

Cassiano Godinho

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE  
SOLDAGEM TIG AUTOMATIZADO ALIMENTADO COM  
REDUZIDOS ÂNGULOS DE INSERÇÃO DE ARAME EM  
RELAÇÃO AO ELETRODO**

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

Florianópolis, SC  
2017

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

Godinho, Cassiano  
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE SOLDAGEM  
TIG AUTOMATIZADO ALIMENTADO COM REDUZIDOS ÂNGULOS  
DE INSERÇÃO DE ARAME EM RELAÇÃO AO ELETRODO /  
Cassiano Godinho ; orientador, Régis Henrique  
Gonçalves e Silva, coorientador, Mateus Barancelli  
Schwedersky, 2017.  
132 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Engenharia Mecânica. 3.  
GTAW. 4. Alimentação tangencial. 5. Taxa de fusão.  
I. Gonçalves e Silva, Régis Henrique . II.  
Schwedersky, Mateus Barancelli. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica. IV. Título.

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE  
SOLDAGEM TIG AUTOMATIZADO ALIMENTADO COM  
REDUZIDOS ÂNGULOS DE INSERÇÃO DE ARAME EM  
RELAÇÃO AO ELETRODO**

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

Florianópolis, 13 de novembro de 2017.

---

Prof. Dr. Jonny Carlos da Silva  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Eng<sup>o</sup> Raul Gohr Júnior  
IMC – Soldagem

---

Dr. Eng<sup>o</sup>. Giovanni Dalpiaz  
CENPES - PETROBRAS



Dedico este trabalho especialmente a minha família. Em especial aos meus pais Hélio e Silvana, e a minha querida irmã Estefânia pelo apoio incondicional transmitido durante todo o período.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram e me ajudaram a construir este trabalho, resultando em um aprendizado ímpar em minha vida pessoal e profissional.

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva e ao meu coorientador Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwederky, por toda a orientação técnica, produtivas discussões e experiência transmitida;

- Ao Designer Marcelo Okuyama, pelo auxílio nas questões gráficas;

- Ao Eng<sup>o</sup> Rafael Bernardi e Kauê Riffel que atuaram auxiliando nas etapas experimentais deste projeto;

- A todos integrantes e ex-integrantes do LABSOLDA com quem tive a oportunidade de trabalhar e muito influenciaram em minha formação acadêmica e pessoal: Luiz Eduardo Paes, Francisco Sartori, Luciano Cirino, Gustavo Sousa, Mateus Skowronski, Thaffarel Ribas, João Facco, Felipe Kalil, Hemerson Santos, Mário Nascimento, Eduardo Bidese, Larissa Colares, Alex Guesser, Rafael Barbosa, Rafael Nunes, Jônathas Alves, Alberto Bonamigo, Hellinton Direne, Eduardo Luz, Ricardo Campagnin, Renan Kindermann, Daniel Ferrari, Ramon Fagundes, Rodrigo Machado.

- Ao Grupo Vanessa Tobias pela oportunidade de participar do curso que aprimorou minha gestão da emoção, desempenhando papel crucial na etapa final deste trabalho;

- Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a SPS e Petrobras pelo apoio financeiro;

- A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Eng. Geice Paula Villibor e ao Prof<sup>o</sup> Dr. Eng. Alexandre Brandão pelas cartas de referência e recomendação para cursar este mestrado;

- À minha família, pela constante motivação e incentivo;



“Às vezes a vida vai te acertar um tijolo na cabeça. Não perca a fé. Eu estou convencido de que a única coisa que me faz seguir em frente era que eu amava o que fazia.”

(Steve Jobs)



## RESUMO

A automatização no sentido de aumentar a produtividade dos processos de soldagem tem-se tornado cada vez mais uma necessidade. Cumprimento de prazos, garantia da qualidade final e repetibilidade operacional são alguns dos aspectos envolvidos. No Brasil, esta vertente voltada para a automatização ainda está longe de alcançar os níveis ideais. A indústria nacional caracteriza-se por altos níveis de operação manual, a qual decorre em baixa produtividade. Por isso, a partir deste cenário têm-se buscado o estudo de novas tecnologias que possam ser aplicadas na indústria, que visem o aumento da produtividade, mantendo-se a qualidade final. No contexto da soldagem automatizada, tem-se que a alta produtividade se trata de um termo associado ao processo MIG/MAG devido à alta taxa de fusão. Discordante a este último, o processo TIG é associado a característica de baixa produtividade, no entanto as características geométricas e metalúrgicas dos cordões obtidos é um diferencial. Em vista disso, o presente trabalho tem como objetivo geral a avaliação de um novo conceito de tocha que visa o aumento da produtividade do processo TIG, a partir da alimentação de arame tangencialmente ao eletrodo. Essencialmente este trabalho buscou caracterizar os aspectos relacionados a operacionalização multidirecional, verificar a independência da posição de inserção do arame, e a taxa de fusão. Além disso, se aborda uma simulação de aplicação de preenchimento de chanfro em corpo de prova real com vistas de aplicação em indústria de Petróleo e Gás. Para a etapa de caracterização foram realizados ensaios com processo de alimentação tangencial adotando recursos com filmagem de alta velocidade e filmagem térmica, posteriormente estabeleceu-se comparativos com resultados já apresentados na literatura a respeito do processo TIG em sua modalidade convencional. Ao fim desta etapa, o processo com alimentação tangencial foi submetido a simulação de aplicação industrial em potencial corpo de prova. Em prosseguimento, foram realizados os ensaios para verificação da taxa de fusão em diferentes níveis de corrente de soldagem, mantendo-se fixos velocidade de soldagem ( $V_s$ ), distância eletrodo-peça (DEP) e distância eletrodo-arame (DEA). Ao mesmo procedimento foi submetido o processo TIG em sua modalidade convencional sob dois ângulos diferenciados ( $45^\circ$  e  $65^\circ$ ) seguido por testes com o processo MIG/MAG executados na modalidade de transferência por curto circuito de modo a estabelecer posterior comparativo entre processos. Este comparativo entre processos

baseou-se na corrente média e potência média dos processos. Como resultado, verificou-se que é possível aplicar o processo TIG com alimentação tangencial em operações multidirecionais. No entanto, notou-se que em situações em que ocorre a sobreposição de cordões há uma tendência de formação de irregularidade quando o arame é inserido lateralmente. Sob o ponto de vista da taxa de fusão, mostrou-se significativamente superior em relação ao processo TIG na modalidade convencional, e no comparativo ao processo MIG/MAG sob o aspecto da potência média apresentou maior capacidade de fusão, e no aspecto da corrente média relevante proximidade entre as curvas de comparação. Estes resultados constata a significância deste processo frente a aplicações multidirecionais, recurso este inviabilizado no processo TIG em sua modalidade convencional.

**Palavras-chave:** GTAW; Alimentação Tangencial; Multidirecional; TIG mecanizado; Taxa de Fusão.

## ABSTRACT

Currently, in Brazil, automation is far from what have been seen around the world. National industry is characterized as low productivity because of high levels of manual operation. In the context of automated welding, high productivity it is a term related to MIG/MAG process due to it high melting rates. Differently, TIG process is associated with low productivity rates, therefore, starting from this scenario, studies have been made about new technologies to improve TIG process features. The present work as central objective assessed a new welding torch concept which aims to raise TIG productivity rates. The present work, as main objective assessed a new welding torch concept which aims to reach higher productivity rates in terms of wire insert position related to arc (multidirectional), besides, the melting rate of TIG. Experiments with industrial (oil and gas) approach was also studied. The methodology was divided in two phases: firstly, the characterization approach followed by TIG melting rate. The characterization experiments focused on the different positions of wire insert followed by a comparison with literature results. The experiments about industrial application (groove fillment) was also part of this phase. Secondly, the study concerning melting rate in conventional and tangential TIG modes. Besides a comparison with MIG/MAG (short circuit transfer) was also studied. The results verified the feasibility to insert wire in multidirectional positions with tangential TIG process. However, was observed difficulty to overlap weld beads with tendency to generate discontinuities. Concerning melting rate, experiments verified that tangential TIG was 113% higher than conventional. The between process comparison, tangential TIG presented as a competitive version, although more studies need to be made. In conclusion, the experiments verified the versatility of tangential TIG to operate with different positions of wire insert and a competitive melting rate with good weld bead quality. In this context, this process has a great potential to raise the TIG process productivity.

**Keywords:** GTAW; Tangential Feed; Multidirectional; Mechanized TIG; Melting rate.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um sistema TIG com alimentação de arame frio (A) arame quente (B). Adaptado de (17). ...	34
Figura 2 - Esquemático da movimentação: Contínuo (a) oscilatório/dinâmico (b). Adaptado de (18).....	35
Figura 3 - Composição no cabeçote alimentador do sistema push-push TOPTIG (A) Composição na tocha do sistema push-push TOPTIG (B). .....	36
Figura 4 - Modelo de tocha TIG com sistema de alimentação convencional radial - (A) modelo de tocha TIG com sistema de alimentação tangencial (B).....	37
Figura 5 - Representação da diferença de acessibilidade entre a tocha com alimentação radial e tangencial. Adaptado de (20).....	38
Figura 6 - Representação da posição de entrada do arame em relação as isotermas de um arco TIG (DEP: 3 mm; I = 200 A). Adaptado de (23). .....	39
Figura 7 - Ilustração comparativa do ângulo de inserção do arame nos processos TIG com alimentação radial e TIG com alimentação tangencial. Adaptado de (24). ....	40
Figura 8 - Simulação da velocidade do fluxo plasma em relação ao eixo central do eletrodo. Adaptado de (25). ....	41
Figura 9 - Resultados de Delgado (A) e (B) Resultados de Pigozzo (C) e (D) quando o arame é alimentado por trás no processo TIG Convencional. Adaptado de (16,28).....	42
Figura 10 - Resultados da condição de alimentação frontal (A) e traseira (B) do processo TIG com inserção tangencial de arame. Adaptado de (29). ....	43
Figura 11 - Ilustração esquemática da relação entre os modos de transferência metálica e velocidade de arame no processo TIG. Adaptado de (20).....	44
Figura 12 - Registro fotográfico da transferência filamentar por meio de filmagem equipada com LASER (30). ....	45
Figura 13 - Influência da DEA na transferência metálica utilizando sistema com flexibilidade de ajuste. (A) 2,3 mm (B) 2,6 mm (C) 2,9 mm. Adaptado de (17).....	46
Figura 14 - Influência da DEP no ponto focal (ponto de inserção do arame em relação ao eixo central do eletrodo). Adaptado de (29). ....	46
Figura 15 - Configuração do sistema porta-eletrodo e representação esquemática dos parâmetros geométricos (DEA e DEP). ....	47

Figura 16 - Ilustração do comportamento dinâmico da tensão frente a dois modos de transferência metálica. Adaptado de (28).....	48
Figura 17 – Diferentes modos de ancoramento do arco de arco com a posição do arame em relação a poça; Quando o arame está fora da poça o arco ancora no metal de base (A) Quando o arame está em curto-circuito com a poça o arco ancora no arame (B). Adaptado de (17).....	48
Figura 18 - Comparação entre os níveis de velocidade de arame possível para diferentes comprimento de arco. Adaptado de (16). ....	49
Figura 19 – Esquemático das isoterms do arco elétrico TIG (A). Adaptado de (23); Curva gaussiana de representação da densidade de potência do arco frente a dois níveis de DEP (B). Adaptado de (33)....	50
Figura 20 – Vista de topo esquemática (adaptado de (35)) da poça de fusão com a representação das diferentes posições de inserção do arame no modo de alimentação tangencial (A) e perfil transversal e gradiente térmico da poça de fusão para a condição de arco estático em alumínio (B). Adaptado de (34). ....	51
Figura 21 – Representação de configuração de tocha plasma com alimentação de arame em dois ângulos de alimentação diferentes. Adaptado de (13).....	51
Figura 22 – Simulação numérica com vista de topo e vista transversal da poça de fusão em comportamento dinâmico com inserção de arame. Adaptado de (35).....	52
Figura 23 – Estrutura da bancada utilizada nos ensaios; Fonte de soldagem modelo TOPTIG 220 DC (A), IHM da fonte (B), Sistema de refrigeração externo (C), Sistema de controle do módulo de alimentação de arame (D), Robô antropomórfico modelo YASKAWA SIA10D (E), Tocha de soldagem TOPTIG (F), IHM do robô (G) e Cilindro de gás (H).....	55
Figura 24 –Módulo de potência e fonte de soldagem fabricante IMC utilizado na integração com o sistema comercial (I).....	56
Figura 25 – Configuração dos ângulos tangencial (A) e radial (B e C) utilizados para os experimentos. Indicação (círculo laranja) do ponto focal para cada configuração de ângulo. ....	57
Figura 26 – Sistema de aquisição portátil da fabricante IMC Soldagem. Adaptado de (39).....	58
Figura 27 – Ilustração esquemática das variáveis avaliadas. ....	61
Figura 28 – Bancada experimental utilizada para a execução dos ensaios de filmagem de alta velocidade. Interface de comunicação entre câmera de alta velocidade e computador (A), Câmera de alta velocidade (B), Corpo de prova (C) e Bancada (D). ....	62

Figura 29 Bancada experimental utilizada para a execução dos ensaios de filmagem térmica. Câmera térmica (A) Corpo de prova (B) Interface de comunicação câmera e computador (C). .....	63
Figura 30 – Esquemático da movimentação circular realizada pelo robô durante os ensaios, com o respectivo sentido de movimentação, início e fim da trajetória, além da posição relativa de inserção do arame.....	64
Figura 31 – Comparação entre tochas TIG fixadas no robô antropomórfico que utilizam diferentes ângulos de inserção de arame. Alimentação radial (A) Alimentação tangencial (B). Nota-se a impossibilidade de aplicação da tocha com alimentação radial no interior do chanfro por aspectos geométricos. (42). .....	65
Figura 32 – Bancada experimental para realização dos ensaios de aplicação industrial. Tocha de soldagem TOPTIG (A), Misturador de gás (B), Corpo de prova (C), Sistema de fixação do corpo de prova (D) e Mesa rotativa (E). .....	66
Figura 33 – Esquemático da seção transversal do corpo de prova, assim como a sequência dos passes utilizados na primeira etapa dos ensaios.	67
Figura 34 – Configuração da tocha (20° empurrando) para aplicação na fase 3 dos ensaios de aplicação no corpo de prova real. ....	68
Figura 35 – Equipamento utilizado no ensaio não destrutivo de raio X. Sistema de controle de parâmetros (A) Canhão de raio X (B) Soluções reveladoras de imagem (C) Negatoscópio para visualização das imagens (D). .....	70
Figura 36 – Gráfico operacional do equipamento de raio X para definição de intensidade e tempo de exposição de acordo com a espessura do corpo de prova.....	71
Figura 37 – Modelo 3D do sistema direcionador de arame, tal como seus respectivos ajustes (X, Y, Z, RY).....	73
Figura 38 – Tocha de soldagem MIG/MAG fabricante TBI Industries.	74
Figura 39 - Oscilograma de tensão relativo a regularidade desta variável no modo de alimentação frontal. ....	78
Figura 40 - Oscilograma de tensão relativo a regularidade desta variável no modo de alimentação traseira. ....	78
Figura 41 - Oscilograma de tensão relativo a regularidade desta variável no modo de alimentação frontal. ....	79
Figura 42 Cordões seguidos pelas respectivas seções transversais relativos a cada posição de inserção de arame no processo TIG com alimentação tangencial. ....	80

