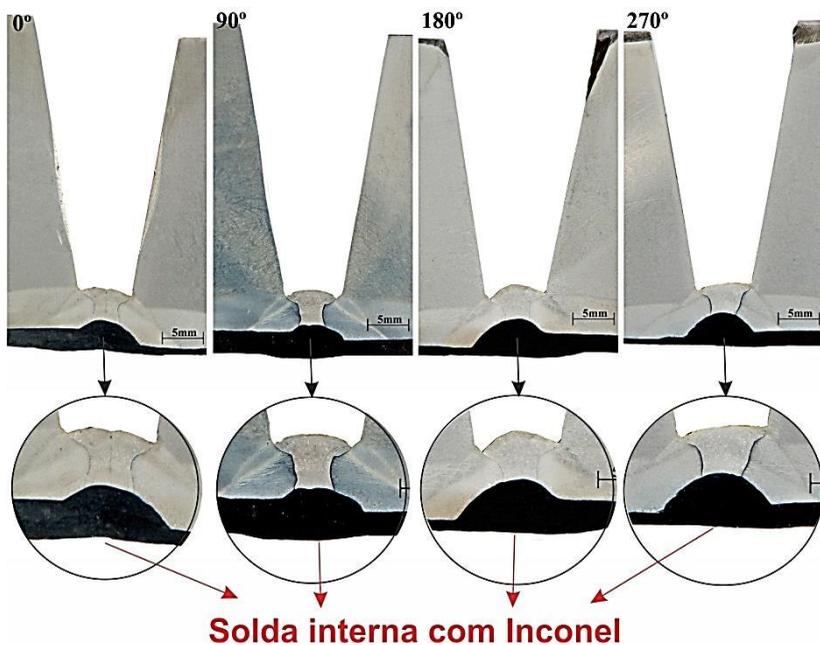


Figura 88. Macrografias relativas à C4. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre cabeça; d) Descendente.

É possível notar a fusão completa da junta, tanto para a raiz com processo CCC, quanto para o processo TIG. Obteve-se um cordão com bom molhamento para todas as posições e sem a presença de descontinuidades visíveis. Para a posição ascendente (180°) e sobre cabeça (270°), nota-se uma redução na espessura do revestimento com PTA-P. Este fato ocorreu durante a usinagem do chanfro dos corpos de prova. Mais material foi removido nesta região para manter a concentricidade do diâmetro interno em relação ao externo do tubo.

Para a alimentação dinâmica, o aspecto da superfície entre a utilização de corrente constante e pulsada foram muito similares. Neste contexto, foram extraídas amostras para macrografia apenas da junta soldada com corrente constante, mostradas na Figura 89.

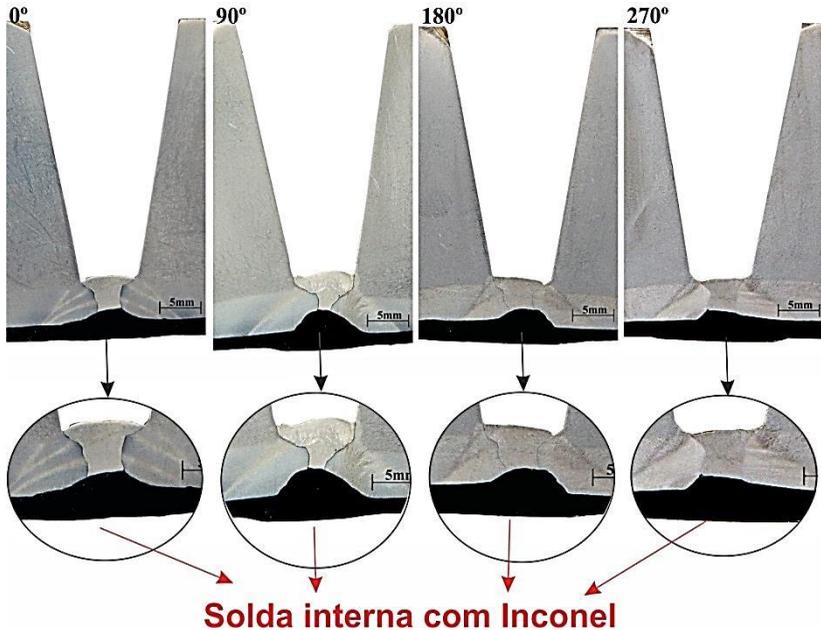


Figura 89. Macrografias relativas à C9. Em a) Plana; b) Ascendente; c) Sobre cabeça; d) Descendente.

Nota-se uma boa molhabilidade dos cordões depositados com Inconel 625 bem como uma fusão completa da raiz do passe externo com aço carbono. Nas posições plana (0°) e vertical descendente (270°) o perfil de penetração diferencia-se dos demais, fato atribuído a mudanças na geometria no reforço da raiz do passe externo.

5.2.4 Desenvolvimento e testes do primeiro protótipo- Cabeçote de Soldagem Interna (CSI)

Durante os ensaios e avaliação dos resultados desta dissertação, foram obtidos dados referentes às exigências e limitações do procedimento de soldagem interna. Estes em conjunto com requisitos do projeto com a PETROBRAS tornaram possível o dimensionamento, fabricação e montagem de um protótipo de cabeçote, para soldagem circunferencial interna. A Figura 90 mostra o equipamento.

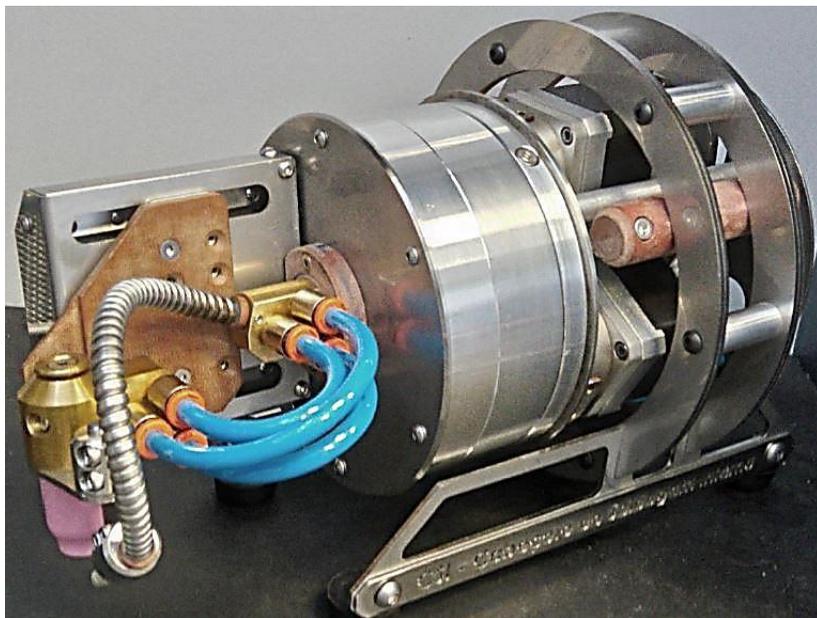


Figura 90. Primeiro protótipo do CSI

O equipamento é composto pelo módulo de soldagem, que engloba os componentes da tocha e oscilação e rotação. O sistema encontra-se fixado em um dispositivo que simula o menor diâmetro no qual pode operar em torno de 127 mm (5").

Após a montagem foram realizados testes cinemáticos e de controle dos motores, onde foi criada a lógica de programação.

A fixação do sistema é feita por meio de sapatas que expandem e pressionam a superfície interna do tubo. Por meio de espaçadores o CSI foi fixado nos tubos foram utilizados nos testes com 197 mm de diâmetro interno, conforme a Figura 91.



Figura 91. Fixação do CSI em posicionamento para soldagem.

Até o momento, testes com soldagem foram realizados para verificação da funcionalidade e pontos de melhoria para a fabricação do próximo protótipo. A Figura 92 mostra um ensaio de soldagem interna.



Figura 92. Ensaio de soldagem com o CSI.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho representa uma importante contribuição para a soldagem fora de posição com o processo TIG e ligas de difícil soldabilidade como o Inconel 625, além do avanço na união interna de tubos cladeados, visando a produção de *risers* rígidos.

Ademais, foram abordados os fenômenos que ocorrem na aplicação da alimentação dinâmica de arame e alimentação contínua.

Numa avaliação acerca dos resultados obtidos é possível concluir:

- A técnica de alimentação dinâmica gera uma maior robustez ao processo de soldagem no que tange a evitar a fusão prematura do arame e a geração de gotas, que podem interromper o processo pela contaminação do eletrodo, principalmente na soldagem fora de posição. Isto ocorre devido à alta velocidade de avanço, que faz com que o metal de adição percorra as isotermas do arco com uma alta velocidade, chegando a ser 18 vezes superior em comparação com a condição de velocidade constante do arame.
- Com a alimentação dinâmica de arame também é possível a utilização de corrente pulsada, o que pode unir em apenas um processo os benefícios de ambas as técnicas. Neste caso, o sincronismo da oscilação da tocha com a onda de corrente torna-se uma alternativa opcional, diferentemente do processo TIG com arame contínuo.
- O movimento de avanço e recuo do arame promoveu uma redução na temperatura média da poça, fato que contribuiu para a geração de um cordão mais convexo em deposição sobre chapa, conforme mostrado nos ensaios com termografia. Porém quando se aplica em juntas, a geometria do chanfro auxiliada pela oscilação da tocha faz com que o metal depositado acomode-se uniformemente, proporcionando um cordão com bom molhamento. A possibilidade de ocorrer o resfriamento na poça está associado à perda de calor da poça para o arame que adentra na mesma com uma parcela ainda sólida ao avançar.