Figura 43 – Medições da seção transversal das amostras para as diferentes posições de inserção de arame no processo TIG com alimentação tangencial.....	81
Figura 44 – Frame da filmagem de alta velocidade referente aos diferentes ângulos de inserção de arame. Tangencial frontal (A) traseira (B) e lateral (C); radial frontal (D) e traseira (E). .....	82
Figura 45 – Gráfico comparativo das temperaturas em relação as posições de inserção de arame na filmagem térmica realizada no verso do corpo de prova (chapa de aço carbono SAE 1020). .....	84
Figura 46 – Termograma relativo a filmagem térmica realizada no verso do corpo de prova (chapa de aço carbono).....	85
Figura 47 – Resultados relativos a soldagem circular realizada sobre chapa na posição plana. Processo TIG com alimentação tangencial com movimentação alternada nos passes de sobreposição (A) TIG com alimentação tangencial sem movimentação alternada (B) TIG com alimentação radial com movimentação alternada (C). .....	86
Figura 48 – Resultado da execução do procedimento na etapa 1. Em destaque (setas amarelas) a dificuldade encontrada para a fusão do material junto aos bordos do chanfro. ....	88
Figura 49 – Esquemático de posicionamento do eixo central da tocha em relação ao bordo do chanfro. ....	89
Figura 50 – Chanfro após a execução dos passes de preenchimento junto ao flanco.....	89
Figura 51 – Chanfro após o procedimento de re-fusão (A), seguido pelo passe de preenchimento (B). ....	90
Figura 52 – Condição do chanfro após a execução dos passes de preenchimento nos bordos do chanfro (Etapa 3).....	91
Figura 53 – Corpo de prova após a execução da etapa 3 do procedimento de preenchimento do chanfro. ....	92
Figura 54 – Corpo de prova após a realizado da execução do procedimento não destrutivo por líquido penetrante.....	92
Figura 55 - Filme radiográfico do corpo de prova. ....	93
Figura 56 – Procedimento de sobreposição de passes na face do corpo de prova utilizando a movimentação do robô. As regiões indicadas referem-se a posição de inserção do arame. (1) Lateral; (2) Frontal; (3) Lateral; (4) Traseira. ....	94
Figura 57 – Passe de preenchimento realizado utilizando a rotação do robô no entorno da geometria do corpo de prova.....	95
Figura 58 – Ilustração de reposicionamento da tocha em função da proximidade da parede do chanfro e a região de passagem do arame (seta amarela). ....	96

Figura 59 – Desenho esquemático de tocha TIG com alimentação de arame utilizado por Delgado. Adaptado de (16). .....	97
Figura 60 – Comparação entres os processo TIG e MIG (Relação entre velocidade de arame/taxa de deposição e potência apresentada por Delgado). Adaptado de (16). .....	97
Figura 61 – Comparação dos processos TIG e MIG (Relação entre velocidade de arame/taxa de deposição e corrente média apresentada por Delgado). Adaptado de (16). .....	98
Figura 62 – Figura esquemática para dois níveis de DEP no processo TIG com alimentação tangencial e a posição de inserção do arame em relação ao eixo do eletrodo. ....	99
Figura 63 – Gráfico comparativo entre as velocidade de arame ótima em função da corrente média para dois níveis de DEP no processo TIG com alimentação tangencial. ....	99
Figura 64 - Gráfico comparativo entre as velocidades de arame ótima em função da potência média calculada para dois níveis de DEP no processo TIG com alimentação tangencial. ....	100
Figura 65 – Relação entre avanço de eletrodo e a distância eletrodo-arama (DEA). .....	101
Figura 66 – Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação tangencial com inserção frontal de arame. ....	103
Figura 67 – Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,4 m/min; 220 A – 2,4 m/min; 260A – 3,2 m/min; 300A – 4,0 m/min. ....	104
Figura 68 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,3 m/min; 220 A – 2,1 m/min; 260A – 3,0 m/min; 300A – 3,7 m/min. ....	106
Figura 69 – Ilustração a partir de frames de filmagem de alta velocidade a dinâmica da transferência metálica intermitente na alimentação frontal do processo TIG com alimentação tangencial. ....	107
Figura 70 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação tangencial com inserção traseira de arame. ....	107
Figura 71 – Indicação do posicionamento do arame em relação a poça de fusão na transferência metálica por ponte nas condições de inserção de arame na região frontal e traseira para o processo TIG com alimentação tangencial. ....	108
Figura 72 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação traseira (Transferência metálica em ponte) no processo TIG	

com alimentação tangencial; 180A – 2,8 m/min; 220 A – 3,9 m/min; 260A – 4,9 m/min; 300A – 5,8 m/min. ....	109
Figura 73 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação traseira (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,7 m/min; 220 A – 2,0 m/min; 260A – 3,1 m/min; 300A – 4,0 m/min. ....	110
Figura 74 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação tangencial com inserção lateral de arame.....	111
Figura 75 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação lateral (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,9 m/min; 220 A – 3,7 m/min; 260A – 4,0 m/min; 300A – 4,8 m/min. ....	112
Figura 76 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação lateral (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,4 m/min; 220 A – 1,7 m/min; 260A – 2,1 m/min; 300A – 2,9 m/min. ....	113
Figura 77 – Ilustração do deslocamento da poça de fusão ao lado oposto de inserção do arame quando ocorre inserção de arame lateral no processo TIG com alimentação tangencial. ....	114
Figura 78 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação radial (45°) com inserção frontal de arame. ....	115
Figura 79 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação radial (45°); 180A – 1,5 m/min; 220 A – 2,1 m/min; 260A – 2,6 m/min; 300A – 3,5 m/min. ....	116
Figura 80 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação radial (45°); 180A – 1,2 m/min; 220 A – 1,6 m/min; 260A – 2,2 m/min; 300A – 2,9 m/min. ....	117
Figura 81 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação radial (65°) com inserção frontal de arame. ....	118
Figura 82 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação radial (65°); 180A – 1,4 m/min; 220 A – 1,9 m/min; 260A – 2,4 m/min; 300A – 3,2 m/min. ....	119
Figura 83 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação radial (65°); 180A – 1,2 m/min; 220 A – 1,6 m/min; 260A – 2,2 m/min; 300A – 3,0 m/min. ....	120
Figura 84 – Comparativo entre as condições de inserção de arame tangencial e radialmente ao arco. ....	121

Figura 85 – Curva de corrente média pela velocidade de arame no processo MIG/MAG convencional. ....	122
Figura 86 – Comparativo entre processos no que concerne ao parâmetro de potência média; Condição de alimentação traseira no TIG com alimentação tangencial e alimentação frontal no TIG com alimentação radial (45°).....	122
Figura 87 - Comparativo entre processos no que concerne ao parâmetro de corrente média; Condição de alimentação traseira no TIG com alimentação tangencial e alimentação frontal no TIG com alimentação radial (45°).....	123



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem utilizados na etapa 1 .....	59
Tabela 2 - Condições de soldagem utilizados na etapa 1 .....	60
Tabela 3 – Setup da câmera de alta velocidade.....	62
Tabela 4 – Parâmetros e condições de soldagem definidos para a aplicação no corpo de prova real.....	67
Tabela 5 – Condições específicas de soldagem utilizados na etapa 2 dos ensaios de aplicação no corpo de prova real .....	68
Tabela 6 – Datasheet resumido do equipamento de Raio X utilizado...	70
Tabela 7 – Setup utilizado no equipamento de Raio X .....	71
Tabela 8 - Parâmetros e condições de soldagem .....	74
Tabela 9 – Parâmetros de soldagem para etapa de ensaios com processo MIG/MAG.....	75



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ISO – *International Standard Organization*  
PIB - Produto Interno Bruto  
TIG – *Tungsten Inert Gas*  
MIG/MAG – *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*  
CMT – *Cold Metal Transfer*  
DEP – Distância eletrodo-peça  
DEA – Distância arame-peça  
 $L_{\text{eletrodo}}$  – Avanço de eletrodo  
LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*  
IHM – Interface Homem-Máquina  
 $\alpha$  – Ângulo de molhamento  
SAP – Sistema de Aquisição Portátil  
END – Ensaio Não-Destrutivo  
LP – Líquido Penetrante  
STA – Sistema Tracionador de Arame  
 $T_{\text{MÁX}}$  – Temperatura Máxima  
 $V_a$  – Velocidade de arame  
P – Potência  
P & D – Pesquisa e Desenvolvimento



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....</b>	<b>31</b>
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	31
<b>2.1.1.</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>31</b>
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>33</b>
3.1.	TIG ALIMENTADO .....	33
<b>3.1.1.</b>	<b>Adição e técnicas de alimentação de arame.....</b>	<b>33</b>
3.1.1.1.	Cold Wire e Hot Wire .....	33
3.1.1.2.	Dinâmica de alimentação de arame .....	34
3.1.1.3.	Nível de automatização de alimentação de arame .....	35
3.1.1.4.	Ângulo de alimentação de arame .....	37
<b>3.1.2.</b>	<b>Influência do sentido de alimentação de arame .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1.3.</b>	<b>Transferência metálica e o estudo comparativo da taxa de fusão entre os processos TIG e MIG/MAG .....</b>	<b>43</b>
3.1.3.1.	Influências dos parâmetros geométricos do processo TIG sobre a transferência metálica .....	43
<b>3.1.4.</b>	<b>Aspectos de processo e a taxa de fusão.....</b>	<b>48</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>
4.1.	EQUIPAMENTOS .....	55
4.2.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	58
<b>4.2.1.</b>	<b>Procedimento experimental para o estudo da posição de alimentação de arame – frontal, traseira e lateral .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>Procedimentos experimentais da etapa 1: Ensaios na posição plana para avaliação da influência da posição de inserção de arame nos processos TIG com alimentação tangencial e radial.....</b>	<b>59</b>
4.2.2.1.	Grupo I: Análise macrográfica e avaliação das características geométricas .....	60
4.2.2.2.	Grupo II: Filmagem de alta velocidade.....	61
4.2.2.3.	Grupo III: Filmagem termográfica.....	62
4.2.2.4.	Grupo IV: Ensaios com sobreposição de cordões em geometria circular .....	63
4.2.2.5.	Grupo V: Ensaios de potencial aplicação de preenchimento de chanfro em corpo de prova real .....	65
<b>4.2.3.</b>	<b>Procedimento experimental para estudo comparativo da taxa de fusão do processo TIG com alimentação tangencial e radial .....</b>	<b>72</b>

<b>4.2.4.</b>	<b>Procedimentos experimentais da etapa 2: Ensaios utilizando o processo TIG com alimentação tangencial e radial e o processo MIG/MAG .....</b>	<b>72</b>
4.2.4.1.	Grupo VI: Avaliação da taxa de fusão no processo TIG com alimentação tangencial .....	75
4.2.4.2.	Grupo VII: Avaliação da taxa de fusão no processo TIG com alimentação radial.....	75
4.2.4.3.	Grupo VIII: Ensaios utilizando processo MIG/MAG em modo tensão e comparação da taxa de fusão com o processo TIG no modo de alimentação tangencial e radial.....	76
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>77</b>
5.1.	INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE ALIMENTAÇÃO NO PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO TANGENCIAL E RADIAL .....	77
5.1.1.	Ensaios de soldagem, análise macrográfica e avaliação das características geométricas dos cordões no processo TIG com alimentação tangencial.....	77
5.1.2.	Estudo do comportamento da inserção de arame nos processos TIG com alimentação tangencial e radial por meio de filmagem de alta velocidade.....	81
5.1.3.	Estudo do perfil térmico da poça de fusão por meio de filmagem térmica da peça .....	83
5.1.4.	Avaliação para aplicações em revestimento (soldagem circular) .....	85
5.1.5.	Verificação experimental em potencial peça real .....	87
5.2.	INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ALIMENTAÇÃO NA TAXA DE FUSÃO DO PROCESSO TIG E ANÁLISE COMPARATIVA COM O PROCESSO MIG/MAG.....	96
5.2.1.	Ensaios de soldagem, avaliação do perfil geométrico dos cordões e da taxa de fusão no processo TIG com alimentação tangencial.....	98
5.2.2.	Ensaios de soldagem, avaliação do perfil geométrico dos cordões e da taxa de fusão no processo TIG com alimentação radial .....	114
5.2.3.	Ensaios de soldagem processo MIG/MAG e comparação da taxa de fusão dos processos TIG e MIG/MAG.....	121
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>125</b>
6.1.	TRABALHOS FUTUROS .....	126
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>129</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as indústrias vêm concentrando cada vez mais suas atenções e esforços à qualidade. A concorrência existente numa economia de livre mercado torna a qualidade fator fundamental. Segundo a ISO 9000 (1), o conceito de qualidade está associado ao grau de aprovação das características do produto final de acordo com requisitos pré-estabelecidos. Assim, as indústrias, têm buscado melhorias na qualidade de seu produto final a partir do desenvolvimento e implementação de novas tecnologias que aprimorem todo o processo de manufatura desde a concepção até a geração do produto final. Treinamentos, workshops, metodologias de qualidade com grande difusão em empresas (2–4), tal como manufatura enxuta, participação em feiras com abordagem em tecnologias recentes, dentre outros são elementos fundamentais para que se torne possível que estas empresas alcancem o objetivo de sobreviver no mercado, a partir da garantia desta qualidade.

Em pesquisa elaborada pela *McKinsey Global Institute* (5), além destes meios supracitados, inclui-se a automatização dos processos como um fator fundamental. Além da qualidade, alia-se a esta, a produtividade. A automatização permite a diminuição de desperdícios, aumento da eficiência da produção e segurança operacional na medida em que o processo produtivo viabilize. Aspectos como custos, espaço, complexidade do processo podem inviabilizar.

No campo da indústria de fabricação por soldagem, por exemplo, a busca pela automatização dos processos permite uma maior competitividade. Segundo Lobo (6), a qualidade aliada à produtividade são fatores chave para a competitividade, fator este de grande preocupação para o setor produtivo. Alguns exemplos de automatização neste campo da indústria são: robotização, sistemas de sensoriamento a laser e de controle de altura de arco. Esta questão torna-se ainda mais relevante quando trazemos para a realidade nacional. A indústria de Petróleo e Gás a qual representa atualmente 12% do PIB nacional (7), por exemplo, no campo da soldagem de união em dutos, praticamente em sua totalidade é realizada de forma manual. Neste sentido, há uma grande dependência da habilidade do soldador, os quais trabalham muitas horas por dia, durante um longo prazo o que pode acarretar em inconsistências de repetibilidade, e consequente discontinuidades resultando em não aprovação do resultado final. Além disso, intrínseca baixa velocidade de soldagem e presença de tempos secundários. Por isso a automatização dos processos de soldagem tem sido recentemente

uma das principais buscas das indústrias do setor em questão. A PETROBRAS, maior empresa do setor na indústria nacional, investirá 82% do seu plano de negócios nos projetos de exploração e produção (8), meio no qual apresentam-se relevantes os estudos em soldagem, junto ao refino e à distribuição. Este investimento trata-se de grande incentivo para a continuidade das pesquisas e desenvolvimento no setor.

O Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA – inserido no contexto nacional da indústria de fabricação por soldagem, tem promovido estudos e desenvolvimentos, gerando inovações tecnológicas para o aumento da competitividade da tecnologia nacional. Entre os temas mais abordados, podem-se citar os setores de petróleo e gás - soldagem de união de dutos com sensoriamento laser e automatização da soldagem de componentes de árvore de natal - (9,10), setores de energia - revestimento de painel de caldeira (11)- naval (12) e agrícola (13). Vários são os tipos de processos de soldagem em tais aplicações industriais. Contudo, grande parte das pesquisas desenvolvidas concentram-se nos processos TIG e MIG/MAG. Estes processos distinguem-se de outros como *LASER* em questões relacionadas ao custo e a operacionalização deste tipo de procedimento em campo. Para aplicações de soldagem de união de dutos, por exemplo, são necessários sistemas os quais não sejam sensíveis a intempéries, robustez a ambientes hostis e acessibilidade da tocha de soldagem a locais com restrições espaciais são alguns exemplos. Desta forma, destacam-se os processos TIG e MIG/MAG principalmente.

Assim, tem-se uma rica literatura sobre os processos de fabricação por soldagem TIG e MIG/MAG. Em relação ao primeiro, se tem um processo de alta qualidade (resultado da diferenciada controlabilidade da poça metálica e fusão da junta, possibilitada pelo desacoplamento entre corrente de soldagem e taxa de alimentação de arame) e baixa produtividade. Ao segundo, um processo de alta produtividade e altos níveis de automatização, devido aos níveis de taxa de fusão alcançados e à característica central de alimentação de arame, tornando o processo multidirecional (no caso do TIG, o arame é inserido lateralmente, normalmente na configuração radial, com elevado ângulo entre arame e eletrodo, limitando a direção e o sentido de deslocamento relativo entre tocha e peça e aumentando o volume do sistema tocha mais direcionador de arame, reduzindo a acessibilidade em determinadas juntas).

Desta maneira, o que se tem visto hoje é a busca por melhorias nos aspectos relacionados a produtividade do processo TIG, no sentido de dotá-lo de produtividade (aumento da taxa de fusão) e versatilidade

para automação (acessibilidade da tocha e multidirecionalidade), somando-se ao seu grande potencial de qualidade. Sistemas como TIG com alimentação dinâmica (comercialmente conhecido como *TIPTIG*), configurações construtivas diferenciadas de tocha com superresfriamento do eletrodo para alta penetração (TIG Keyhole), sistema com movimentação longitudinal da tocha (*SWITCH BACK*), tocha com duplo eletrodo e sistema com adição de arame tangencialmente ao eletrodo (comercialmente conhecido como *TOPTIG*), objeto deste trabalho.

## **2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS**

O foco do trabalho em questão é o estudo de uma nova variante do processo TIG baseada em um conceito diferenciado de tocha com alimentação de arame embutida no bocal, isto é, alimentação em ângulos reduzidos entre eixo do eletrodo e eixo do arame, nomeado neste trabalho de alimentação tangencial.

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

- Visa-se caracterizar o processo e entender características que o diferenciem do processo TIG Convencional, que neste trabalho será tratado como alimentação radial. Além disso, posterior comparação em relação ao processo MIG/MAG Convencional.

#### **2.1.1. Objetivos específicos**

- Consolidar a infraestrutura (fonte de soldagem, sistema de alimentação e sistema robotizado) para aplicação e investigação do processo TIG com alimentação tangencial e consolidar a base para desenvolvimento contínuo (equipamento e tocha);
- Estudar os aspectos morfológicos do cordão e de estabilidade do processo na condição de alimentação tangencial;
- Identificar as diferenças entre alimentação tangencial e radial em relação a posição de entrada do arame na poça de fusão por meio de filmagem de alta velocidade;
- Verificar possíveis influências no gradiente térmico da peça em relação as diferentes posições de inserção no modo tangencial por meio de filmagem térmica;

- Avaliar e comparar as diferentes posições de inserção de arame nos processos TIG com alimentação radial e tangencial sob a condição de execução de procedimentos em soldagem circular;
- Apresentar potencialidades do processo TIG com alimentação tangencial frente a aplicação de revestimento com sobreposição de camadas em corpo de prova real;
- Avaliar a influência das condições de soldagem envolvidas no processo TIG com alimentação tangencial (distância eletrodo-peça e distância eletrodo-aramé) na variável velocidade de arame e na estabilidade da transferência metálica;
- Verificar a taxa de fusão no processo TIG com alimentação tangencial para as diferentes posições de inserção do arame na poça de fusão, identificar as respectivas limitações e apresentar as características geométricas dos cordões, além de executar comparações com a alimentação radial;
- Comparar sob o ponto de vista dos parâmetros de corrente e potência médias a taxa de fusão dos processos TIG com alimentação tangencial, radial e MIG/MAG.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. TIG ALIMENTADO

O processo TIG, do inglês, *Tungsten Inert Gas*, quando faz uso da alimentação de arame pode ser classificado de quatro formas, de acordo com a temperatura em que este é inserido na poça, quanto ao nível de automação da alimentação de arame, e mais recentemente novas tecnologias apresentando variações quanto ao tipo de alimentação (contínuo constante ou dinâmica) e também em relação ao ângulo em que este é alimentado (radial e tangencial). Cada variação tem aplicações e configurações distintas, buscando melhorar o desempenho do processo em aspectos específicos.

##### 3.1.1. Adição e técnicas de alimentação de arame

###### 3.1.1.1. Cold Wire e Hot Wire

Em relação à temperatura, quando o arame é alimentado à temperatura ambiente, atribui-se o nome de alimentação *coldwire*, do contrário, quando o arame é pré-aquecido antes de adentrar na poça de fusão, a alimentação denomina-se *hotwire*. Nesta técnica o arame é considerado parte de um circuito elétrico específico para seu aquecimento, uma vez que por ele também passa corrente elétrica (aquecimento por Efeito Joule), facilitando desta forma a sua fusão enquanto é depositado na poça. Trata-se de uma técnica bastante difundida na literatura, desenvolvida e patenteada na década de 60 (14). Utilizando esta técnica, mais tarde, Ueguri, s. et al (15) e Delgado, L. (16), estudaram e concluíram a respeito da possibilidade de aumentar a velocidade de arame em função do menor gradiente de temperatura entre material de base e de adição, o que permite também, um aumento na velocidade de soldagem. Apesar das vantagens citadas por estes autores em relação a técnica *hotwire*, surge recentemente no campo da soldagem TIG com alimentação de arame, uma técnica que faz uso de arame frio apresentando como principal característica o ângulo reduzido (20°) entre eletrodo e arame. Em função desta característica há um contato preliminar entre arco e arame, isto é, antes do metal de adição adentrar na poça sofre ação do arco elétrico. Este contato provê um pré-aquecimento no metal de adição. Este fato, tal como apresentado na técnica *hotwire* pode permitir um aumento na taxa de fusão. O escopo deste trabalho, contudo, restringiu-se ao estudo da técnica que faz uso de

alimentação de arame frio em ângulos reduzidos (nomeada alimentação tangencial). A Figura 1 ilustra uma o equipamento para alimentação *hotwire* (Figura 1A) e *coldwire* (Figura 1B).

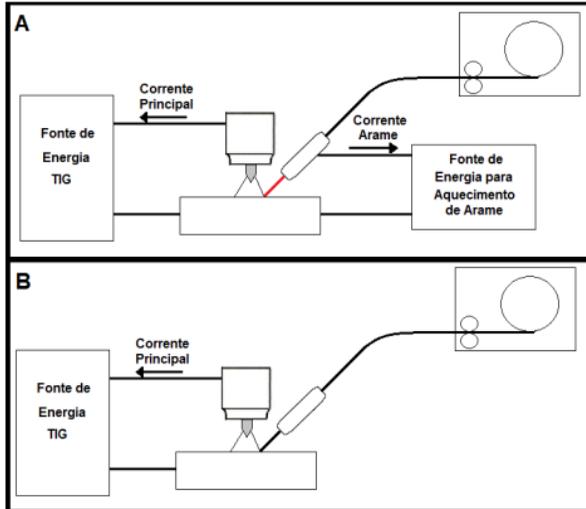


Figura 1 - Representação esquemática de um sistema TIG com alimentação de arame frio (A) arame quente (B). Adaptado de (17).

### 3.1.1.2. Dinâmica de alimentação de arame

Quanto ao dinamismo em que o arame é alimentado (contínuo constante ou oscilatório), novas tecnologias surgem com o intuito de conduzir o processo TIG a novos patamares de qualidade e produtividade (Figura 2).

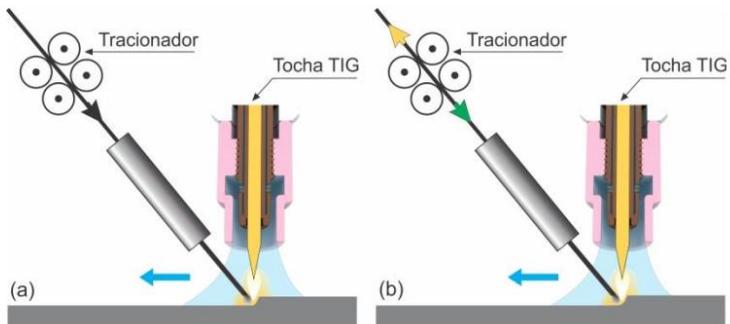


Figura 2 – Esquemático da movimentação: Contínuo (a) oscilatório/dinâmico (b). Adaptado de (18).

A Figura 2A ilustra o comportamento dos tracionadores de arame no modo de alimentação contínua constante, quando o arame se movimenta apenas em direção a poça de fusão. Este tipo de sistema consiste da maioria dos sistemas de alimentação utilizados para o processo TIG. A Figura 2B, trabalha uma nova modalidade de alimentação desenvolvida, em que o arame sofre uma vibração mecânica forçada pelo cabeçote alimentador, ou seja, uma alimentação oscilatória para frente e para trás. Segundo Wilson (19), este mecanismo quando utilizado em alta frequência (até 18 Hz) contribui para um aumento da velocidade de soldagem. Diferentes equipamentos no mercado fornecem este tipo de sistema, comercialmente conhecidos como TigSpeed, Tiptig e DabberTIG. O sistema Toptig também permite um movimento controlado do arame até a poça, neste caso, porém, os tracionadores não executam um movimento oscilatório, apenas retardam a velocidade de avanço. O escopo deste trabalho, contudo, se restringirá a abordagem contínua constante de alimentação.

### 3.1.1.3. Nível de automatização de alimentação de arame

Os tipos de operação, considerando níveis de automação da alimentação de arame para o processo TIG, estão divididos em dois grupos: a vareta (manual) ou por meio de um rolo de arame acoplado a um cabeçote alimentador (automático). Estes dois modos de inserção de arame estão diretamente relacionados com a possibilidade do aumento de produtividade. Quando o arame é adicionado manualmente por meio de varetas com um comprimento definido, o processo precisa ser

interrompido ao término do comprimento, além da limitação de velocidade e regularidade de velocidade. A interrupção para troca afeta diretamente a continuidade do processo, estabelecendo assim “tempo morto” na troca de varetas. Ademais o sucesso da soldagem é bastante dependente da habilidade do soldador.

Ao inserir um sistema com cabeçote alimentador o processo passa a ser alimentado com rolos de cerca de 15kg de arame (usualmente, no caso de aço). Este sistema permite a regulagem na velocidade de arame a partir da integração entre fonte e cabeçote alimentador, conferindo maior uniformidade e confiabilidade ao processo, aspectos de maior relevância quando se deseja desenvolver procedimentos com aplicações industriais.

Com a evolução dos sistemas de alimentação – da vareta aos cabeçotes alimentadores - existe a necessidade da existência de sistemas que garantam a velocidade de alimentação imposta. Desta forma, o sistema TIG com alimentação tangencial a fim de garantir esta confiabilidade dispõe de um sistema de alimentação denominado *push-push*. O dispositivo tracionador posicionado na tocha (Figura 3B) corresponde ao “mestre” e o tracionador no cabeçote (Figura 3A) ao “escravo”.

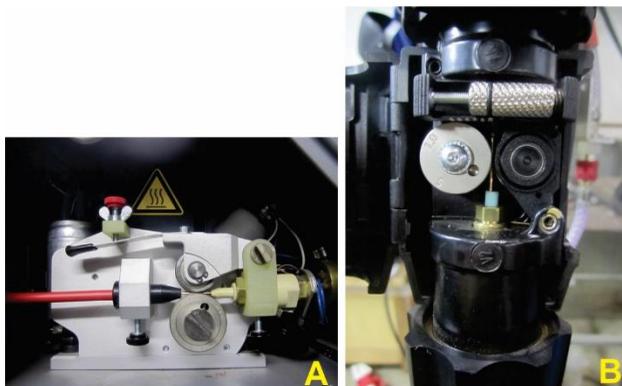


Figura 3 - Composição no cabeçote alimentador do sistema push-push TOPTIG (A) Composição na tocha do sistema push-push TOPTIG (B).

Configura-se um funcionamento diferente de outros sistemas existentes no mercado, nos quais comumente o tracionamento ocorre apenas no cabeçote alimentador. Este tipo, dependendo do comprimento do mangote ou mesmo o enrolamento deste, apresentará dificuldades em manter a velocidade de saída do arame na tocha. Paes (18) apresenta que

a partir de uma condição em que o mangote sofre dobramentos, a força necessária para o tracionamento do arame é exponencial. Desta forma, a afirmação traduz a importância de no caso do processo TIG alimentado, a presença de um sistema tracionador na tocha que auxilie na eficiência de entrega do arame na poça de fusão.

#### 3.1.1.4. Ângulo de alimentação de arame

Como resultado de desenvolvimentos recentes tem-se a abordagem de mudar o ângulo de alimentação de arame em relação ao eixo do eletrodo (Figura 4).

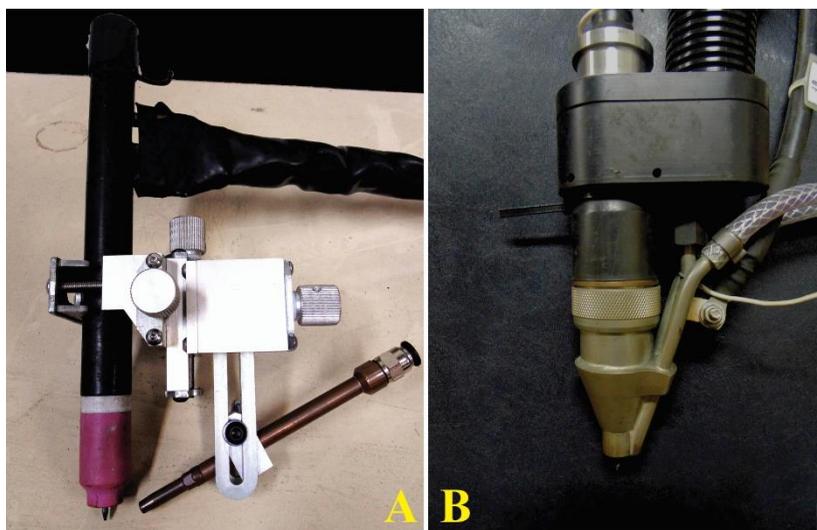


Figura 4 - Modelo de tocha TIG com sistema de alimentação convencional radial (A) modelo de tocha TIG com sistema de alimentação tangencial (B).

O fabricante do sistema indicado na Figura 4B em que o arame é alimentado com ângulos reduzidos (a ser chamado neste trabalho de alimentação tangencial) aponta como vantagens da técnica o fato do sistema de alimentação acoplado ao bocal permitir a acessibilidade em geometrias complexas e incidência do arame em uma região de maior temperatura do arco (20). A Figura 5 ilustra as vantagens de um sistema com dispositivo alimentador integrado em relação ao modo convencional, garantindo desta forma, maior acessibilidade e garantia de operacionalidade em regiões de maior complexidade.