- A alimentação dinâmica promove cordões de solda mais homogêneos com geometria menos variável, sendo este efeito melhor visualizado quando se trabalha com altas correntes de soldagem e poças de fusão relativamente grandes e fluídas.
- O conduíte consiste de uma peça fundamental no comportamento do metal de adição ao aplicar-se a técnica de alimentação dinâmica. Dependendo de sua disposição, as amplitudes de avanço e recuo varia, chegando a ocasiões em que há apenas um movimento de avanço e parada no arame. Quando isto ocorre torna-se, um processo semelhante à alimentação com arame pulsado.
- A metodologia de união bilateral para peças cladeadas mostrou-se factível, porém é de grande importância a qualidade no passe de raiz realizado no aço carbono. Desta forma, deve-se evitar a geração de um reforço excessivo na raiz do mesmo, atenuando as chances de descontinuidades como falta de fusão e porosidades na interface com o preenchimento interno.
- A metodologia de aplicação de dois passes para preenchimento da junta produziu processos de soldagem robustos e repetitivos, visto que em todas as repetições realizadas neste trabalho obteve-se comportamento semelhante durante a soldagem. Esta sequência, também auxilia na obtenção de um cordão com baixa diluição de ferro.
- A soldagem em 360° com liga 625 também foi possível com a aplicação do processo TIG com velocidade pulsada de arame. Porém comente aplicando corrente pulsada em sincronismo com o tecimento da tocha. Obtiveram-se resultados satisfatórios de estabilidade do processo e qualidade no cordão depositado. Porém ainda assim existe a susceptibilidade a intermitências na transferência e formação de gotas grandes na ponta do arame. Deste modo com a possibilidade de utilização de alimentação dinâmica com corrente pulsada e constante, foram criados três procedimentos de soldagem.
- A parametrização em chapas antes da aplicação circunferencial interna mostrou-se uma metodologia mais simples e rápida para

a criação de um novo procedimento de soldagem. Embora uma elevação na energia de soldagem tenha sido necessária para evitar falta de fusão nos tubos. Isto ocorre devido à grande espessura e massa do mesmo que dissipa mais calor.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados apresentados neste trabalho culminaram em importantes conclusões para a soldagem com diferentes técnicas de alimentação de arame e para a união bilateral de tubos cladeados. Porém, aperfeiçoamentos e avanços na busca de procedimentos de soldagem ainda mais robustos devem sempre ser almejados.

Deste modo, são apresentadas aqui algumas diretivas e sugestões para trabalhos futuros:

- Aprofundar os estudos térmicos sobre a poça de fusão, objetivando quantificar a troca de calor por convecção devido à frequência de oscilação do arame, medindo a temperatura inclusive na ponta do arame durante o seu recuo.
- Estudar o efeito da técnica de alimentação de arame, e do modo de transferência metálica sobre a proteção gasosa, utilizando como ferramenta a técnica *Schlieren*.
- Avaliar a possibilidade da aplicação e os efeitos da combinação de alimentação dinâmica com alimentação tangencial.
- Avaliar a aplicação de arame quente em conjunto com a alimentação dinâmica e comparar com alimentação contínua.
- Implementar e parametrizar em fontes de soldagem uma rampa de subida e descida na corrente, para aplicações de alimentação contínua com arame pulsado.
- Desenvolver parametrização da alimentação dinâmica para elevadas velocidades de soldagem e elevadas correntes, almejando o modo *Keyhole*.

- Realizar análises de ordem metalúrgica nas juntas produzidas neste trabalho, com o objetivo de comparar os procedimentos com alimentação contínua e dinâmica.
- Desenvolver dispositivos dedicados à execução da técnica de alimentação dinâmica, exclusivamente para o CSI, visando aplicação em campo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GOMES, P. O.; KILSDONK, B.; MINKEN, J.; GROW, T.; BAR-RAGAN, R. **The outer high of the Santos Basin, Southern São Paulo Plateau, Brazil: pre-salt exploration outbreak, paleogeographic setting, and evolution of the syn-rift structures.** AAPG International Conference and Exhibition, Cape Town, South Africa, Out. 26-29, 2008.
- [2] SECURITIES AND EXCHANGE COMMISSION. **United states securities and exchange commission annual report 2016.** Disponível em: <<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1163371/000129281411001552/pbraform20f2010.htm>> Acesso em: 11/08/2017.
- [3] WILLIAMS, J. **Diamond offshore drilling: Brazil, pre-salt and growth.** Mai. 17, 2013. Disponível em: <<https://seekingalpha.com/article/1280491-diamond-offshore-drilling-brazil-pre-salt-and-growth>> Acesso em: 12/08/2017.
- [4] PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Revista Tn Petróleo**, Ano XIX, Nº115, pp. 8-9, 2017.
- [5] ZAMPANO, P.; ZANON, G.; GARMBIS, A.G. **Challenges about testing and NDT of CRA pipelines in Brazilian pre-salt.** Proceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Artic. 10-15 Jul. 2012, Rio de Janeiro, Brazil.
- [6] MOREIRA, J. R.; PACCA, S. A.; PARENTE, V. **The future of oil and bioethanol in Brazil.** *Energy Policy*, vol. 65, pp. 7-15, 2014.
- [7] KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. **Mechanics of offshore pipelines, volume 1: buckling and collapse.** 1 ed. Elsevier BV, 2007, 415p.
- [8] OFFSHORE STANDARD DNV OS F101. **Submarine Pipeline Systems**, Out. 2013.
- [9] TKACZYK, T.; BRISAC, G.; RAI, J.K.; TECHNIP, A.M. **Weld toughness study advances reeled clad pipes deepwater potential.** Oil e gas journal online. 5 de abril de 2015. p 56.
- [10] PENSO, G. C. **Welding of x65 pipes internally clad with precipitation strengthened ni-based superalloy filler metals: applica-**

- tion in pre-salt oil extraction.** 2016. 171 p. Thesis (Degree Master of Science)- Graduate Program in Welding Engineering, The Ohio State University, Columbus, EUA.
- [11] ANDERSSON, J. **Weldability of Ni-Based Superalloys.** Proceedings of 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives. Set 28- Out 1. 2014, Pittsburg, Pennsylvania, EUA.
- [12] JONES, R.; PEPE, N.; BARRITE, G.; TOGUYENI.; MAIR, J.; SCHMIDT, T.; BANSE, J. **High strength carbon steel and CRA lined pipe for reel-lay installation.** Proceeding of Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA. 6-9 May 2013.
- [13] OLYMPUS-IMS. **Dual Matrix Arrays for Ultrasonic Inspection.** Disponível em: < <http://www.olympus-ims.com/en/applications/dual-matrix-array-for-ultrasonic-inspection>> Acesso em: 05/07/2017.
- [14] BUTTING. **Clad Pipes.** Disponível em: <http://www.butting.com/fileadmin/daten/redakteure/Download/EN/Prospekte_EN/BUTTING_Clad_pipes.pdf> Acesso em: 05/07/2017.
- [15] O' BRIEN, E. D. **Welding with low alloy steel filler metal of x65 pipes internally clad with alloy 625: application in pre-salt oil extraction.** 2016. 184 p. Thesis (Degree Master of Science)- Graduate Program in Welding Engineering, The Ohio State University, Columbus, EUA.
- [16] MEREDITH, R. **Welding torch.** US Pat. 2274631 A, 24 fev. 1942. 4p.
- [17] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: welding processes, part 1.** 9. ed. Miami: AWS, 2004. v.2. 680 p.
- [18] CIRINO, L. M. **Estudos dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG.** 2009. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [19] MATHERS, G. **The Welding of Aluminum and its Alloys.** 1. ed. Cambridge: CRC Press, 2002. 233 p.
- [20] LUCAS, W. **TIG and Plasma Welding,** 1- ed, Cambridge - England, Abington Publishing. 1990, p. 3-25.

- [21] GERKEN, J. M. **Gas Tungsten Arc Welding**, The Lincoln Electric Company. 1995, p.1-21.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] GODINHO, C. **Avaliação Experimental do Processo de Soldagem TIG Automatizado com Adição de Arame em Ângulo Tangencial**. 2017. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [25] SILVA, R. G. N. **Caracterização do processo de soldagem TIG com alimentação de arame dinâmica em alta frequência**. 2016. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais)- Depto. Eng. Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [26] 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
- [27] 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.
- [28] SINDO, K. **Welding Metallurgy**. New York: John Wiley & Sons, 2003
- [29] LIPPOLD, J. C. **Welding Metallurgy and Weldability**. John Wiley & Sons, 2014.
- [30] DELGADO, L. C. **Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame**. 2000. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [31] 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.
- [32] PAES, L. E. S. **Soldagem TIG Orbital- Técnica de Alimentação Dinâmica de Arame Visando Aumento da Produtividade.** 2016. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [33] 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.
- [34] RUDY, J.F. **Development and application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for repair of aircraft engine, seal teeth.** Proceedings of the ASME International Gas Turbine Conference and Exhibit, 1982. London.
- [35] TIP TIG. **The welding revolution.** Disponível em: <<http://www.rapidwelding.com/files/99909900.pdf>> Acesso em: 19/09/2017.
- [36] 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: 19/09/2017.
- [37] LIBURDI AUTOMATED WELDING SYSTEMS. **Dabber Pro.** Disponível em:<http://www.liburdi.com/docs/welding-services/liburdi-automation/Dabber_Pro.pdf> Acesso em: 19/09/2017.
- [38] SILWAL, B.; SANTANGELO, M. **Effect of Vibration and hot-wire Gas Tungsten Arc (GTA) on the Geometric shape.** Journal of Materials Processing Technology, v. 251, p. 138-145, 2017.
- [39] HENON, B. K. **Advances in Automatic Hot Wire GTAW (TIG) Welding.** Disponível em:

- <<http://www.arcmachines.com/news/case-studies/advances-automatic-hot-wire-gtaw-tig-welding>> Acesso em 12/02/2017.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] ADAM, G.; SIEWERT, T. A.; QUINN, T. P.; VIGLIOTTI, D. V. **Contact-Tube Temperature During GMAW**. NIST. Disponível em: < <https://www.nist.gov/publications/contact-tube-temperature-during-gmaw>> Acesso em: 14/02/2017.
- [43] LANCASTER, J.F. **The physics of welding**. 2. ed. Oxford: Pergamon Press & International Institute of Welding, 1986. 297 p.
- [44] ASHIDH, K.; KUMARI, A. S.; SUMESH, A.; RAJASEKARAN, N. **Influence of stick-slip effect on gas metal arc welding**. Applied Mechanics and Materials, vols 813-814, p. 438- 445, 2015.
- [45] BENGISU, M. T.; ADNAN, A. **Stick–slip oscillations: Dynamics of friction and surface roughness**. Journal of the Acoustical Society of American, vol. 115, n.1, 1999.
- [46] MIG WELD. **Your key to perfect wire transport**. Disponível em: <http://www.migweld.de/fileadmin/Katalog_2013/Katalog_Drahttransport_2013_E.pdf> Acesso em: 06/08/2017.
- [47] 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.
- [48] BIRD, R. B.; WARREN E. S.; EDWIN, N. L. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley e Sons, Inc., 1960.
- [49] TRAUDIA, 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.

- [50] NAG, P. K.; BHATTACHARYA, A. **Effect of Vibration on Natural Convection Heat Transfer from Vertical Fin Arrays**. Heat and Mass Transfer, v. 9, p.487-498, 1982.
- [51] KOU, S.; WANG, T. H. **Weld Pool Convection and Its Effect**. Welding Research Supplement, p. 63-70, 1986.
- [52] BERTHIER, A.; PAILLARD, P.; CARIN, M.; Valensi, F.; PELLERIN, S. **TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 1: Identification of Marangoni effect**. Science and Technology of Welding and Joining, v.17, p. 609-615, 2012.
- [53] LECONTE, S.; PAILLARD, P.; CHAPELLE, P.; HENRION, G.; SAINDRENAN, J. **Effect of fluxes containing fluorides on TIG welding process**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 12, p. 121–126, 2007.
- [54] LUKKARI, J. **Orbital TIG - A Great Way to Join Pipes**. The ESAB Welding and Cutting Journal, vol. 60, pp. 3-6, 2006.
- [55] LATIF, H. **Advanced Orbital Pipe Welding**. Lappeenranta University of Technology, Laboratory of Welding Technology, Lappeenranta, Finlandia, 2012.
- [56] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Standard Welding Terms and Definitions** – AWS 3.0. 12. ed. Miami, Jul. 2009. 148 p.
- [57] ARC MACHINES. **Model 81- Small diameter pipe weld head**. Disponível em: <<http://www.arcmachines.com/products/pipe-welding/model-81>> Acesso em: 28/04 2017.
- [58] SPS- SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. **OrbiTIG**. Disponível em: <<http://www.sps-soldagem.com.br/orbitig.php>> Acesso em: 12/11/2017.
- [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] DZELNITZKI, M. D. **TIG – Direct-Current Welding with High-Frequency Pulses, an Interesting Process Variant**. 2000 EWM HIGHTEC WELDING GmbH, 2000.

- [61] XIAO, F.; YANG, R.; CHI, Z. **Surface tension of molten Ni–W and Ni–Cr alloys**. Materials Science and Engineering B, v. 132, p. 183-186, 2006.
- [62] KEJELIN, N. Z.; BUSCHINELLI, A. J. A.; BOHÓRQUEZ, C. E. N. **Soldagem Dissimilar do Aço X-60 com Inconel 625**. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem_dissimilar.pdf> Acesso em: 03/03/2017.
- [63] RIFFEL, K. C, PAES, L. E. S, SILVA, R. H. G, SCHWEDERSKY, M. B, ANDRADE, J. F, RUVIARO, F. **Projeto de um Dispositivo Direcionador para Melhor Ajuste da Posição do Arame na Soldagem GTAW Orbital Mecanizada**. XLII CONSOLDA, nov. 28-30, Belo Horizonte, 2016.
- [64] 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
- [65] Petrobrás N1707. **Normas e Especificações Técnicas**, 12/2014. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/CanalFornecedor/portugues/requisito_contratacao/requisito_normastecnicas.asp#ntp> Acesso em: 05/04/2017.
- [66] GENERAL ELETRIC. **Mentor Visual IQ Video Borescope**. Disponível em: < <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/remote-visual-inspection/mentor-visual-iq-video-borescope>> Acesso em: 09/06/2017.
- [67] GONÇALVES JR., A. A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de Metalurgia Científica e Industrial**. 1ª Edição. Editora Manole, Florianópolis SC, 2008. Trabalhos da tese do Régis
- [68] HUANG, R. S.; LIU, L. M.; SONG, G. **Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process**. Materials Science and Engineering A, v. 447, p. 293-243, 2007.
- [69] CONIGLIO, N.; MATHIEU, A.; AUBRETON, O.; STOLZ, C. **Weld pool surface temperature measurement from polarization state of thermal emission**. Quantitative InfraRed Thermography Journal, Jan. 28, 2016.

- [70] BRITISH STAINLEESS STEEL ASSOCIATION. **Heat tint (temper) colours on stainless steel surfaces heated in air**. Disponível em: <<https://www.bssa.org.uk/topics.php?article=140>> Acesso em: 07/10/2017.
- [71] AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS. **Bluing Steel by Heat Treatment**. American Journal of Physics, v. 36, Issue 5, May. 1996.
- [72] SILVA, R. H. G. **Inovações em equipamentos e em parametrização no processo de revestimento por plasma-pó (PTA-P)**. 2010. 301 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [73] Cosima *Schweisstechnologie*. Disponível em: <www.cosima.com>. Acesso em: 10/09/2017.
- [74] PAVLENKO, A. **Neue Kentnisse über Phylikalische Grundlagen des Plasma-Pulver-Auftragschweißens als Basis für die Prozeßsteuerung**. 1996. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Rheinisch-Westfälisch Technisch Technisch Hochschule Aachen.
- [75] STAVA, E. K. **A new, low spatter arc welding machine**. Welding Journal, p. 25-29, Jan. 1993.
- [76] UUSITALO, J. **A New Welding Process for Root**. Kemppi ProNews, v. 2, p. 4 - 6, 2006
- [77] SILVA, R. H. G. E. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicado ao Passe de Raiz**. 2005. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [78] DIRENE FILHO, H. **MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz**. 2014. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [79] 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.

- [80] 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.
- [81] ISO 10423. Petroleum and gas natural industries, 2009. Disponível em: < <https://www.iso.org/standard/42757.html>> Acesso em: 05/04/2017.
- [82] SPECIAL METALS. **Inconel Welding Electrode 112**. Disponível em: <<http://www.specialmetals.com/divisions/welding-products/products/specifications/aws.html>> Acesso em: 13/05/2017.
- [83] LINCOLN ELECTRIC. **Techalloy 625**. Disponível em: < http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_NickelAlloys-Techalloy-Techalloy625/c141010.pdf> Acesso em: 13/05/2017.

APÊNDICE A VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM RELATIVOS AOS MANIPULADORES E TRACIONADORES DE ARAME

Em soldagem, torna-se importante o controle sobre as variáveis utilizadas no processo, principalmente no desenvolvimento de novos procedimentos que visam uma futura aplicação industrial. Deste modo, é relevante a verificação dos parâmetros definidos na Interface Homem Máquina (IHM) dos equipamentos empregados no desenvolvimento do processo em laboratório.

A técnica de verificação trata-se de uma calibração simplificada com o objetivo de testar se um sistema de medição ou medida materializada está em conformidade com uma dada especificação [67]. Assim, este capítulo é dedicado à medição dos movimentos do Tartílope V4, que foram transpassados para o cabeçote AMI M81 para a repetição dos mesmos movimentos na aplicação circunferencial interna.

A.1 METODOLOGIA DE VERIFICAÇÃO

As variáveis de entrada para a oscilação da tocha como: amplitude de tecimento (A_t) e frequência (f) são valores definidos na IHM de ambos os equipamentos aqui utilizados.

Para verificar esses valores, foi utilizado um sensor de deslocamento linear durante a soldagem, com todos os equipamentos necessários como tocha e cabos acoplados ao manipulador, criando assim um esforço real no equipamento. Para tal, foi empregado um sensor Buster 8713, com curso de 54,4 mm e resolução de 0,1 mm. Este foi fixado em um ponto estratégico do eixo y , de modo a evitar o máximo de ruídos que interferissem nos resultados. Também se fez necessário o ajuste do curso, a fim de gerar uma margem de segurança para não extrapolar a zona de medição do sensor.

O transdutor trabalha em conjunto com o SAP, transformando os sinais de tensão em deslocamento no dispositivo mostrador. A Figura 93 mostra a fixação do equipamento acoplado ao eixo y do Tartílope.

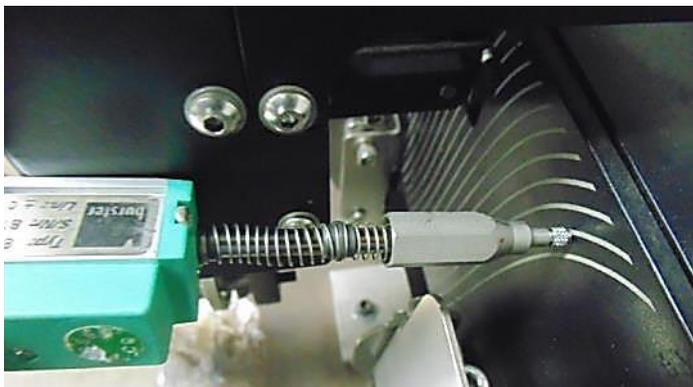


Figura 93. Sensor de deslocamento acoplado no Tartflope V4.

Em seguida, para repetir o movimento no cabeçote M81, realizou-se então uma verificação ao longo de toda a faixa de amplitudes disponíveis no cabeçote. Para tal, foi definida a frequência em 0,8 Hz (utilizada no passe de base) com valores de incrementos de 1,0 mm, partindo de 2,0 mm até o valor final de escala disponível na máquina, que corresponde a cerca de 12,7 mm (1/2"). O sensor linear foi preso ao corpo do manipulador, conforme a Figura 94.