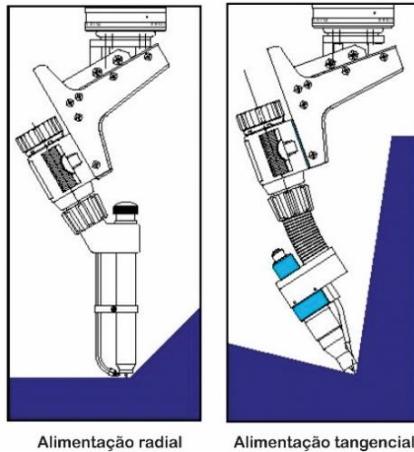


Figura 5 - Representação da diferença de acessibilidade entre a tocha com alimentação radial e tangencial. Adaptado de (20).

Em relação à região de injeção de arame no arco, ensaios realizados utilizando espectrometria ótica ((21) apud (22)) mostraram que o arco voltaico TIG pode atingir 20000 K próximo ao eletrodo de tungstênio, para uma corrente de soldagem de 200 A. Recentemente Spille-Kohoff (23), chegou a resultados semelhantes, contudo, por meio de simulações numéricas. A simulação numérica ilustrada na Figura 6 traz consigo a abordagem de que quanto menor o ângulo entre o eixo do eletrodo e o eixo do arame será possível manter maior extensão do arame em contato com as isotermas de maior temperatura do arco.

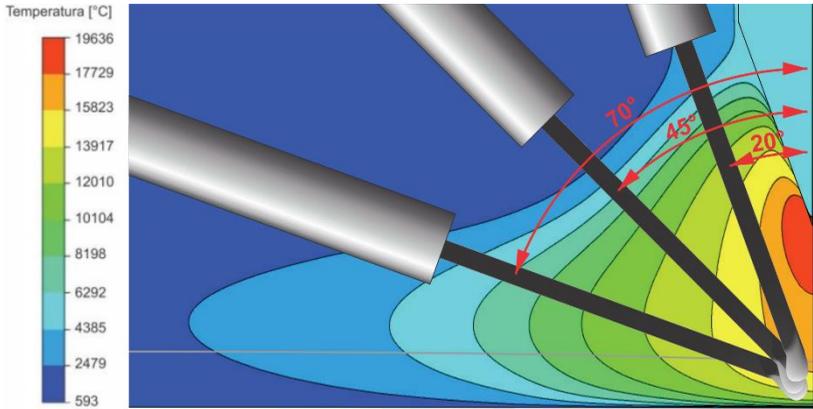


Figura 6 - Representação da posição de entrada do arame em relação as isotermas de um arco TIG (DEP: 3 mm; I = 200 A). Adaptado de (23).

Desta forma, o fator principal diz respeito ao resultante desvio do arco para o arame devido ao ancoramento anódico do arco sobre o arame, numa região mais acima do mesmo. Isto confere, além de mais eficiência de fusão do arame por aquecimento anódico, também em maior comprimento do arame sendo percorrido por corrente e gerando aquecimento resistivo, como ilustra material técnico-comercial de um dos fabricantes deste tipo de sistema (Figura 7).

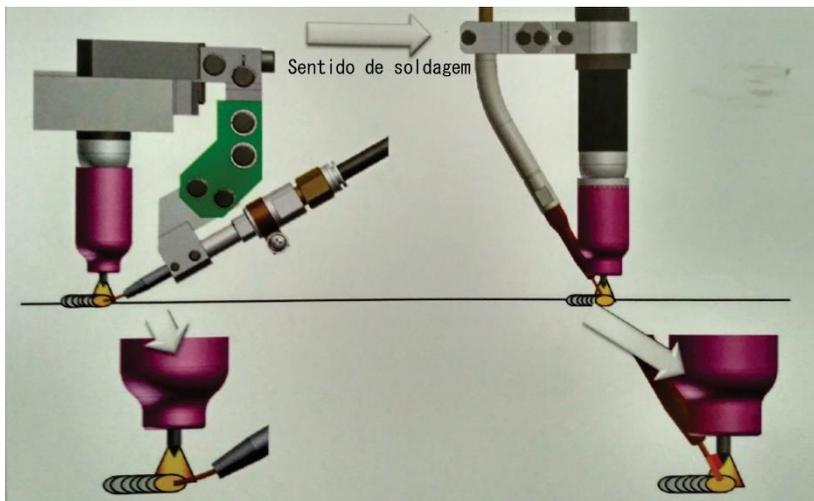


Figura 7 – Ilustração comparativa do ângulo de inserção do arame nos processos TIG com alimentação radial e TIG com alimentação tangencial. Adaptado de (24).

Outro aspecto importante, quando se fala a respeito do gradiente de temperatura é abordado na literatura por Lancaster (22). Este autor afirma que o gradiente de temperatura nas regiões próximas ao ânodo está na ordem de  $10^3$  K/mm (Kelvin/milímetro). Associa-se assim a alimentação tangencial em que devido à proximidade entre arame eletrodo, tal como ilustrado na Figura 7, provê um ancoramento do arco no arame, a fim de contribuir na taxa de fusão do processo em relação a modalidade convencional (alimentação radial).

Além das isothermas um aspecto essencial condiz ao fluxo plasma. Yin et al (25) em estudo a partir de simulação numérica e avaliação experimental modelou o perfil de velocidade e intensidade do fluxo plasma em um arco elétrico TIG. A Figura 8 ilustra o resultado deste trabalho. Na região próxima ao eixo vertical do eletrodo o plasma flui diretamente do cátodo (eletrodo não consumível) ao ânodo (substrato), e a maior velocidade e pressão do arco é encontrada neste meio. Este autor, contudo, não apresenta os parâmetros elétricos utilizados para este experimento, é possível apenas inferir a partir dos eixos a utilização de uma distância eletrodo-peça (DEP) de 3 mm.

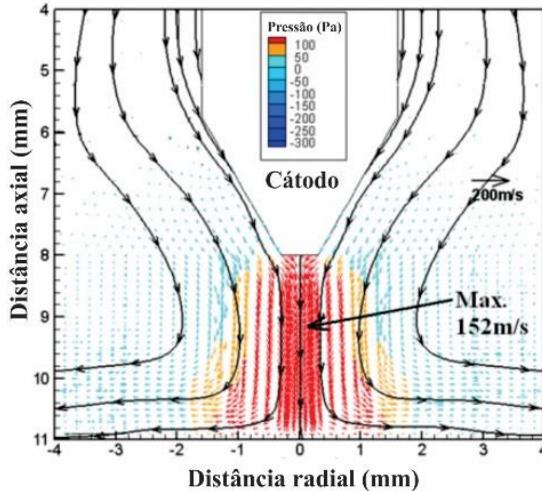


Figura 8 – Simulação da velocidade do fluxo plasma em relação ao eixo central do eletrodo. Adaptado de (25).

Quando o arame é adicionado tangencialmente ao eletrodo de forma a apresentar maior contato de material de adição com isotermas de maior temperatura do arco, também estabelece contato com regiões de maior intensidade de fluxo plasma. Desta forma, esta região transfere energia de forma mais intensa ao material de adição, afim de contribuir desta forma, para uma maior taxa de fusão no processo com alimentação tangencial. Há um forte apelo do fabricante (20) com relação ao aumento na taxa de fusão de arame em relação a sistemas que empregam a abordagem convencional, isto é, quando é adicionado radialmente. O aumento da taxa de fusão permite que o processo opere em velocidades de soldagem mais elevadas, atingindo patamares de produtividade semelhantes ao processo MIG (20). O estudo desenvolvido por Vergara (26) demonstra que o processo TIG com alimentação tangencial se equiparou a resultados alcançáveis com o MIG/MAG no que concerne à taxa de deposição de arame. Delgado (16), por sua vez, por meio de uma metodologia de comparação, mostrou que a partir da escolha adequada de parâmetros no processo TIG Convencional, é possível alcançar patamares de taxa de fusão semelhantes ao processo MIG/MAG quando é estabelecido paralelo entre os parâmetros de potência. Além desses, Menezes (27) apresenta um comparativo entre os processos TIG em sua modalidade convencional e com alimentação tangencial. Conclui a respeito de aspectos como diluição em que o processo de alimentação

tangencial apresentou melhores resultados. No entanto, não discute a respeito de parâmetros de processos fundamentais (posição de inserção de arame, distância eletrodo-arama, distância eletrodo-peça), a serem abordados mais profundamente neste trabalho.

### 3.1.2. Influência do sentido de alimentação de arame

Um importante aspecto quando se trata do processo TIG com alimentação de arame, diz respeito à posição em que o arame é inserido na poça em relação ao sentido de movimentação relativa eletrodo-peça. Estudos desenvolvidos por Delgado (16) e Pigozzo (28) revelaram resultados importantes a respeito deste posicionamento.

Quanto ao melhor posicionamento do arame em relação ao arco Delgado (16) alega que para a realização de procedimentos com arame sem pré-aquecimento (*coldwire*), recomenda-se que o arame seja alimentado pela frente do arco elétrico. Segundo o mesmo autor, a alimentação por trás do arco gera uma perturbação na poça de fusão dando origem a descontinuidades, além de prejudicar também o limite operacional do processo, impossibilitando maiores velocidades de arame. A Figura 9 ilustra resultados de descontinuidades decorridas da utilização de alimentação traseira, na condição de alimentação radial.

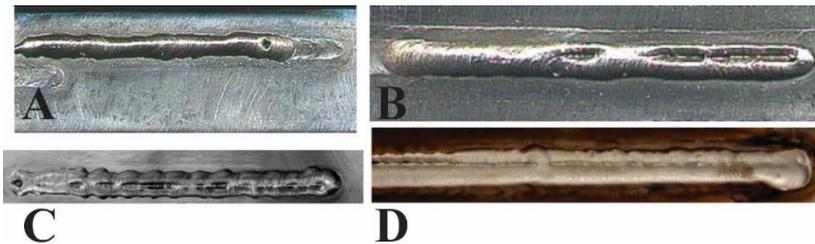


Figura 9 –Resultados de Delgado (A) e (B) Resultados de Pigozzo (C) e (D) quando o arame é alimentado por trás no processo TIG Convencional. Adaptado de (16,28).

Apesar dos resultados apresentados, quando o arame é alimentado tangencialmente, recomenda-se a inserção de arame por trás do arco. Esta recomendação está relacionada à região da poça em que o arame adentra. Direne (29) constatou que a partir das condições impostas há maior flexibilidade para o ângulo tangencial de inserção de arame. (Figura 10 – A: Frontal – B: Traseira).

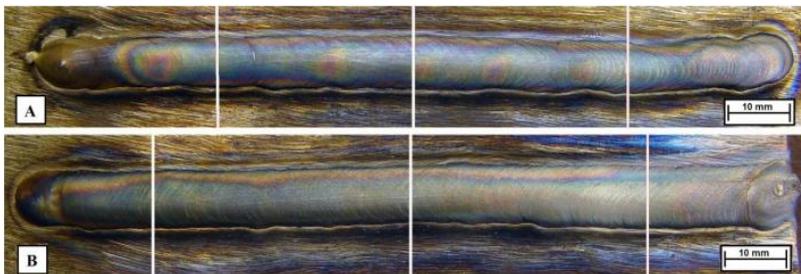


Figura 10 - Resultados da condição de alimentação frontal (A) e traseira (B) do processo TIG com inserção tangencial de arame. Adaptado de (29).

### 3.1.3. Transferência metálica e o estudo comparativo da taxa de fusão entre os processos TIG e MIG/MAG

#### 3.1.3.1. Influências dos parâmetros geométricos do processo TIG sobre a transferência metálica

No processo TIG alimentado as variáveis distância eletrodo-peça (DEP), ângulo de alimentação, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação são fundamentais para definir a transferência metálica. Neste sentido, a Figura 11, proposta pelo fabricante da técnica com alimentação tangencial apresenta a relação existente entre a velocidade de arame empregada e o tipo de transferência metálica.

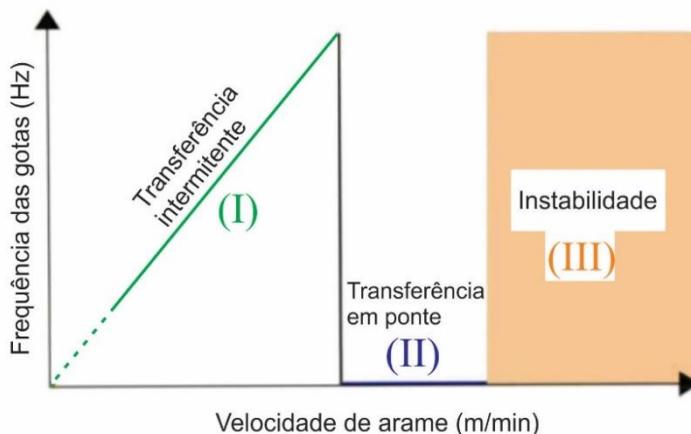


Figura 11 - Ilustração esquemática da relação entre os modos de transferência metálica e velocidade de arame no processo TIG. Adaptado de (20).

Na região I, à medida que incrementos na velocidade de arame são realizados dá-se o início a transferência (linha verde contínua). Esta transferência apresenta uma taxa de deposição baseada na frequência dos acontecimentos. A partir de uma determinada velocidade de arame a transferência metálica não apresenta mais frequência de deposição de gotas (de forma intermitente), pois a ponta do arame passa a se encontrar completamente dentro da poça de fusão, caracterizando uma transferência metálica em ponte (linha azul contínua). A região pertencente a linha tracejada verde (quantidade insuficiente de arame) e a região III (excesso de alimentação de arame) representam regiões de instabilidade. Inserido nesta discussão, Oliveira (30) apresenta a existência de um modo de transferência metálica conhecido como “transferência filamentar” em ensaios realizados com o processo plasma com adição de arame. A Figura 12 ilustra a característica deste tipo de transferência.

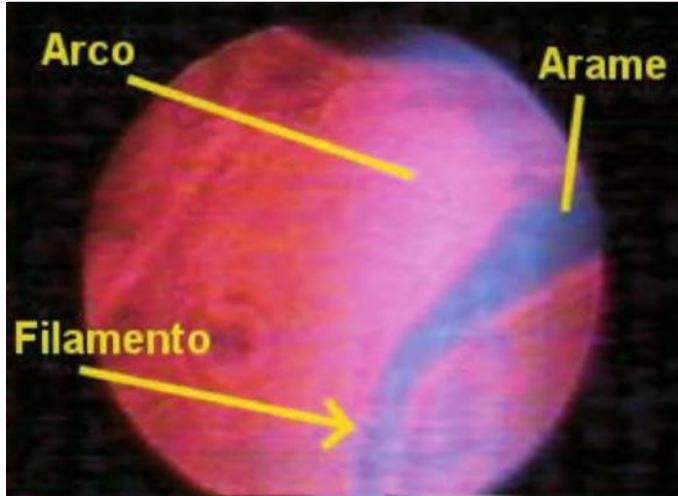


Figura 12 – Registro fotográfico da transferência filamentar por meio de filmagem equipada com LASER (30).

Este tipo de transferência ocorre a medida que se atinge uma velocidade ótima de operação, segundo Oliveira (30), trata-se de uma condição caracterizada por excelente nível de estabilidade, que sofre pouca influência da distância entre a tocha e a peça. Este autor define este tipo de transferência como um escoamento contínuo de metal líquido entre a ponta do arame e a poça de fusão.