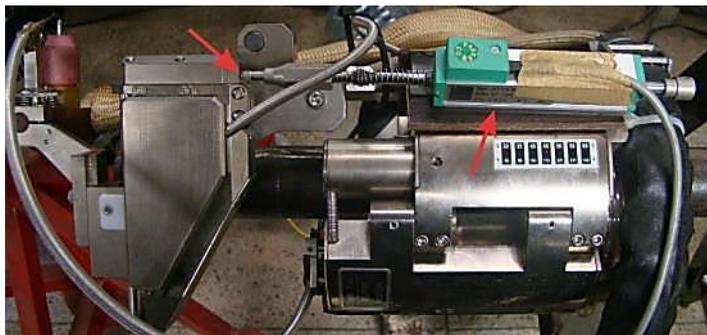


Figura 94. Sensor de deslocamento acoplado no cabeçote orbital AMI M81.

Em seguida, também foi verificada a velocidade de soldagem linear do Tartflope. Cronometrou-se o tempo de um minuto, e então mediu-se o deslocamento. Posteriormente, o valor foi transformado em rotação para o cabeçote M81 por meio da Equação 3 onde, n é a rotação (RPM), e ω é a velocidade angular (rad/s).

$$n = \frac{30\omega}{\pi} \quad (3)$$

A velocidade angular foi encontrada em função da velocidade de soldagem linear medida no Tartílope, e do raio interno do tubo a ser soldado, por meio da Equação 4 onde v corresponde à velocidade de soldagem (mm/s), e r é o raio interno do tubo (mm).

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (4)$$

A medição da velocidade de arame foi realizada para as três técnicas de alimentação de arame utilizadas (constante, pulsada e dinâmica), todas na saída do conduíte e do bico direcionador.

Para Va contínua em um único sentido utilizou-se um transdutor do tipo encoder presente no SAP. Porém, para alimentação dinâmica não foi possível a aplicação do mesmo transdutor devido ao movimento de avanço e recuo do arame possuir uma frequência relativamente alta e o tempo de resposta do transdutor não atender aos requisitos. Para medir a velocidade média de arame neste caso, foi cronometrado o tempo de um minuto e mediu-se o comprimento de arame alimentado. Este valor médio também pôde ser verificado posteriormente com a filmagem em alta velocidade do processo.

A.2 RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO

A.2.1. TARTÍLOPE V4 E STA

No ensaio de medição da oscilação da tocha foi apurado um tempo total de 50 segundos de aquisição, porém a Figura 95 ilustra apenas um ciclo para cada movimento realizado. É importante ressaltar que os valores de A_t e f são modificados durante o processo de soldagem a depender do passe de enchimento realizado. Os trechos retirados da aquisição via SAP para os dois passes executados são mostrados na Figura 95.

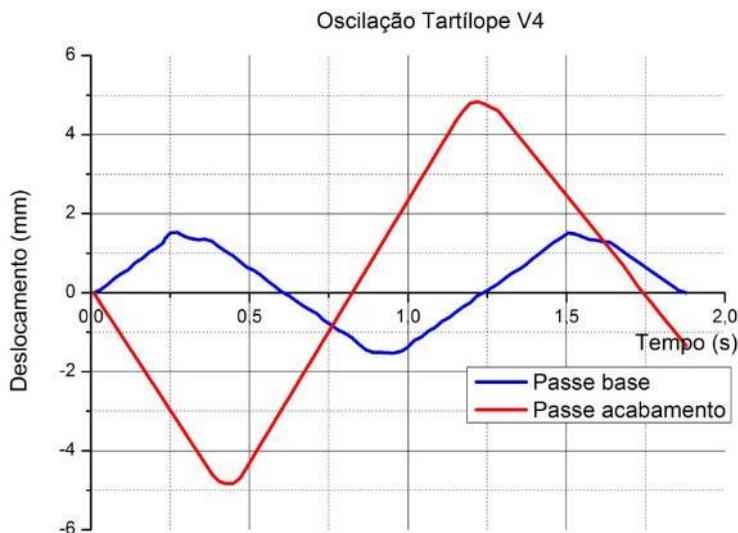


Figura 95. Gráfico para amplitude de oscilação no Tartilope.

O eixo das abcissas representa o centro do chanfro V em uma vista superior. Sendo assim, em uma análise dos dados encontrou-se uma diferença entre os valores informados e executados.

Na linha azul da Figura 95, quando o tecimento foi definido em 3,5 mm, a tocha deslocou-se 3,0 mm, gerando um erro máximo de 0,5 mm para o passe de base. No passe de acabamento, quando a amplitude foi definida em 10,0 mm, a tocha deslocou-se 9,7 mm, gerando um erro máximo de 0,3 mm. Observa-se que para a amplitude maior e frequência menor como no passe de acabamento, o erro diminuiu. Tal comportamento pode ser justificado pela dinâmica do motor do eixo y, o qual possui um tempo de resposta relativamente baixo e portanto, aumenta o erro com o aumento da frequência e a redução da amplitude.

Os períodos e consequentemente a frequência de oscilação foram executados de forma correta obtendo-se valores de 1,2 s e frequência de 0,8 Hz para o passe de base e 1,7 s e 0,6 Hz para o de acabamento. A velocidade de soldagem medida foi de 7,5 cm/min, coincidindo com o valor informado na IHM do manipulador.

Nesta etapa, também foi verificada a velocidade de alimentação de arame para as três técnicas utilizadas. A alimentação contínua em Va pulsada é apresentada no gráfico da Figura 96.

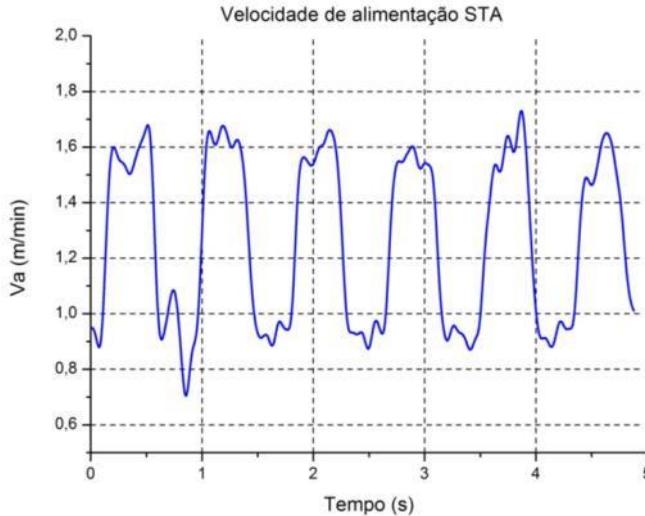


Figura 96. Gráfico de velocidade de arame utilizada para passe de acabamento com cabeçote STA.

Ao longo do processo foi medido um valor médio em torno de 1,6 m/min de arame no nível alto e 1,0 m/min para o nível baixo. Os tempos foram em torno de 0,4 s do início da rampa de subida até o fim da rampa de descida. Deste modo resultou em uma velocidade média de arame foi utilizada para alimentação em V_a constante e para dinâmica, mantendo deste modo a mesma taxa de deposição para preenchimento do chanfro independentemente da técnica aplicada.

A.2.2. AMI M81

Para repetir os parâmetros no cabeçote AMI, foi determinada graficamente uma curva de indicações, a qual mostra os valores de tecimento informados na IHM, chamados de *ideal*, e os realmente executados pelo manipulador denominados de *real*, conforme a Figura 97.

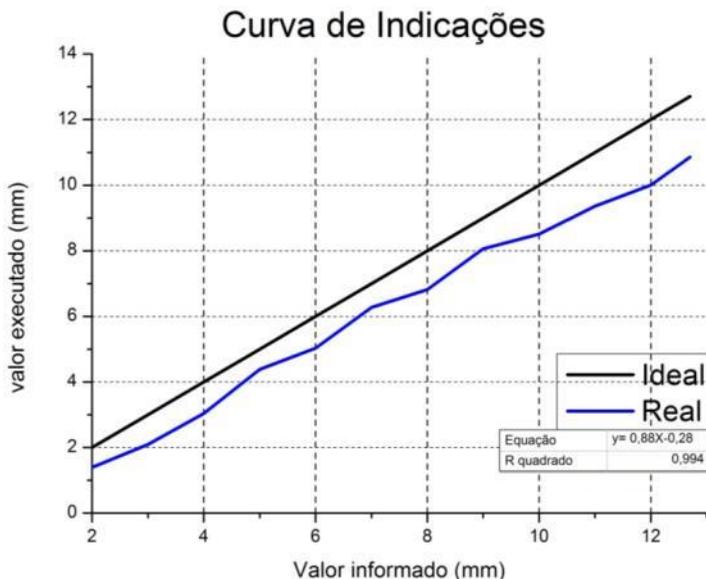


Figura 97. Curva de indicações para os valores ideais e reais de amplitude de oscilação.

Observa-se um distanciamento entre as curvas *ideal* e *real* para os valores no fim da escala. Ressalta-se que o comportamento foi diferente do visualizado no Tartílope, que mostrou maiores erros para os valores menores como na amplitude de 3,5 mm. Isto pode ser justificado pela dinâmica dos motores ser distinta entre os manipuladores, além da construção mecânica dos eixos.

Uma forma de expressar o erro graficamente é por meio da curva de erros, a qual representa a distribuição dos mesmos ao longo da faixa de medição [67]. Na Figura 98, observa-se nitidamente o aumento do erro conforme se aumentam os valores de amplitude. O sistema atinge um erro máximo de -2,0 mm para valores próximos ao fim da escala em torno de 12,7 mm.

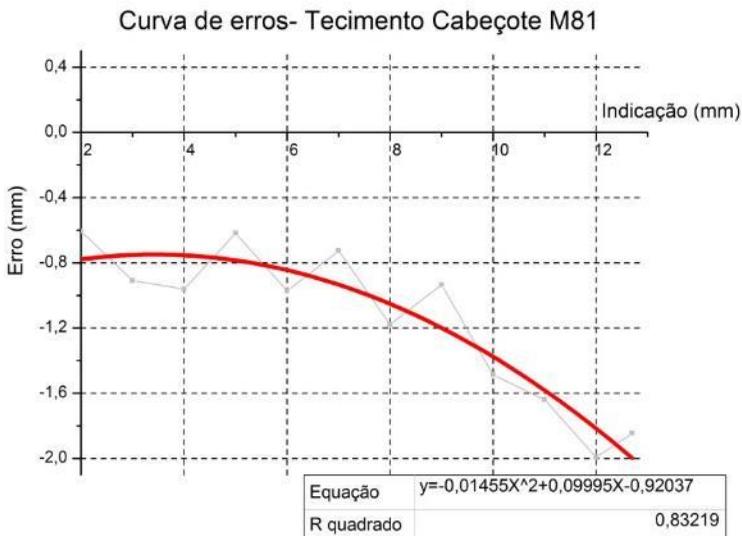


Figura 98. Curva de erros para a faixa de amplitudes de tecimento.

No sistema da *Arc Machines*, a bobina de arame e os roletes tracionadores estão acoplados ao cabeçote conforme mostra em detalhe a Figura 99.

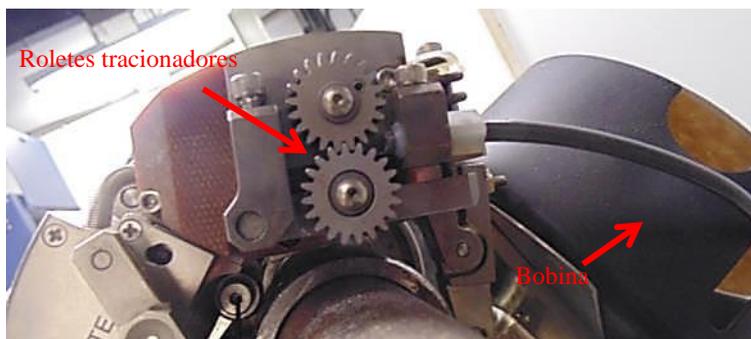


Figura 99. Roletes tracionadores de arame AMI M81.

Nota-se que os roletes tracionadores possuem forma de engrenagens, o que auxilia o agarramento do arame, evitando seu deslizamento, semelhante a roletes recartilhados.

Para a velocidade de arame no cabeçote AMI foi obtido o gráfico apresentado na Figura 100. Encontrou-se o valor médio de 1,6 m/min para o nível alto e 1,1 m/min para o nível baixo. O mesmo resultado obtido no sistema da IMC.

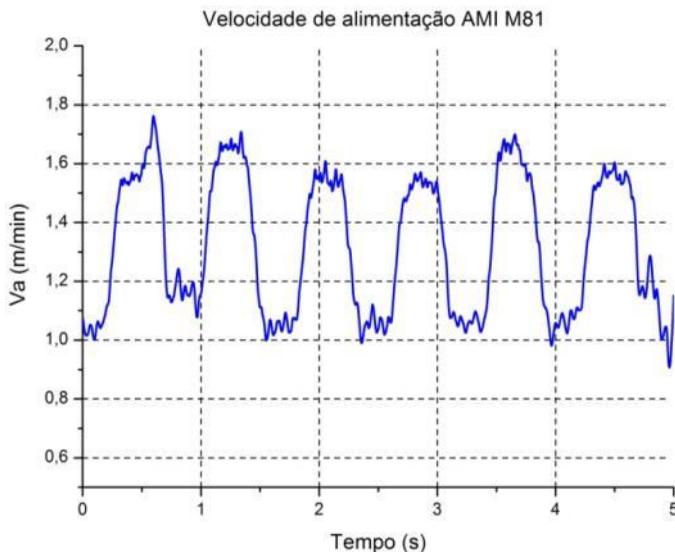


Figura 100. Velocidade de arame cabeçote M81.

De modo a transpassar a velocidade de soldagem de 7,5 cm/min do Tartilope para o cabeçote AMI, com a Equação 3 foi calculada uma rotação de 0,12 RPM. Desta forma, é necessário aproximadamente 8 min e 20 s para a tocha percorrer uma volta no tubo utilizado neste trabalho (com 197 mm de diâmetro interno).

Com estes ensaios foi possível garantir a repetição dos parâmetros de movimento produzidos em chapas planas para o processo circumferencial interno.

APÊNDICE B- SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM PTA-P E PASSE DE RAIZ COM MIG CCC - CONCEPÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Além do processo de soldagem TIG (foco deste trabalho), foi necessária a adoção e o conhecimento de outros processos de soldagem a arco, como o PTA-P (*Plasma Transferred Arc with Powder*) e o MIG CCC, ambos essenciais para o alcance dos resultados. Conforme mencionado, as suas aplicações basearam-se em resultados de trabalhos desenvolvidos anteriormente no LABSOLDA.

B.1 REVESTIMENTO COM PTA-P

Para reprodução da condição real em tubos cladeados, foi necessária a criação da camada de revestimento com Inconel 625. Com os equipamentos disponíveis no LABSOLDA, uma alternativa encontrada foi a aplicação do processo PTA-P.

Uma característica atribuída ao PTA-P trata-se da constrição do arco por meio do bico constritor, o que gera vários diferenciais e possíveis vantagens sobre outros processos como o próprio TIG. Embora alguns trabalhos apresentem o processo como sendo mais eficiente proporcionando uma maior taxa de fusão para correntes menores, geralmente a potência do processo é maior, visto que a distância do eletrodo à peça é maior, o que implica muitas vezes em comparações equivocadas [72].

Não obstante, trata-se de um processo altamente indicado para realização do revestimento ou *cladding*, que dentre outros motivos proporciona baixas diluições já que a maior parte do calor do arco é absorvida pelo pó. Outros autores afirmam também que o pó ao entrar em contato com a peça, absorve calor da mesma, reduzindo a penetração e consequentemente a diluição [74-76].

Para este trabalho, apenas as bordas das peças foram preparadas para receber um revestimento com 30 mm de largura, conforme mostra a Figura 101. Tanto para chapas quanto para tubos, o procedimento foi realizado na posição plana, sendo que neste segundo caso, foi empregada uma placa rotativa para movimentar o mesmo enquanto a tocha realizava o movimento de oscilação. A camada de Inconel 625 depositada foi mantida entre 2,5 mm e 3,0 mm de espessura, conforme definido por normas na aplicação de tubos cladeados.

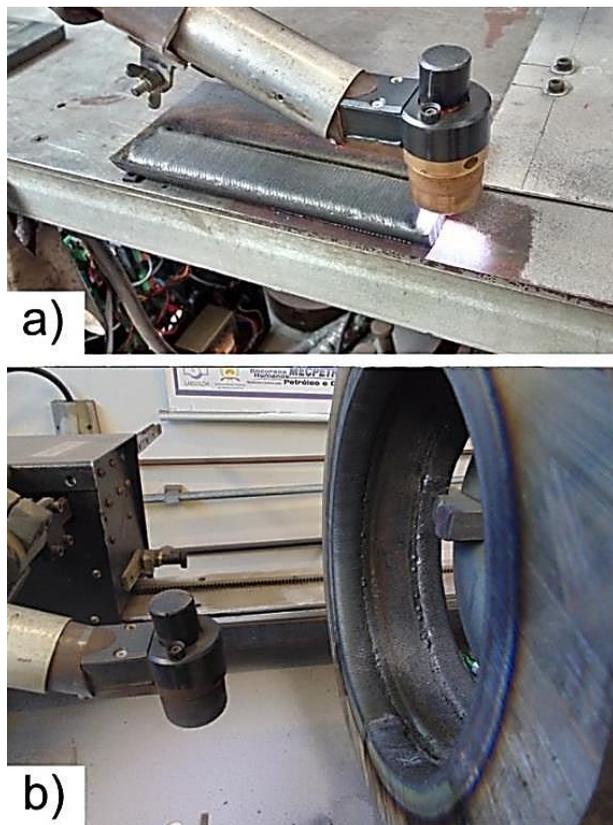


Figura 101. Revestimento PTA-P. Em a) flanco de chapa de aço carbono; b) tubo de grau API X65.

A Figura 102 exibe o aspecto da superfície do revestimento em uma junta de chapas, pós-usinagem do chanfro V. Nota-se a ausência de defeitos como trincas e porosidade. Contudo, a baixa diluição nas primeiras amostras produzidas fez com que o revestimento fosse descolado durante a usinagem. Por isso, a energia de soldagem foi aumentada para garantir a fusão uniforme do substrato e aumentar a aderência do revestimento. Os parâmetros definitivos aplicados são mostrados na Tabela 10.

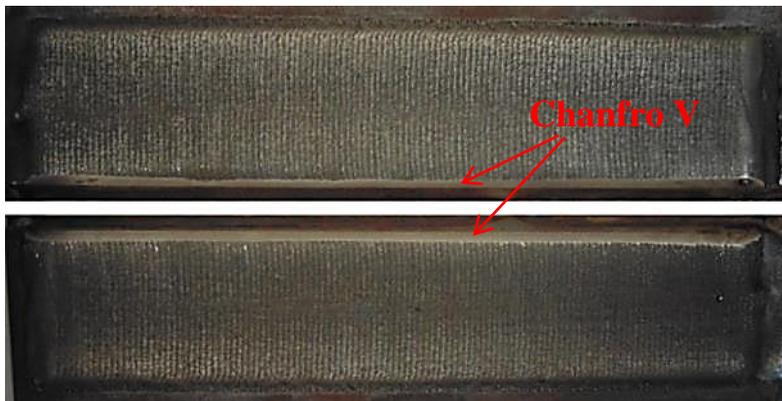


Figura 102. Chapa usinada com chanfro V em revestimento de Inconel 625.