Mais recentemente, em função de estudos mais específicos envolvendo parâmetros geométricos, revelou-se a grande importância da definição do parâmetro distância eletrodo-arame (DEA). É importante ressaltar que para situações específicas esta variável pode ter maior ou menor facilidade de manipulação. Sistemas específicos, tal como desenvolvido por Riffel (31) garantem esta flexibilidade de ajustes tanto no ângulo de alimentação quanto na distância entre eletrodo arame. Contudo para o conceito de alimentação anexo ao bocal proposto por Borne (32) a liberdade de ajustes é reduzida. Estes sistemas estão ilustrados na Figura 4. Estudo realizado por Nunes (17) com a técnica TIG com alimentação radial ( $45^\circ$ ), apresenta a influência do parâmetro DEA – sob uma DEP fixa – no modo de transferência metálica. (Figura 13).

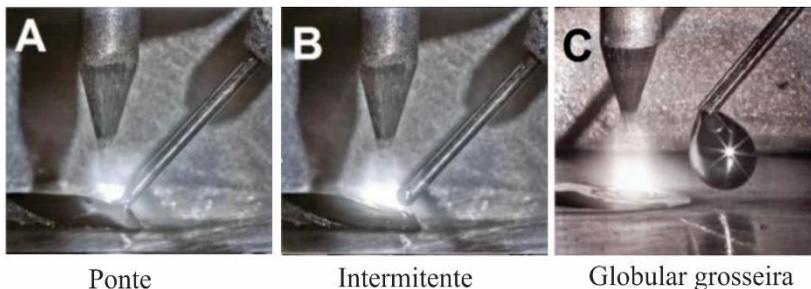


Figura 13 - Influência da DEA na transferência metálica utilizando sistema com flexibilidade de ajuste. (A) 2,3 mm (B) 2,6 mm (C) 2,9 mm. Adaptado de (17).

Analogamente, neste caso sob a perspectiva da variável DEP, Direne (29) apresenta a influência desta variável sobre a posição de entrada do arame na poça de fusão. Esta variável influencia diretamente no parâmetro ponto focal, isto é, o ponto de encontro entre a linha imaginária do eixo do eletrodo e o eixo do arame. De acordo com a Figura 14 nota-se que quanto maior a DEP, este ponto focal se posiciona mais próximo a superfície do metal de base. O ponto focal consiste no vértice de encontro do eixo central do eletrodo com o primeiro ponto de contato com o arame. Esta condição, tal como ilustrado abaixo, reflete em termos de maior ou menor comprimento de arame em contato direto com o arco.

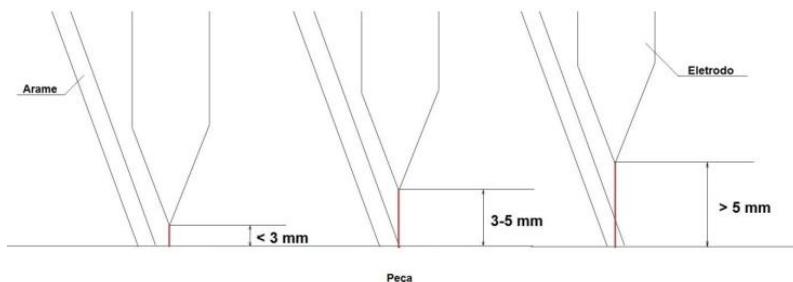


Figura 14 - Influência da DEP no ponto focal (ponto de inserção do arame em relação ao eixo central do eletrodo). Adaptado de (29).

Neste trabalho, a variável DEA é dependente do parâmetro chamado avanço de eletrodo ( $L_{\text{eletrodo}}$ ) devido à rigidez do sistema quanto a realização dos ajustes (32) durante as operações de soldagem. Este ponto torna-se uma desvantagem do dispositivo, principalmente quando se trabalha com pesquisa pois o objetivo é explorar ao máximo

as características inerentes de um dispositivo alimentador (ângulo de alimentação, DEA, ponto focal).

A Figura 15 ilustra o dispositivo pinça (A), porta-pinça (B) e eletrodo (C). O parâmetro  $L_{\text{eletrodo}}$  é que determina a distância eletrodo-arama. Segundo o fabricante do sistema *TOPTIG* a variável DEA não deve exceder 1,5 vezes o diâmetro do arame utilizado.

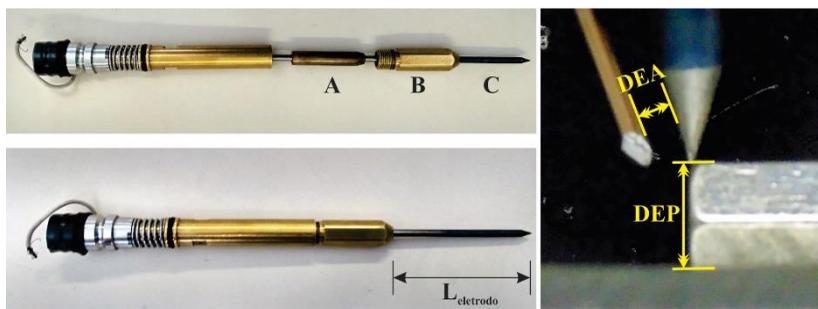
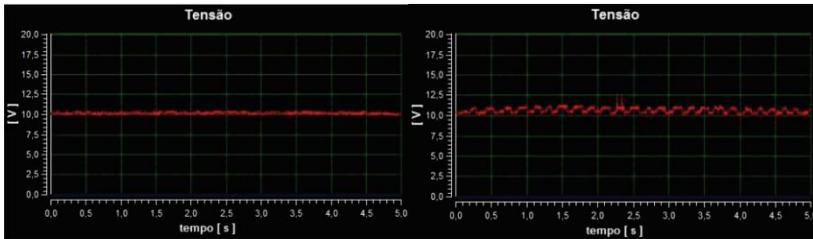


Figura 15 - Configuração do sistema porta-eletrodo e representação esquemática dos parâmetros geométricos (DEA e DEP).

A partir do entendimento das condições e parâmetros de soldagem, torna-se possível a análise do comportamento dinâmico das variáveis elétricas do processo. Delgado (16), num estudo de caracterização de soldagem TIG com alimentação de arame utilizou o critério de medições da tensão entre eletrodo-peça. Em outro estudo, Oliveira (30), no intuito de caracterizar o modo de transferência metálica em uma determinada faixa de corrente para a soldagem Plasma com adição de arame utilizou as medições de tensão arame-peça como critério de definição de velocidade de arame ótima. Posteriormente Pigozzo (28) realizou um estudo identificando as diferenças no comportamento dinâmico da tensão do arco para os dois modos de transferência metálica, transferência metálica em ponte e transferência intermitente. Esta última pode ser notada por meio do som emitido; observada a olho “nu” durante a execução do procedimento; e via oscilograma de tensão no sistema de aquisição. A intermitência da transferência é observada nos gráficos de tensão por meio de pulsos e vales, à medida que os destacamentos ocorrem. Os vales estão associados ao momento em que o arame está em contato com a poça e os pulsos quando ocorre o destacamento. A estabilidade da transferência intermitente é representada pela uniformidade dos períodos de pulsos e vales (17). A Figura 16 apresenta os respectivos formatos de onda relacionados a transferência metálica em ponte e intermitente.



Transferência contínua ou ponte

Transferência intermitente

Figura 16 - Ilustração do comportamento dinâmico da tensão frente a dois modos de transferência metálica. Adaptado de (28).

Pigozzo (28) ressalta que, para transferência metálica contínua em ponte, o que se observa é o ancoramento do arco tanto no arame quanto na poça de fusão, e quando há o rompimento da continuidade entre arame e poça (transferência intermitente) o arco deixa de acoplar-se no arame, direcionando-se à poça alterando o seu comprimento. Nunes (17) por meio da técnica de filmagem de alta velocidade, ilustra mais claramente o fenômeno, como mostra a Figura 17 (nota-se que o ângulo arame-eletrodo é pouco acentuado, cerca de  $45^\circ$ , diferentemente da configuração mais usual, na qual o ângulo é próximo de  $90^\circ$ ).

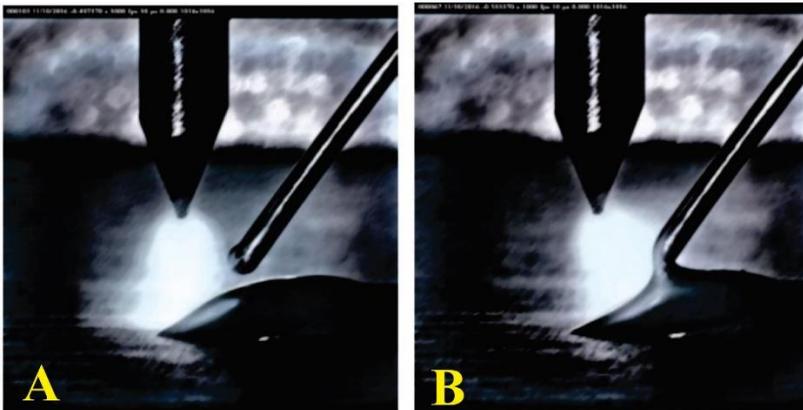


Figura 17 – Diferentes modos de ancoramento do arco de arco com a posição do arame em relação a poça; quando o arame está fora da poça o arco ancora no metal de base (A) Quando o arame está em curto-circuito com a poça o arco ancora no arame (B). Adaptado de (17).

### 3.1.4. Aspectos de processo e a taxa de fusão

Delgado (16), com o intuito de fundamentar a capacidade de fusão do processo TIG apresenta a influência da DEP sobre a potência e velocidade de arame. É comum associar o aumento da DEP, conseqüentemente aumenta-se a potência do arco, à possibilidade acréscimo na velocidade de arame. No entanto, este estudo defende que a influência da potência sobre a taxa de fusão é fundamental, em detrimento da DEP. Este experimento é justificado pela Figura 18 em que se observa a faixa intermediária que consiste em duas curvas de mesma potência, estas fundem a mesma quantidade de arame para os dois níveis de DEP.

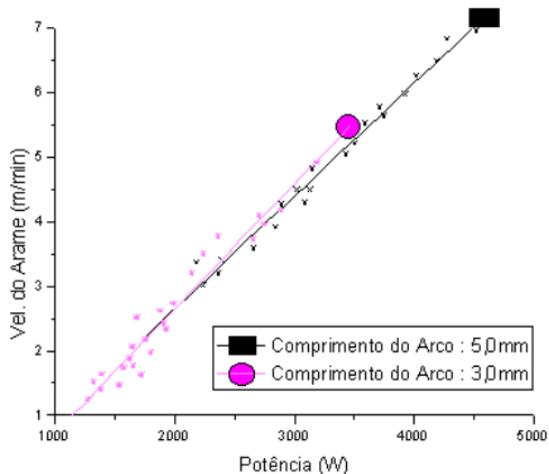


Figura 18 - Comparação entre os níveis de velocidade de arame possível para diferentes comprimento de arco. Adaptado de (16).

Neste sentido, Shipilov (33) também discute a respeito da fusão de arame baseado na energia do arco em função da DEP (Potência 2000 W; Velocidade de arame: 1,2 m/min; DEP: 3 e 5 mm). Este autor, refere-se às regiões “mais quentes” do arco em forma de curvas gaussianas, em que o pico destas curvas é designado como a região mais próxima à extremidade do eletrodo. A Figura 19A apresenta as curvas isotermas de um arco TIG e a Figura 19B a influência da DEP sobre a potência do arco por unidade de área.

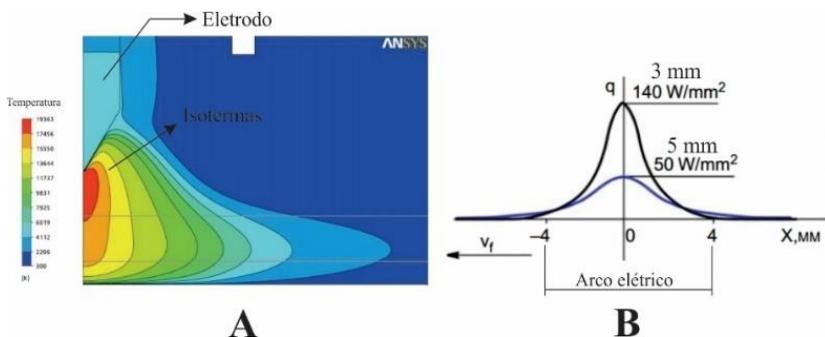


Figura 19 – Esquemático das isoterms do arco elétrico TIG (A). Adaptado de (23); Curva gaussiana de representação da densidade de potência do arco frente a dois níveis de DEP (B). Adaptado de (33).

Por meio das curvas de densidade de potência o respectivo autor ilustra haver uma diferença significativa quando se altera a distância entre eletrodo-arame sugerindo discrepância, em essência do que foi encontrado por Delgado, pois uma maior densidade de potência tenderia em acarretar maior taxa de fusão. Desta forma, se justifica o estudo de outros aspectos que possam influir na capacidade de fusão do processo, por exemplo, é possível avaliar a região da poça em que o arame adentra.

A Figura 20 ilustra diferentes regiões de inserção do arame. As regiões (1), (2) e (3) relativa a figura 20A consistem das posições frontal, traseira e lateral, respectivamente. Observa-se também que cada região de inserção consiste de diferentes níveis de temperatura, e este aspecto pode servir como suporte a fusão de material de adição. Tsai e Kou (34) reportam a partir de simulações numéricas para alumínio e arco estático a respeito dos efeitos na poça de fusão. A partir das propriedades físicas dos materiais, formulações matemáticas e simulações numéricas propõe-se um modelo de poça de fusão (figura 20B).

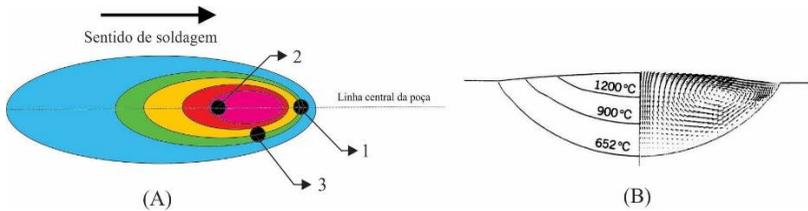


Figura 20 – Vista de topo esquemática (adaptado de (35)) da poça de fusão com a representação das diferentes posições de inserção do arame no modo de alimentação tangencial (A) e perfil transversal e gradiente térmico da poça de fusão para a condição de arco estático em alumínio (B). Adaptado de (34).

Ainda neste sentido, Bonarcorso (36) em trabalho a respeito da aplicação do processo plasma com alimentação de arame na posição sobre cabeça reporta sobre a importância do correto ajuste de injeção de arame diretamente na poça, sob o risco de ocorrer respingos, salpicos, com conseqüente contaminação da tocha e interrupção do processo. Além disso, é importante salientar que devido à posição sobre cabeça os efeitos da gravidade dificultam a manutenção de uma poça estável que não escorra. Em função disso, o respectivo autor propôs a correção do ângulo de inserção de arame ( $70^\circ$  para  $30^\circ$ ) de forma a tornar o processo mais robusto, com uma poça mais consistente de forma a se sustentar na posição sobre cabeça e também aumentar a taxa de fusão de material. A Figura 21 apresenta a proposta feita pelo autor citado para alteração do ângulo de adição de arame.