Tabela 10. Parâmetros para revestimento com Inconel 625.

Parâmetros	Valores
Oscilação da tocha	Triangular
Liga Depositada	Inconel 625
Corrente de Soldagem	160 A
Corrente de Arco Piloto	10 A
Amplitude de oscilação	30,0 mm
Frequência	0,5 Hz
Velocidade de Soldagem	8,5 cm/min
Vazão de Gás Plasma	2,0 l/min
Vazão Gás de Proteção	12,5 l/min
Vazão Gás de Arraste	2,5 l/min
Tipo do gás	Argônio
Distância Bocal-Peça	8,0 mm
Recuo do Eletrodo	1,0 mm
Orifício Constritor	3,2 mm
Taxa de Alimentação	0,95 kg/h
Rotação do alimentador	6,5 RPM

B.2 PASSE DE RAIZ COM MIG CCC

Pelo método de união bilateral, a primeira etapa da soldagem de união das juntas cladeadas consistiu na realização do passe de raiz. Para tal, foi escolhido o processo MIG CCC por apresentar características de estabilidade da poça e da transferência metálica que se sobressaem em relação ao processo convencional [77-80].

A primeira etapa de soldagem em peças revestidas foi realizada em chapas. Esta também foi utilizada para o propósito de parametrização das variáveis do processo. Portanto, a soldagem foi executada conforme mostrado na Figura 103, abrangendo as principais posições de soldagem.

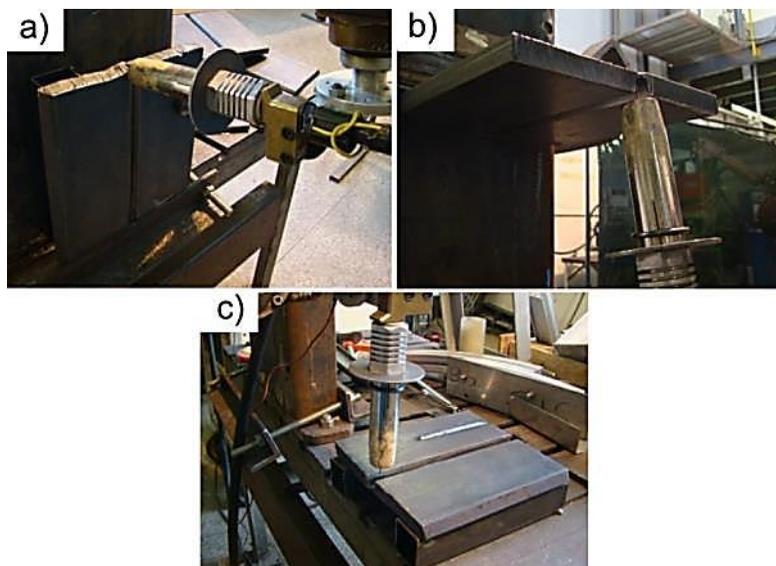


Figura 103. Passe de raiz com aço carbono. Em a) Vertical; b) Sobre cabeça; c) Plana.

Em testes preliminares, o passe de raiz foi realizado de forma filetada, ou seja, sem oscilação. A técnica mostrou-se eficaz na busca pelo objetivo, que diz respeito à obtenção da penetração total da junta. A Figura 104 mostra o aspecto da face e do reforço da raiz no cordão para as 4 posições ensaiadas.

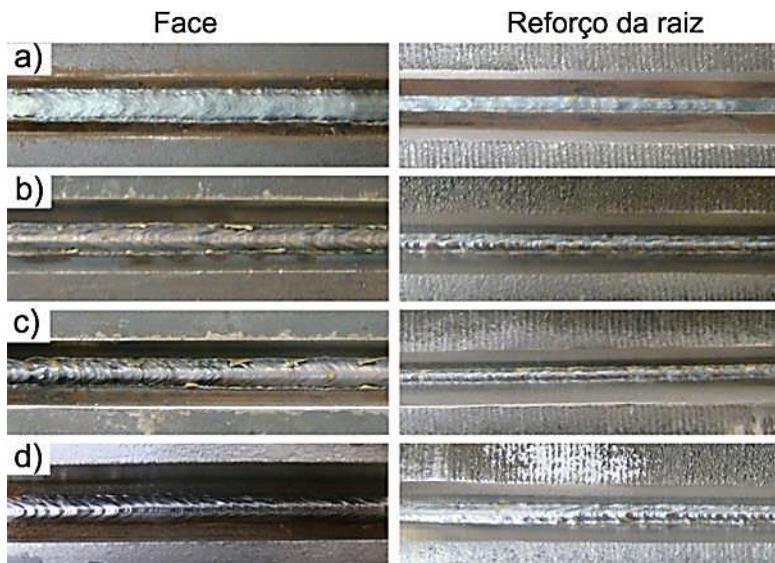


Figura 104. Passe de raiz com MIG CCC. Em a) Vertical descendente; b) Vertical ascendente; c) Sobre cabeça; d) Plana.

Em todas as posições obteve-se penetração total da junta, porém com diferentes características geométricas do cordão e comportamento do processo. Observou-se uma transferência metálica mais estável para a posição vertical descendente, resultando em um cordão mais molhado quando comparado às demais posições, conforme mostra a face do cordão na Figura 104a. Conforme explicado por Sartori [79], na posição descendente a poça tende a escorrer na direção de avanço da tocha, mantendo grande parte de metal líquido abaixo do arco, fato que contribuiu para a transferência mais estável da gota.

Para a posição vertical ascendente, a força da gravidade atua no sentido contrário à direção de avanço resultando em um cordão muito convexo na face e no reforço da raiz com tendência a apresentar penetração demasiada, conforme mostrada na Figura 104b. Isto fez com que fosse adotada a abordagem de um passe de raiz em duas etapas de 180° , como os aplicados por Sartori [79] e Kinderman [80].

Para as posições sobre cabeça e plana, Figura 104c e Figura 104d respectivamente, notaram-se mudanças na frequência da transferência metálica, o que resultou em um cordão com maior convexidade no reforço da raiz e da face. Na posição plana, a penetração do cordão foi

maior devido ao auxílio da força da gravidade, porém não comprometeu o processo.

Os parâmetros de soldagem utilizados foram os configurados no programa sinérgico “C25 aço carbono 1,2 mm” presente na fonte Digi-plus A7 da IMC. Os valores são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11. Parâmetros do processo CCC aplicados no passe de raiz.

Parâmetro	Valor
Oscilação da tocha	N/A
Va	3,3 m/min
I _{média}	146 A
U _{média}	16 V
P _{média}	2181 W
a	30,0
Cta	1,0
Ckr	0,0
DBCP	12,0 mm
Ângulo tocha	10°
Orientação	Empurrando
Velocidade de Soldagem	32,0 cm/min
Abertura de raiz (<i>gap</i>)	1,0 mm a 1,2 mm

Em seguida foi realizada a aplicação do passe de raiz nos tubos, mediante um robô antropomórfico para movimentação da tocha ao longo da circunferência, conforme a Figura 105.



Figura 105. Bancada de soldagem do passe de raiz em tubos.

Em uma avaliação visual dos cordões de solda foi comprovado o mesmo comportamento obtido na união das chapas, com penetração total e um bom molhamento na posição vertical descendente. Porém, houve a necessidade de se aumentar a velocidade de soldagem para 40 cm/min no trecho da posição plana (entre 0° e 25°), com o objetivo de evitar penetração demasiada, e consequentemente reforço excessivo na parte interna da raiz. A Figura 106 mostra o aspecto da superfície da face do cordão do passe de raiz, ao longo da circunferência, sendo o tubo soldado em duas etapas.

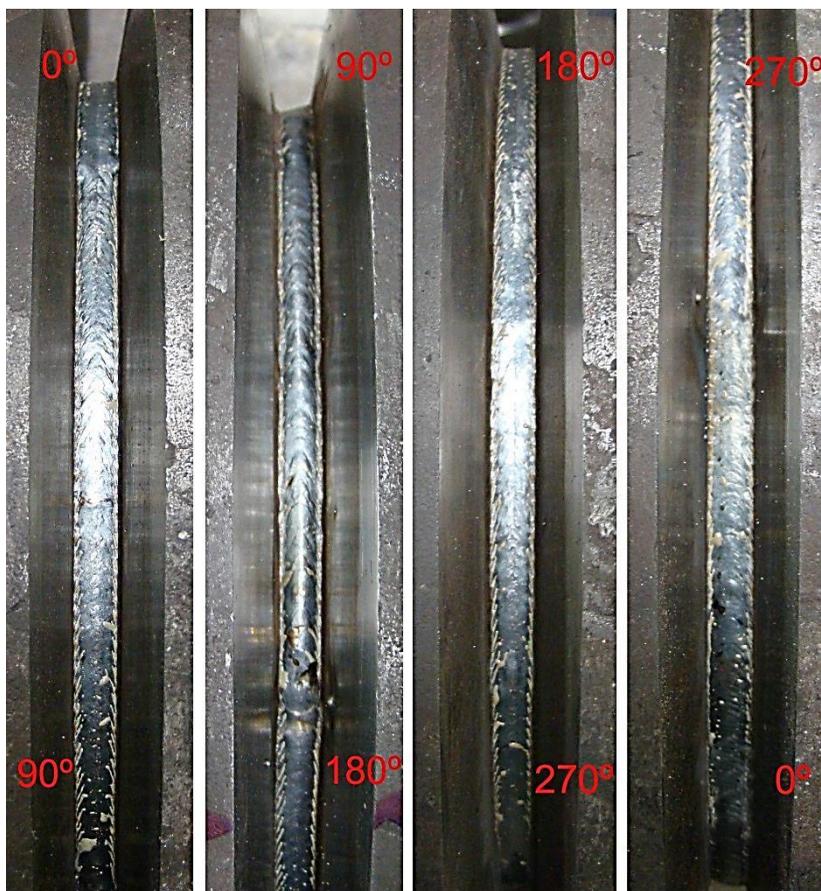


Figura 106. Aspecto superficial passe de raiz com MIG CCC em tubo X65.