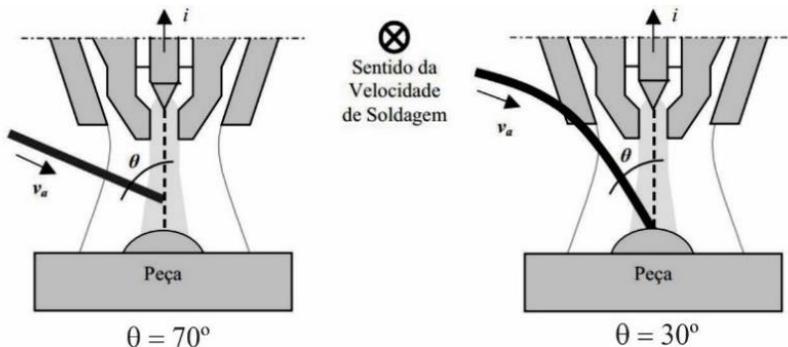


Figura 21 – Representação de configuração de tocha plasma com alimentação de arame em dois ângulos de alimentação diferentes. Adaptado de (13).

Traidia (35) também investigou mediante simulações numéricas (Figura 22) a influência da alimentação de arame na poça de fusão. O

corte longitudinal (1-1) ilustra a profundidade alcançada pela região frontal da poça e a região traseira da poça de fusão. E o corte transversal (2-1) a região lateral da poça de fusão. O comportamento da poça de fusão apresentado por este autor – corte 1-1 – ilustra a diferença no deslocamento da poça de fusão. Este é um indicativo para o processo TIG com alimentação tangencial apresentar melhor operacionalidade quando a inserção de arame é realizada na região traseira da poça. Aliando o gradiente térmico da poça de fusão (região traseira) ilustrado na Figura 20A com o volume da poça também nesta região, estes aspectos consistem grandes indicativos para uma maior fusão de material quando inserido o arame na região traseira.

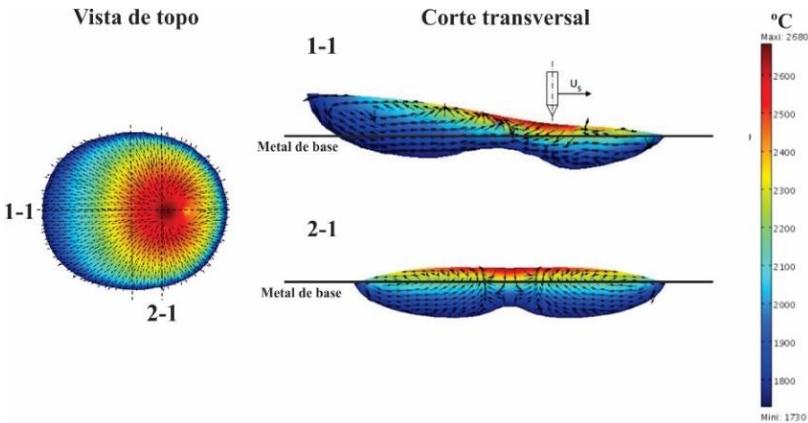


Figura 22 – Simulação numérica com vista de topo e vista transversal da poça de fusão em comportamento dinâmico com inserção de arame. Adaptado de (35).

Posto isso, muitas são as tentativas de se associar ao processo TIG alimentado ao termo alta produtividade. Os parâmetros, corrente média de soldagem e potência média são utilizados para buscar as comparações com o processo MIG/MAG, processo de maior produtividade e reconhecidamente de maior utilização na indústria devido a sua robustez. Schwedersky (37) em seu trabalho apresenta aplicação da soldagem TIG de chapas estampadas para manufatura de compressores. Os testes foram realizados com o objetivo de apresentar uma solução alternativa ao MIG/MAG e de alta produtividade. Ao fim do trabalho, o autor concluiu ser possível atingir patamares, inclusive superar em algumas ocasiões os níveis de velocidade de soldagem. Além disso, uma vantagem significativa estava relacionada a utilização

do processo TIG em sua modalidade autógena. Delgado (16), a partir de outra metodologia de comparação em sua discussão a respeito do processo TIG com alimentação de arame frio mostra que a partir da comparação entre potências é possível equiparar a taxa de fusão dos processos TIG e MIG até uma determinada faixa de operação (até aproximadamente 300 A). Vergara (26) apresenta resultados a respeito da taxa de deposição do processo TIG em sua modalidade convencional e com alimentação tangencial em relação ao processo MIG/MAG. A mudança na configuração convencional ao tangencial representou um ganho de 100% na velocidade de arame, e a desvantagem do processo TIG em relação ao MIG neste aspecto foi reduzida de 60 para 20%. Entretanto, muitos outros são os aspectos levados em consideração para avaliar a produtividade de um processo; “tempo morto”, tempo de operação, velocidade de soldagem, dimensão da solda, fatores estes propostos por Paes (18), na comparação entre soldagem TIG e MIG/MAG em aplicação de passe de raiz. Ao comparar aos resultados de Sartori (38) a respeito da produtividade do processo TIG e MIG/MAG, Paes conclui que a utilização da técnica em alimentação dinâmica em relação a contínua, a primeira representa um aperfeiçoamento no processo TIG. Diante destes critérios mencionados ao utilizar a técnica de alimentação dinâmica o autor obteve ganho significativo no comparativo de velocidade de soldagem e principalmente a quantidade de material depositado.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. EQUIPAMENTOS

Este item apresenta uma visão geral dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Aspectos mais pertinentes as etapas de ensaios serão apresentadas posteriormente. A Figura 23 ilustra a bancada de ensaios utilizada.

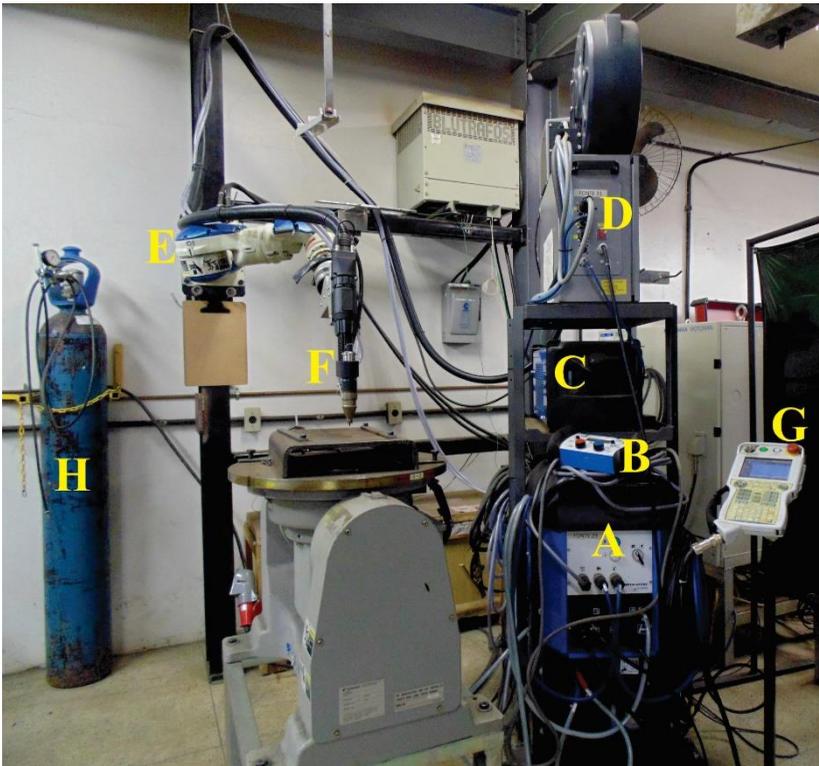


Figura 23 – Estrutura da bancada utilizada nos ensaios; Fonte de soldagem modelo TOPTIG 220 DC (A), IHM da fonte (B), Sistema de refrigeração externo (C), Sistema de controle do módulo de alimentação de arame (D), Robô antropomórfico modelo YASKAWA SIA10D (E), Tocha de soldagem TOPTIG (F), IHM do robô (G) e Cilindro de gás (H).

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma fonte de soldagem da fabricante *Air Liquide* modelo *TOPTIG 220 DC* (A). Esta

fonte possui integração com um controle remoto (B), sistema de refrigeração (C) com fluido específico tipo *FREEZCOOL* para o bocal e a tocha, cabeçote de alimentação modelo *DIX WD 300* (D) com velocidade máxima de alimentação de arame de 10 m/min e com o robô antropomórfico de 7 eixos utilizado modelo *MOTOMAN YASKAWA SIA 10D* (E). Ao robô foi conectada a tocha utilizada durante os ensaios, modelo *TOPTIG* (F), além de um cilindro de gás (G) com vazão de gás regulada no bocal da tocha em 15 L/min. Foi utilizado um eletrodo de tungstênio com 3,2 mm de diâmetro dopado com 2% de óxido de Cério, designado AWS EWCe-2, afiação de 40°, e o gás de processo utilizado foi Argônio puro (99,99%) fabricante *Air Liquide*. O metal de adição de aço carbono com denominação AWS ER 70S-6 e 1,2 mm de diâmetro. A partir da necessidade de expansão da capacidade de corrente da fonte de soldagem, foi projetada e executada a integração de uma fonte e módulo de potência em paralelo com o sistema comercial, que pode ser visto na letra I da Figura 24. A partir desta intervenção no sistema, se tornou possível o alcance de uma corrente máxima de 520 A, expandindo a flexibilidade e versatilidade da infraestrutura, para uma maior gama de aplicações.



Figura 24 –Módulo de potência e fonte de soldagem fabricante IMC utilizado na integração com o sistema comercial (I).

A configuração de tocha para a realização dos ensaios segue na Figura 25. Assim como indicado na Figura 25A (alimentação tangencial), o círculo laranja representa o ponto focal nas Figuras 25B e 25C (alimentação radial). Estas foram ajustadas de forma que o arame fosse direcionado diretamente a poça de fusão. A DEP utilizada foi ajustada com um gabarito com a dimensão determinada (6 mm).

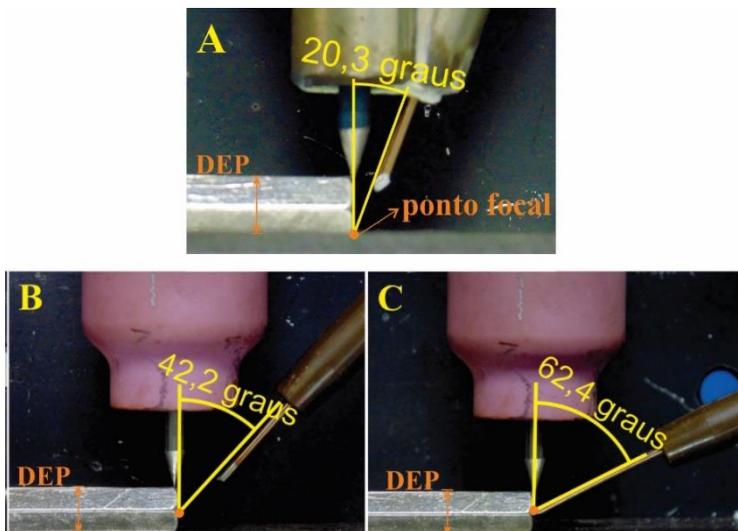


Figura 25 – Configuração dos ângulos tangencial (A) e radial (B e C) utilizados para os experimentos. Indicação (círculo laranja) do ponto focal para cada configuração de ângulo.

Para monitoração do sistema foi utilizado o sistema de aquisição portátil (SAP), da fabricante IMC (Figura 26). Este sistema (39) realiza a aquisição dos sinais de tensão e corrente em frequência de 5 kHz, dispostos em forma de gráficos e histogramas permitindo desta forma uma análise mais detalhada.



Figura 26 – Sistema de aquisição portátil da fabricante IMC Soldagem. Adaptado de (39).

## 4.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A estrutura de apresentação consiste em 2 etapas principais a serem aprofundadas, são elas: primeiramente, o estudo a respeito das influências do sentido de alimentação e em seguida um estudo da taxa de fusão do processo TIG com alimentação tangencial e radial e posterior análise comparativa entre processos, TIG e MIG/MAG. A primeira etapa dos ensaios foi subdividida em 5 subgrupos e a segunda etapa em 3 subgrupos a serem explicados a seguir.

### 4.2.1. Procedimento experimental para o estudo da posição de alimentação de arame – frontal, traseira e lateral

• O presente trabalho previu a elaboração de uma metodologia que tornasse possível avaliar a influência da posição de inserção de arame para um novo ângulo de alimentação, dito tangencial, descrito anteriormente no [item 3.1.1.4](#).

Esta etapa dos ensaios foi subdividida em 5 subgrupos com o objetivo de avaliar as características da posição de inserção de arame:

Etapa 1: Ensaios na posição plana

- Grupo I: Avaliação de perfil geométrico a partir de macrografias;
- Grupo II: Identificação de características da transferência metálica em função dos ângulos de inserção do arame (radial e tangencial), por meio de filmagem de alta velocidade;

- Grupo III: Estudo do perfil térmico da poça de fusão no modo de alimentação tangencial, por meio de filmagem utilizando câmera térmica;
- Grupo IV: Apresentar diferenciais do processo TIG com alimentação tangencial em aplicação de revestimento com sobreposição de cordões em geometria circular;
- Grupo V: Apresentar potencial aplicação em corpo de prova real com processo TIG em alimentação tangencial.

#### **4.2.2. Procedimentos experimentais da etapa 1: Ensaios na posição plana para avaliação da influência da posição de inserção de arame nos processos TIG com alimentação tangencial e radial**

Com o intuito de avaliar a influência da posição de inserção do arame sob as características dos cordões sob no processo TIG com alimentação tangencial foram realizados cordões simples sobre chapa na posição plana. Desta maneira, os ensaios consistiram em 3 repetições em cada posição de inserção de arame em chapas de aço carbono SAE 1020 com 200 mm de comprimento, 76,2 mm (3”) de largura e 9,525 mm (3/8”) de espessura. O gás de processo utilizado foi Argônio puro (99,99%) com vazão de 15 L/min. O arame utilizado como material de adição, com diâmetro de 1,2 mm, também de aço carbono, designado AWS ER 70S-6. Estas chapas foram esmerilhadas de forma a garantir uma superfície livre de resíduos e óxidos que pudessem causar instabilidade ao processo. Os parâmetros de soldagem foram definidos de acordo com a tabela abaixo: Os parâmetros de soldagem (Tabela 1) foram definidos previamente a partir de ensaios preliminares de forma que fosse possível garantir a execução de cordões nas diferentes posições de inserção de arame.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem utilizados na etapa 1.

<b>Parâmetros de soldagem</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Corrente de soldagem	A	220
Velocidade de soldagem	cm/min	30
Velocidade de alimentação de arame	m/min	2,4
Distância eletrodo-peça	mm	6

Além dos parâmetros de soldagem, condições específicas associadas ao processo necessitam de devida atenção de forma a adequar as melhores condições de operação, estes definidos na Tabela 2. Para o processo com alimentação tangencial os ensaios foram realizados com inserções de arame frontal, traseira e lateral, e a alimentação radial com inserção frontal. A DEA para o caso de alimentação tangencial, foi realizado o ajuste de acordo com recomendação do próprio fabricante, em que não deve exceder 1,5x o diâmetro do arame utilizado. No caso da alimentação radial, foi realizado um ajuste de forma que o arame percorresse o menor comprimento de arco possível, a fim de que adentrasse diretamente a poça de fusão sob o risco de prejudicar a ignição do arco (40).

Tabela 2 - Condições de soldagem utilizados na etapa 1.

<b>Condições de soldagem</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Distância eletrodo-arama (tangencial)	mm	1,9
Distância eletrodo-arama (radial)	mm	3,0
Ângulo de afiação do eletrodo	°	40
Ângulo de alimentação - tocha tangencial	°	20
Ângulo de alimentação - tocha radial	°	65

#### 4.2.2.1. Grupo I: Análise macrográfica e avaliação das características geométricas

Após a realização dos ensaios, foram avaliadas as influências das posições de inserções de arame por meio dos perfis geométricos das amostras. Os corpos de prova foram cortados na direção transversal a 25 mm do fim do cordão. Em seguida, as amostras retiradas foram preparadas metalograficamente com lixas em granulação 80, 120, 320, 400, 600, 1200. O ataque químico empregado consistiu em Nital 2%, por imersão durante 10 segundos. Utilizando-se uma câmera fotográfica foram avaliadas as características geométricas de largura, reforço, diluição e ângulo de molhabilidade conforme a ilustração a seguir (Figura 27). Para o dimensionamento das amostras foi utilizado o software *ImageJ*.

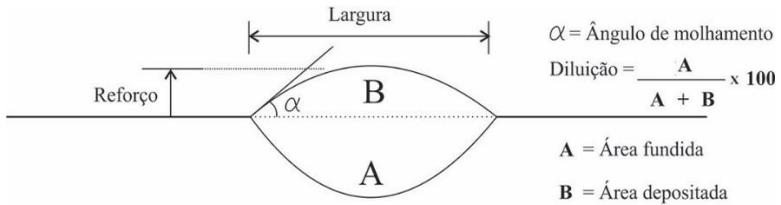


Figura 27 – Ilustração esquemática das variáveis avaliadas.

#### 4.2.2.2. Grupo II: Filmagem de alta velocidade

Com o propósito de proceder um estudo aprofundado a respeito de aspectos como a posição de entrada na poça e a interação arco-aramé, relacionados a formação do cordão e a transferência metálica no modo de alimentação tangencial e radial foi proposto a monitoração mediante filmagem de alta velocidade.

A bancada de ensaios (Figura 28) foi estruturada de forma a possibilitar a realização dos ensaios, no entanto, antes do início do procedimento de filmagem foi necessário ajustar o posicionamento da iluminação e filtro, distância focal da câmera, o tempo de exposição e a frequência de aquisição de imagens. A utilização do filtro com comprimento de onda 810 nm e a iluminação *LASER* permitiram a redução da luminosidade do arco elétrico, em função da diferença entre os comprimentos de onda do laser e da parcela de luz visível do arco.



Figura 28 – Bancada experimental utilizada para a execução dos ensaios de filmagem de alta velocidade. Interface de comunicação entre câmera de alta velocidade e computador (A), Câmera de alta velocidade (B), Corpo de prova (C) e Bancada (D).

A Tabela 3 apresenta os dados relativos a este *setup* e os parâmetros e condições de soldagem utilizados estão descritos no [item 4.2.2.](#)

Tabela 3 – Setup da câmera de alta velocidade.

Frequência	quadros/s	1000
Tempo de exposição	$\mu\text{s}$	9
Potência <i>LASER</i>	W	500
Filtro <i>LASER</i>	nm	810

#### 4.2.2.3. Grupo III: Filmagem termográfica

Prosseguindo os estudos a respeito do ângulo de alimentação tangencial, foram feitas avaliações do perfil térmico da poça de fusão por meio de uma câmera termográfica. Esta técnica constitui-se de um mapeamento remoto a qual possibilita a medição de temperatura e

formação de imagens térmicas (termogramas), sendo fundamentada na detecção de radiação infravermelha naturalmente emitida pelos corpos em função da temperatura (41). Estes ensaios consistiram na avaliação do gradiente térmico da poça de fusão, por meio da filmagem termográfica do verso da chapa. Conforme proposto fez-se uso da tecnologia da câmera termográfica modelo *FLIR SC 7000*. Antes do início do procedimento o equipamento foi posicionado perpendicularmente a peça e no lado oposto da mesma, conforme Figura 28. Em seguida o equipamento foi calibrado de modo a obter a emissividade adequada do material (Emissividade = 0,80). Com o auxílio de um software próprio (*Altair*) integrado a câmera possibilita a aquisição dos termogramas (Figura 27B). Os parâmetros utilizados para a filmagem estão descritos no [item 4.2.2](#).

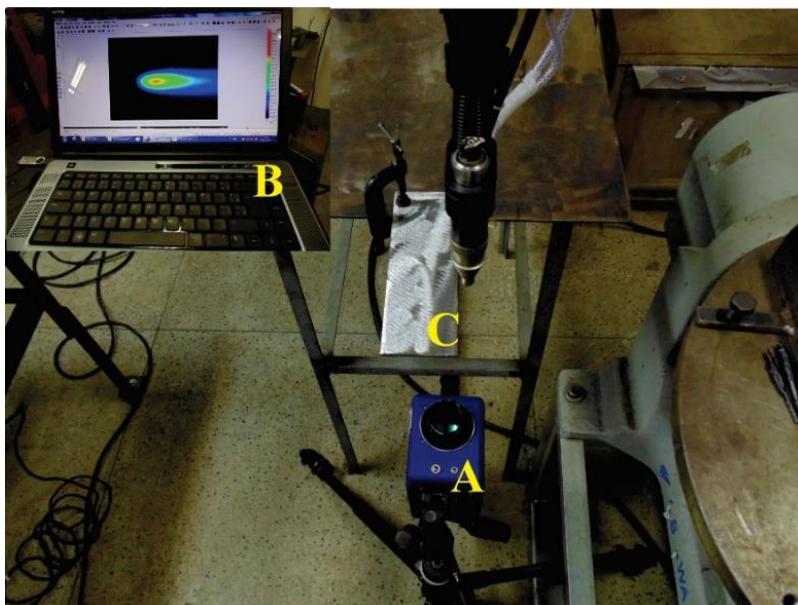


Figura 29 Bancada experimental utilizada para a execução dos ensaios de filmagem térmica. Câmera térmica (A) Corpo de prova (B) Interface de comunicação câmera e computador (C).

#### 4.2.2.4. Grupo IV: Ensaios com sobreposição de cordões em geometria circular

Após o estudo individual de cada posição de inserção de arame, foi proposta a realização de cordões com trajetória específica e

geometria circular. Foram realizados 3 cordões circunscritos de forma que estivessem sobrepostos com o objetivo de avaliar potencialidades do processo TIG nos modos de alimentação tangencial e radial na execução de procedimentos que envolvessem a entrada de arame nas diferentes posições de inserção. Programou-se a trajetória do robô concebendo a realização de 3 cordões circunscritos, sobrepostos em 4 milímetros, condição definida a partir de ensaios preliminares.

Os parâmetros utilizados para a realização deste procedimento experimental ilustrado no [item 4.2.2](#) e a Figura 30 ilustra a trajetória programada para a execução do procedimento. Discriminou-se as posições de início e fim do procedimento, além das respectivas posições de inserção de arame ao longo da trajetória. Para a movimentação adotou-se a alternância no sentido de rotação para melhor sobreposição entre os cordões, iniciando-se pelo sentido anti-horário.

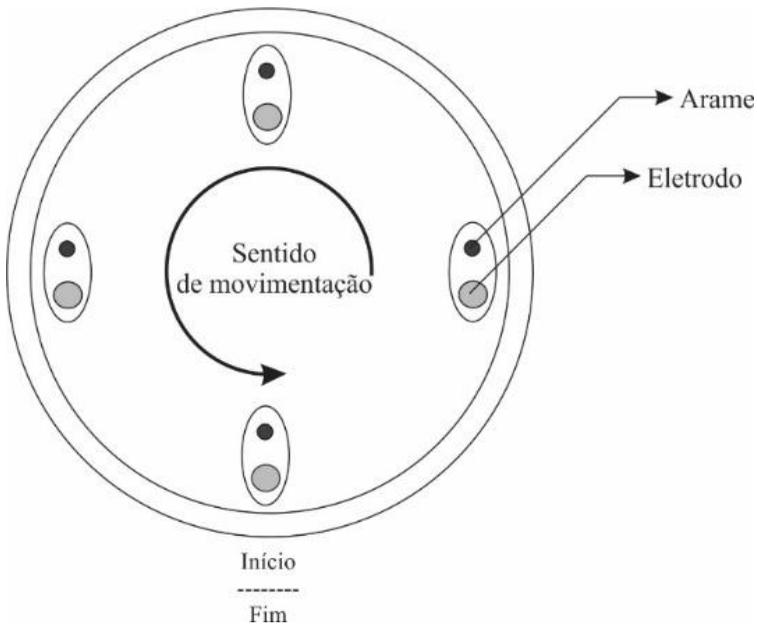


Figura 30 – Esquemático da movimentação circular realizada pelo robô durante os ensaios, com o respectivo sentido de movimentação, início e fim da trajetória, além da posição relativa de inserção do arame.

#### 4.2.2.5. Grupo V: Ensaios de potencial aplicação de preenchimento de chanfro em corpo de prova real

Após a realização do estudo sobre a inserção de arame em diferentes posições sobre chapa, foi proposto uma aplicação prática em corpo de prova real. A proposta está associada a soldagem de preenchimento de chanfro com aplicação em sistemas de produção submarinos. Tal como mostra a Figura 31, por restrições geométricas foi utilizado o processo TIG com alimentação tangencial.



Figura 31 – Comparação entre tochas TIG fixadas no robô antropomórfico que utilizam diferentes ângulos de inserção de arame. Alimentação radial (A) Alimentação tangencial (B). Nota-se a impossibilidade de aplicação da tocha com alimentação radial no interior do chanfro por aspectos geométricos. (42).

A parametrização dos ensaios nesta aplicação baseou-se nos valores obtidos no [item 4.2.2](#). No entanto, é importante ressaltar que para a presente aplicação foram necessárias relevantes adequações em função de alguns aspectos (gás de processo, metal de base e material de adição). Destaca-se a utilização da mistura gasosa em Argônio (80%) e Hélio (20%). Para tanto, foi necessária a utilização de um misturador de gás. O metal de base consistiu da liga F22 e o metal de adição foi a liga de Níquel 625 (denominada AWS ER NiCrMo-3, comercialmente conhecida como Inconel 625). Desta forma, a bancada foi estruturada no sentido de adequar o posicionamento do corpo de prova de forma a permitir 100% de alcance do robô a toda a geometria, pois foi necessária a movimentação do mesmo em 360°. A Figura 32 ilustra a estrutura da bancada utilizada.

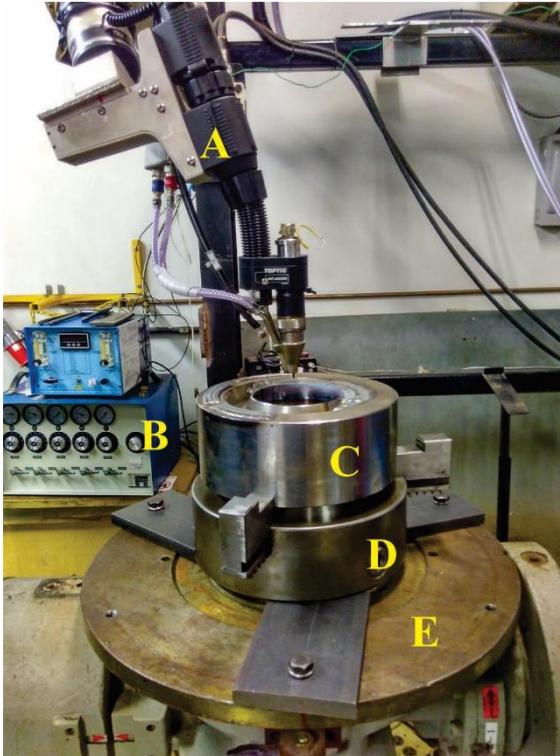


Figura 32 – Bancada experimental para realização dos ensaios de aplicação industrial. Tocha de soldagem TOPTIG (A), Misturador de gás (B), Corpo de prova (C), Sistema de fixação do corpo de prova (D) e Mesa rotativa (E).

Os ensaios foram divididos em 4 fases: As etapas iniciais consistiram na utilização do recurso da mesa rotativa. Nesta etapa, a tocha foi posicionada de maneira que a inserção de arame ocorreu pela região traseira. E a última fase consistiu na realização do procedimento movimentando a tocha de soldagem em torno da geometria do corpo de prova.

Na primeira fase, adotada como procedimento preliminar, foi proposta a realização do procedimento de preenchimento da primeira camada em três passes. Inicialmente, o primeiro passe na região central e em seguida os passes junto ao flanco. A Figura 33 demonstra a estratégia utilizada para a execução dos ensaios.

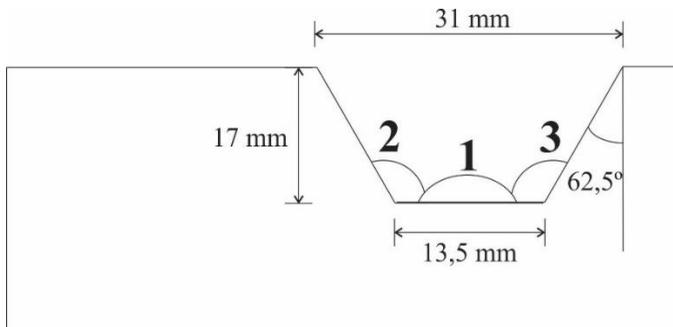


Figura 33 – Esquemático da seção transversal do corpo de prova, assim como a sequência dos passes utilizados na primeira etapa dos ensaios.

Os parâmetros de soldagem para a execução dos ensaios desta etapa do estudo constam na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros e condições de soldagem definidos para a aplicação no corpo de prova real.

<b>Parâmetros e condições de soldagem</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Corrente de soldagem	A	220
Velocidade de soldagem	cm/min	22,5
Velocidade de arame	m/min	4,1
Gás de processo	-	Ar (80%) + He (20%)
Vazão de gás	L/min	15

A partir dos resultados da fase anterior, para a segunda fase foram readequados os procedimentos. O primeiro passe foi realizado nos flancos do chanfro, e em seguida o passe na região central. Os parâmetros elétricos utilizados condizem aos da Tabela 4. Adotou-se como estratégia de movimentação o tecimento de forma que fosse possível alcançar o molhamento requerido para o cordão. Os parâmetros de tecimento são especificados na Tabela 5.

Tabela 5 – Condições específicas de soldagem utilizados na etapa 2 dos ensaios de aplicação no corpo de prova real.

Condições de soldagem		
Parâmetro	Unidade	Valor
Frequência de tecimento	Hz	2
Amplitude de tecimento	mm	4

Na fase seguinte (fase 3), consistiu na realização dos procedimentos com a mesma estratégia da etapa anterior no que consiste a ordem dos passes, primeiros os passes do flanco seguido pelo passe na região central do chanfro. No entanto, a estratégia de movimentação adotada foi a inclinação no ângulo de trabalho da tocha em 20° sem tecimento. A Figura 34 ilustra o posicionamento da tocha em relação ao corpo de prova.