Foi verificada durante a soldagem uma pequena diferença na frequência da transferência metálica quando o cordão transitava da posição vertical descendente para a sobre cabeça. Para corrigir, foi adicionado um pequeno tecimento de 0,5 mm ao longo de toda a junta. Isto proporcionou uma melhor distribuição do metal líquido, garantindo o contato da gota com a poça no momento da transferência. É importante salientar que por se tratar de uma junta *narrow gap*, o movimento de oscilação da tocha torna-se restrito a valores pequenos. A Figura 107 mostra o refor-

ço da raiz pela parte interna do tubo em diferentes regiões ao longo da junta.

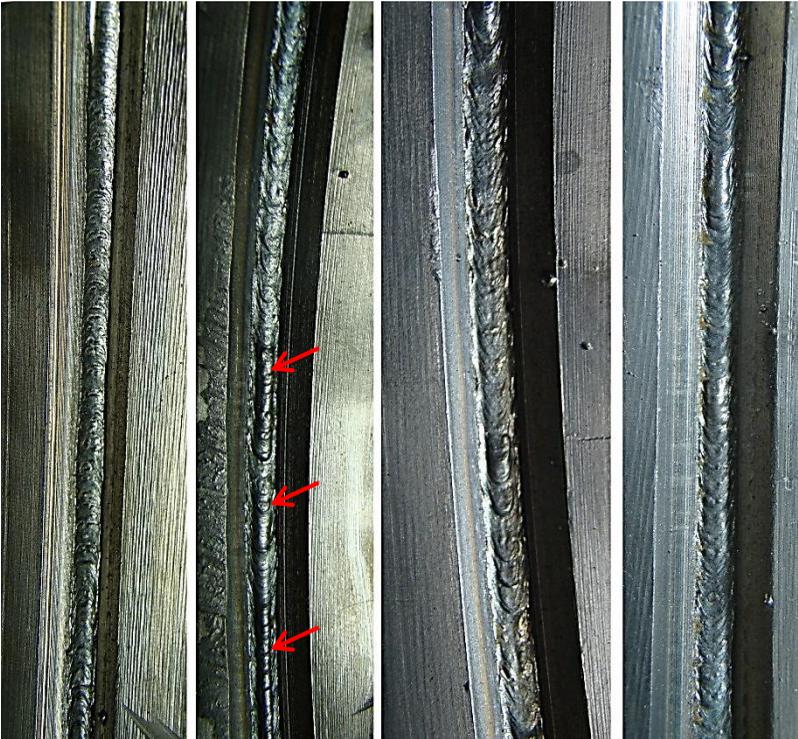


Figura 107. Reforço da raiz, aspecto de penetração ao longo da junta.

Regiões com maior reforço na raiz, como as indicadas pelas setas vermelhas na Figura 107 podem ocorrer ao longo da junta. Tais variações podem ser atribuídas a variações na abertura de raiz (*gap*) e ao desalinhamento da junta (*high-low*). Estes podem alterar o comportamento do processo pela mudança na frequência de destacamento, que constitui um fator crucial para o bom funcionamento do CCC [79-81].

Mesmo com a existência de pontos com diferentes características geométricas na raiz após o passe externo, é possível garantir a fusão homogênea por meio do passe interno com a versão autógena do processo TIG. De forma a refundir esta região. Mesmo assim, é importante que o perfil de penetração do passe externo não varie muito ao longo da junta, o que poderia dificultar a correção com a soldagem interna.

APÊNDICE C- ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Uma das principais preocupações em aplicações de revestimento para tubulações condutoras de derivados de petróleo é a alta porcentagem de ferro na superfície de contato com o fluido, fato que pode gerar problemas relativos à corrosão precoce dos equipamentos.

Para tal, normas como a Petrobrás N1707 [65] regulamentam construções com revestimentos metálicos, nos quais aplicam-se ligas de aços inoxidáveis e à base de níquel. Nestes casos é recomendada uma espessura mínima de 3 mm para as deposições, além da utilização de 2 ou mais passes de solda, na busca por um baixo teor de ferro no cordão. Normas internacionais como a ISO (*International Organization for Standardization*) 10423 [81] mostram que os teores de ferro são classificados em duas classes: FE5 para teores de ferro abaixo de 5% em massa, e FE10 para teores de ferro acima de 5% e abaixo de 10% em massa. Tais considerações para revestimentos de liga NiCrMo3 são medidas na superfície do revestimento.

Esta seção é destinada às medições de composição química por EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*), feitas por Microscopia Eletrônica de Varredura, em diferentes pontos da junta nas chapas cladeadas de 1/2". Os pontos foram escolhidos pelo autor por serem zonas de interesse quanto à porcentagem de ferro e demais constituintes existentes neste local.

C.1 ANÁLISE EDS EM JUNTA SOLDADA PELA CONDIÇÃO C4

Este tópico exhibe os resultados para o processo TIG com corrente pulsada e arame contínuo com Va pulsada (C4). Os locais de análise são destacados na Figura 108, capturada pelo MEV em uma ampliação de 30 vezes.

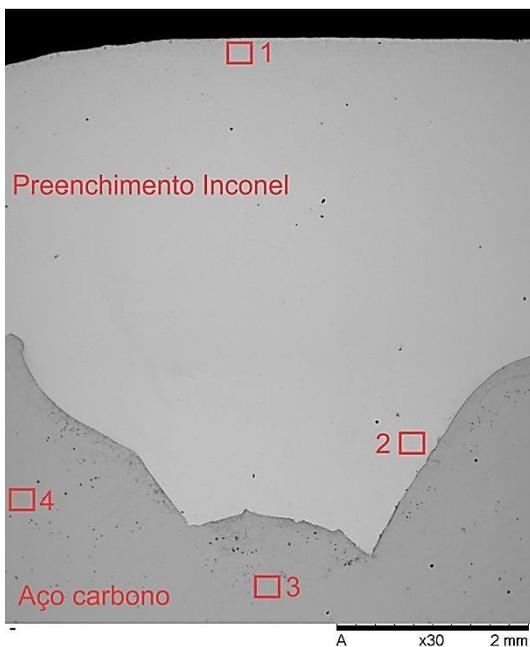


Figura 108. Macrografia em MEV do cordão realizado para C4.

Os valores de cada elemento são apresentados em porcentagem na Tabela 12, além de seus respectivos espectros em sequência na Figura 109.

Tabela 12. Composição química da amostra soldada pela condição C4.

Área	%Cr	%Mn	%Fe	%Ni	%Mo	%Si	%Outros
1	21,261	0,139	1,895	62,060	7,144	0,282	7,218
2	20,757	0,376	7,190	60,347	6,460	0,256	4,614
3	--	1,111	91,626	--	--	0,665	6,599
4	--	0,808	92,453	--	--	0,302	6,436

Os dados mostram uma redução próximo a 5,3% no teor de ferro do primeiro passe (Área 2) para o segundo passe (Área 1). Este valor se encontra dentro das normas citadas anteriormente para revestimento em aplicações de contato direto com substâncias altamente corrosivas.

A condição de baixo teor de ferro no passe de acabamento é facilitada pela geometria da junta e pela sequência de soldagem com a utilização de 2 passes. Deste modo garante-se que o segundo passe não funda diretamente o aço carbono, pois é depositado sobre o passe de base. Além disso, abrange parte do revestimento depositado por PTA-P, o qual também é fundido durante o passe de acabamento enriquecendo o metal de solda com níquel e cromo.

Nas áreas de aço carbono, a região 3 exibe um teor de Mn maior que a área 4, proporcionado pelo maior teor de elementos de liga no metal de adição ER 70S-6.

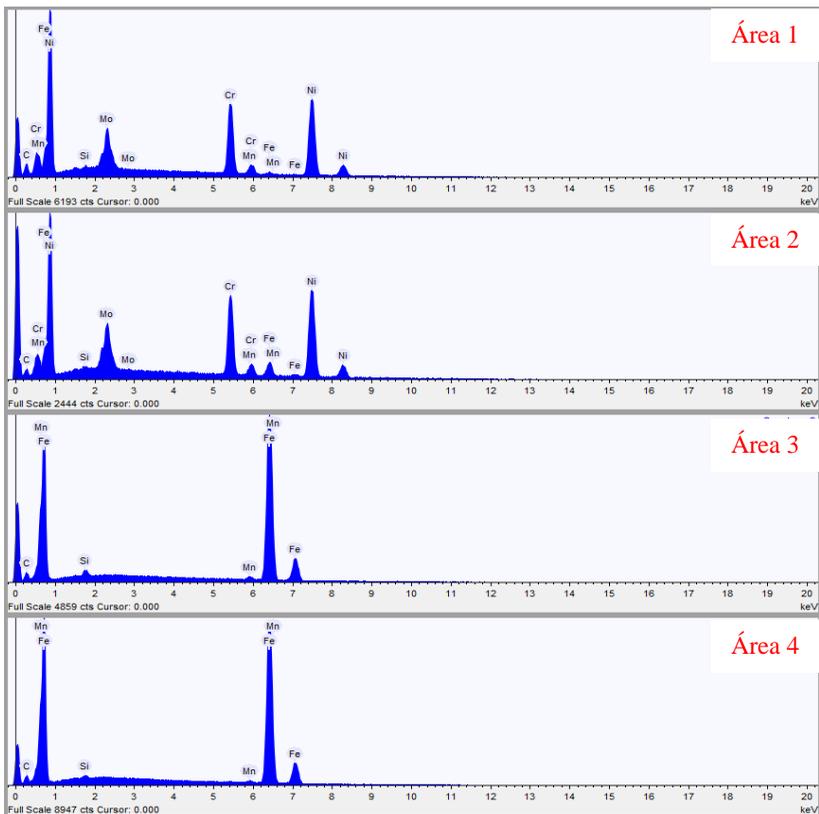


Figura 109. Espectros de composição química para C4.

C.2 ANÁLISE EDS EM JUNTA SOLDADA PELA CONDIÇÃO C7

Para a junta soldada pelo processo com corrente pulsada e alimentação dinâmica, os locais de análise estão destacados na Figura 110. A ampliação da imagem é de 30 vezes.

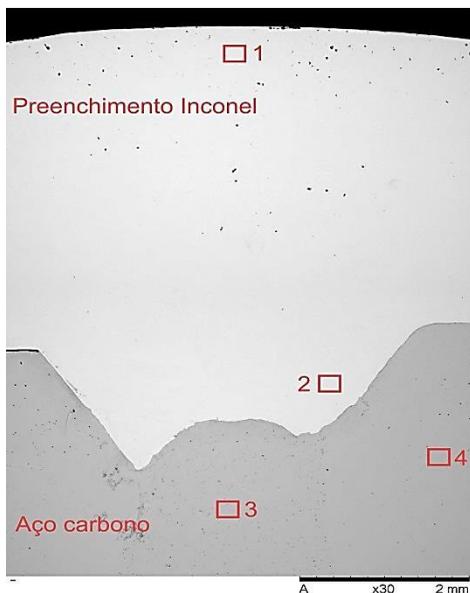


Figura 110. Macrografia em MEV do cordão realizado com a condição C7.

Em seguida, a porcentagem de cada elemento é apresentada na Tabela 13, além de seus respectivos espectros em sequência na Figura 111.

Tabela 13. Composição química da amostra soldada para C7.

Área	%Cr	%Mn	%Fe	%Ni	%Mo	%Si	%Outros
1	21,751	0,244	1,543	63,180	7,517	0,362	5,403
2	20,451	0,356	5,743	62,347	6,529	0,173	4,401
3	--	1,165	92,616	--	--	0,667	5,552
4	--	0,759	91,691	--	--	0,555	6,996

Da Tabela 13 nota-se o baixo teor de ferro a partir do primeiro passe com Inconel 625, um valor próximo de 6,0%, chegando a 1,5% no passe de acabamento próximo da superfície.

O teor de ferro na superfície apresenta-se muito próximo aos obtidos para C4 da Tabela 12. Porém, a pequena diferença entre ambas pode ser consequência dos resultados observados na termografia da Seção 5.1.4, os quais apresentaram menor gradiente térmico (consequentemente menor aquecimento) para a soldagem com corrente pulsada e alimentação dinâmica. Tal circunstância pode ter auxiliado na obtenção de menores níveis de diluição para esta configuração de processo visto que em menores temperaturas também há menos perda de elementos por difusão.

Novamente, para a região do aço carbono, observou-se um maior teor de Mn na área 3 quando comparada à área 4 no metal de base.

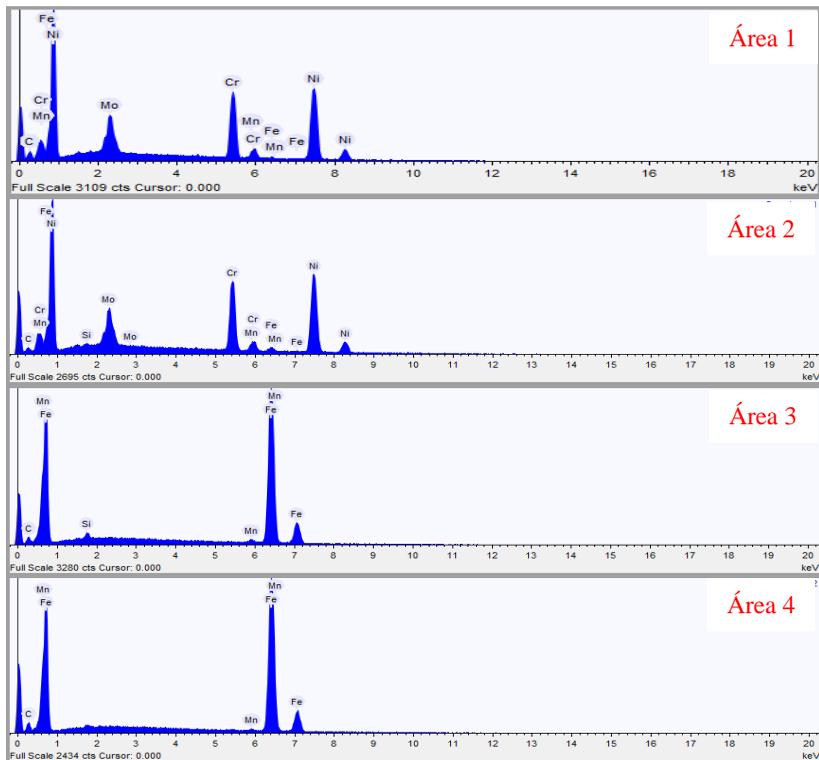


Figura 111. Espectros de composição química para C7.

C.3 ANÁLISE EDS EM JUNTA SOLDADA PELA CONDIÇÃO C9

A seguir são mostrados os resultados para o processo com corrente constante e alimentação dinâmica. A Figura 112 capturada pelo MEV em uma ampliação de 30 vezes, exibe as regiões de medição de composição química na amostra.

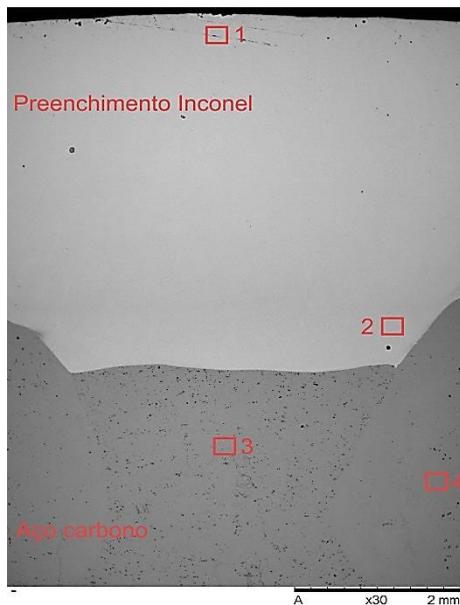


Figura 112. Macrografia em MEV do cordão realizado com a condição C9.

As porcentagens de cada elemento medidas nas áreas em vermelho são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14. Composição química da amostra soldada para C9.

Área	%Cr	%Mn	%Fe	%Ni	%Mo	%Si	%Outros
1	21,935	0,114	2,748	62,175	7,498	0,162	5,368
2	20,220	0,397	7,225	59,418	7,010	0,294	5,436
3	--	1,074	88,350	--	--	0,585	9,992
4	--	0,605	94,729	--	--	0,352	4,313

Esta configuração apresentou o maior teor de ferro na superfície dentre as três juntas analisadas. Mesmo assim, seu valor é abaixo de 2,8%, resultado que é satisfatório para aplicações de alta responsabilidade. Houve uma redução de 4,5 % em relação ao passe de base. Ressalta-se que para as três configurações os teores de Ni permaneceram dentro dos valores especificados pelos fabricantes de consumíveis de Inconel 625, com no mínimo 58,0% em massa, assim como o Cr cuja faixa recomendada varia de 20,0% a 23,0% em massa [84,85].

Para a região de aço carbono, novamente a área 3 mostrou-se mais rica em Mn que o metal de base na área 4, isto devido ao metal de adição ER70S-6. Os espectros de composição química são mostrados na Figura 113, referentes às áreas medidas.

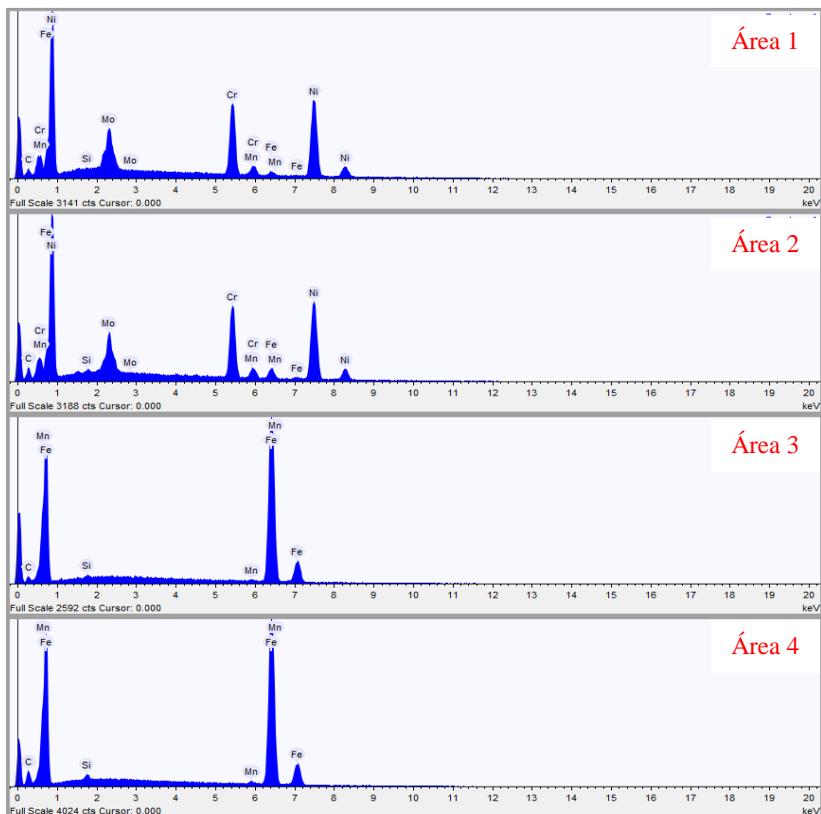


Figura 113. Espectros de composição química para C9.