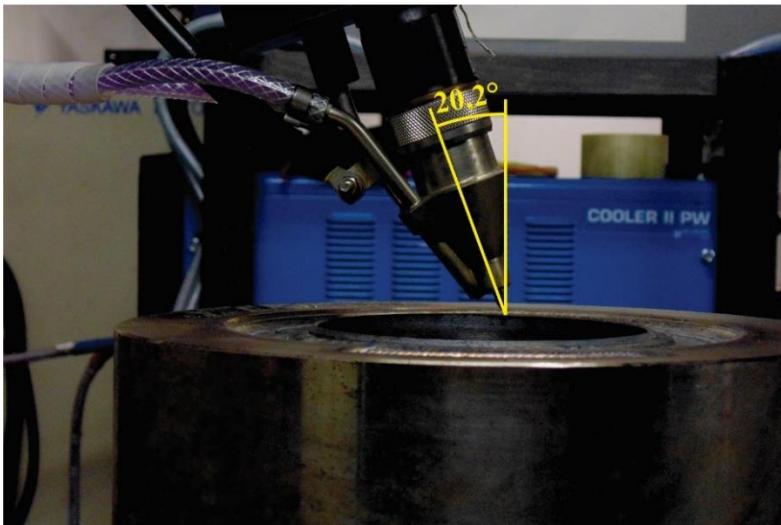


Figura 34 – Configuração da tocha (20° empurrando) para aplicação na fase 3 dos ensaios de aplicação no corpo de prova real.

A fim de avaliar o resultado obtido nesta etapa foi proposto a utilização de dois métodos não destrutivos (END) para a avaliação do corpo de prova após o procedimento: Líquido penetrante (LP) e raio X.

- Líquido penetrante (LP)

O teste de LP visou detectar possíveis descontinuidades abertas, tais como trincas, poros, inclusões, etc. Para a aplicação do método foram seguidas cinco etapas: Preparação da superfície, aplicação do líquido penetrante, remoção do excesso de penetrante, aplicação do revelador, e por último a inspeção.

Primeiramente, a preparação da superfície é feita por meio da limpeza do cordão de solda com álcool de forma a retirar eliminar qualquer material que possa interferir no resultado. Em seguida, é aplicado um spray de líquido penetrante, após a aplicação o corpo de prova é mantido sob ação do produto durante 15 minutos. Após este tempo o material o líquido penetrante é removido da superfície do corpo de prova, de forma a se aplicar o spray revelador. Seguido a aplicação do spray revelador, em apenas alguns minutos, caso haja algum defeito superficial, como trincas, poros ou inclusões, será possível identifica-lo.

- Raio-X

Apesar da versatilidade e facilidade de aplicação da técnica de LP, sua utilização restringe-se a descontinuidades superficiais. Deste modo, visando uma avaliação volumétrica, optou-se pela utilização da técnica também não destrutiva de radiografia. A Figura 35A/B exibe o equipamento, modelo *GE Eresco 65MF4*, material para tratamento do filme (Figura 35C) após a aplicação da técnica e negatoscópio, utilizado para visualizar o filme após a imagem revelada (Figura 35D).

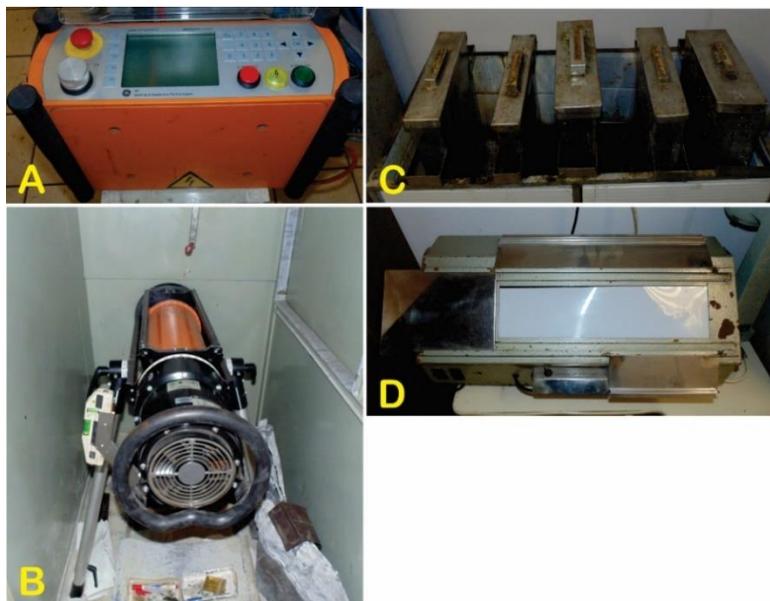


Figura 35 – Equipamento utilizado no ensaio não destrutivo de raio X. Sistema de controle de parâmetros (A) Canhão de raio X (B) Soluções reveladoras de imagem (C) Negatoscópio para visualização das imagens (D).

A Tabela 6 apresenta as informações técnicas relacionadas a capacidade do equipamento.

Tabela 6 – *Datasheet* resumido do equipamento de raio X utilizado.

<b><i>Datasheet GE Eresco 65MF4</i></b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Potência máxima	W	900
Corrente ajustável	mA	0,5 a 6
Temp. de operação	Celsius (°C)	-20 a 50
Máxima penetração da radiação	mm	70
Tempo de exposição	min	até 60

Em função da grande espessura do corpo de prova, foi necessário cortar uma sessão do mesmo para fosse possível realizar o END. Após o corte da peça, esta foi posicionada dentro do equipamento (*Bunker*) para que fosse realizado o procedimento. Os parâmetros foram

configurados no equipamento para realização dos ensaios de acordo com os conhecimentos do operador com a técnica de radiografia e por meio do gráfico operacional do equipamento (Figura 36).

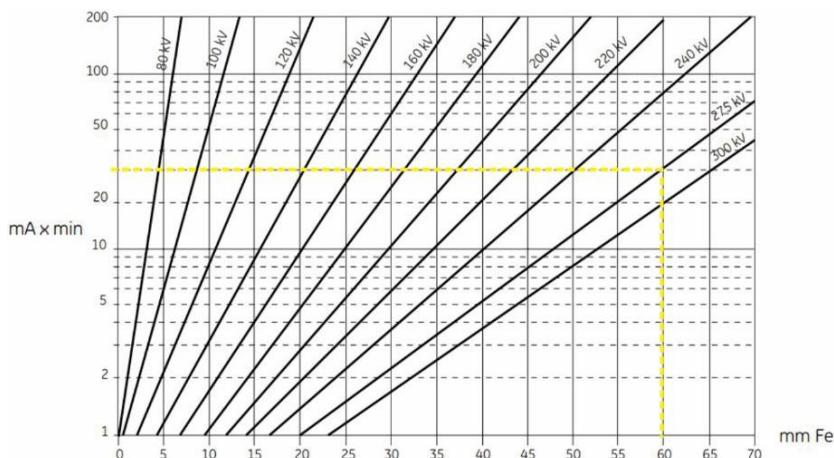


Figura 36 – Gráfico operacional do equipamento de raio X para definição de intensidade e tempo de exposição de acordo com a espessura do corpo de prova.

O *setup* estabelecido no equipamento segue de acordo com a Tabela 7:

Tabela 7 – Setup utilizado no equipamento de raio X.

<b>Setup operacional do equipamento de raio-X</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Intensidade da radiação	mA. min	10
Tensão de operação	kV	275
Espessura da peça	mm	57

Após a observação do comportamento do processo frente as estratégias adotadas, a etapa 4 consistiu em 2 subgrupos: inicialmente foi realizado um procedimento na face do corpo de prova a fim de verificar o comportamento do processo a partir da inserção de material nas diferentes posições tal como realizado no item anterior e em seguida a realização de um procedimento com a movimentação da tocha no interior do chanfro. O passe de preenchimento foi realizado em um dos flancos. Desta forma, programou-se a trajetória do robô de forma a

confirmar a adequabilidade da movimentação. Os parâmetros e condições de soldagem utilizados nesta etapa estão destacados na Tabela 4.

#### **4.2.3. Procedimento experimental para estudo comparativo da taxa de fusão do processo TIG com alimentação tangencial e radial**

Fundamentado no estudo realizado por Delgado (16) que aborda uma análise comparativa de taxa de fusão entre os processos TIG e MIG, o presente trabalho propôs a elaboração de uma metodologia a qual permitisse esta comparação. Assim como realizado pelo referido autor, os parâmetros utilizados para comparação entre os processos foram corrente e potência média.

Esta etapa dos ensaios foi subdividida em 3 grupos afim de avaliar a taxa de fusão no processo TIG e compará-lo em relação ao MIG/MAG.

Etapa 2: Ensaios na posição plana

- Grupo VI: Avaliação da taxa de fusão no processo TIG com alimentação tangencial;
- Grupo VII: Avaliação da taxa de fusão no processo TIG com alimentação radial;
- Grupo VIII: Avaliação da taxa de fusão do processo MIG/MAG convencional e comparação destes resultados com o processo TIG.

#### **4.2.4. Procedimentos experimentais da etapa 2: Ensaios utilizando o processo TIG com alimentação tangencial e radial e o processo MIG/MAG**

Os equipamentos que compõe a bancada destinada a realização dos ensaios no modo de alimentação tangencial constituem os mesmos descritos no [item 4.1](#). Para a técnica com alimentação radial, o mesmo robô foi utilizado, no entanto, com fonte de soldagem da fabricante IMC modelo Digiplus A7 também integrado a um cabeçote alimentador de arame ou sistema tracionador de arame (STA) e um sistema de refrigeração a água do mesmo fabricante. A tocha de soldagem utilizada foi a *Abicor Binzel* modelo *AUT-WIG 400 W* (Figura 4A – [item 3.1.1.4](#)), capacidade máxima de corrente de 400 A, bocal cerâmico nº8. Neste caso, acoplou-se a tocha um sistema de direcionamento de arame desenvolvido no próprio laboratório, com possibilidade de ajustes de

ângulo, e deslocamento nos eixos X, Y e Z. O direcionador utilizado para os ensaios é ilustrado na Figura 37.

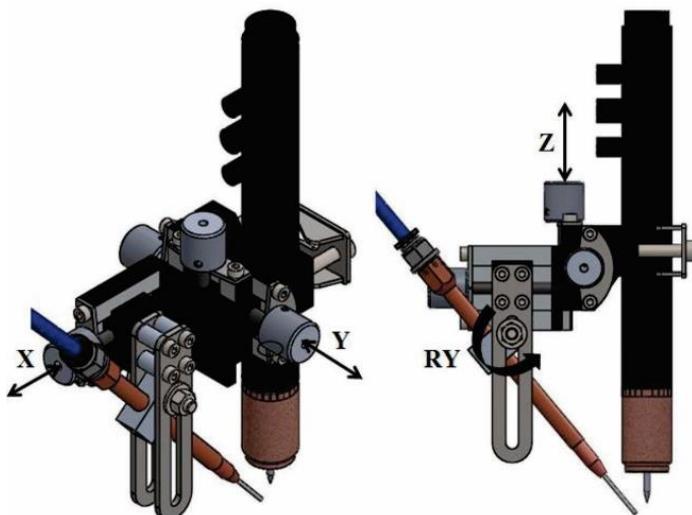


Figura 37 – Modelo 3D do sistema direcionador de arame, tal como seus respectivos ajustes (X, Y, Z, RY).

Posto isso, os parâmetros de soldagem foram definidos. A corrente de soldagem variou entre 180 e 300 A, em intervalos de 40 A. A velocidade de soldagem definida em 30 cm/min. A velocidade de arame será função da corrente média adotada em cada ensaio. Ao fixar-se uma velocidade de soldagem e corrente média, tem-se uma velocidade de arame ideal para a alimentação. Os critérios utilizados para obtenção desta condição ótima de soldagem foram: observação visual, a partir da observação da incidência sólida de arame no metal de base antes que houvesse a fusão completa ou pela formação de uma gota grosseira na extremidade do material de adição (fenômeno *stutting*) e consequente irregularidade na transferência metálica, refletidos no oscilograma de tensão. Os resultados adquiridos auxiliaram na definição da faixa operacional em cada condição de soldagem. Os pontos de aquisição da tensão constituem o polo negativo fixado na tocha de soldagem (estabeleceu-se um contato elétrico externo com o eletrodo a partir da pinça) e o polo positivo próximo ao grampo terra (*ground*). A Tabela 8 indica os parâmetros de processo utilizados para a execução dos testes.

Tabela 8 – Parâmetros de processo utilizados nos ensaios processo TIG.

<b>Parâmetros e condições de soldagem</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Corrente de soldagem	A	180 a 300
Velocidade de soldagem	cm/min	30
Vazão de gás	L/min	15

Para a execução dos procedimentos experimentais com o processo MIG/MAG foram utilizadas uma fonte da fabricante IMC modelo Digiplus A7 (39) com cabeçote alimentador integrado e sistema de refrigeração também do mesmo fabricante, dotada de uma tocha refrigerada reta (Figura 38) da fabricante *TBI Industries* com bico de contato circular. Os outros parâmetros como sistema de movimentação, gás de processo, material de base, arame e vazão de gás, foram os mesmos que compuseram a bancada de ensaios do [item 4.1](#).



Figura 38 – Tocha de soldagem MIG/MAG fabricante TBI Industries.

Os parâmetros de processo utilizados para a execução dos procedimentos com o processo MIG/MAG podem ser vistos na Tabela 9:

Tabela 9 – Parâmetros de soldagem para etapa de ensaios com processo MIG/MAG.

<b>Parâmetros de soldagem</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Velocidade de arame	m/min	2 a 8
Velocidade de soldagem	cm/min	30
DBCP	mm	15
Gás de processo	-	Ar (99,99%)

#### 4.2.4.1. Grupo VI: Avaliação da taxa de fusão no processo TIG com alimentação tangencial

O estudo da taxa de fusão iniciou a partir da avaliação das características geométricas relacionadas ao processo TIG (DEA e DEP). Estas características foram avaliadas sob a condição de alimentação traseira. Neste estudo foram definidas as distâncias eletrodo-aramé para estudo da influência destes parâmetros sobre o processo (2,3; 1,9 e 1,6 mm) afim de se obter a relação entre esta variável e a capacidade de fusão do processo. Em seguida, tornou-se possível a avaliação e posterior discussão a respeito da taxa de fusão do processo TIG com alimentação tangencial sob as diferentes posições de inserção do arame (frontal, traseira e lateral) em posse dos parâmetros geométricos otimizados. Os critérios utilizados para definição da taxa de fusão máxima estão relacionados com a ocorrência do fenômeno de *stutting*. Este fenômeno está relacionado com a incidência de arame sólido no metal de base, isto é, o material de adição não funde completamente quando inserido na poça de fusão. Neste caso, por conta de o arame ser direcionado pela região superior da poça, ao exceder o valor de velocidade de arame em que a corrente é capaz de fundir nota-se a instabilidade do processo por meio de uma constante vibração da tocha e irregularidade nos cordões. Ademais, realizou-se a análise dos perfis geométricos por meio dos cortes transversais tal como no [item 4.2.2.1](#).

#### 4.2.4.2. Grupo VII: Avaliação da taxa de fusão no processo TIG com alimentação radial

Este grupo tem por objetivo apresentar a taxa de fusão do processo TIG com alimentação radial e apresentar a influência do ângulo de alimentação sobre a taxa de fusão do processo TIG,

comparando com os resultados do [item 4.2.4.1](#). Ademais, realizou-se a análise dos perfis geométricos por meio dos cortes transversais tal como no [item 4.2.2.1](#).

4.2.4.3. Grupo VIII: Ensaios utilizando processo MIG/MAG em modo tensão e comparação da taxa de fusão com o processo TIG no modo de alimentação tangencial e radial.

Outro estudo que motivou a realização deste trabalho foi a comparação das taxas de fusão dos processos MIG/MAG e TIG. Para isso, inicialmente foram realizados os ensaios com o processo MIG/MAG convencional. Este processo pode ser operacionalizado em 3 modos de transferência metálica: curto circuito, globular e voo livre (*spray*). Posto isso, foi definido a utilização da transferência por curto-circuito. Este modo de transferência é caracterizado por apresentar um comprimento de arco baixo, por conseguinte, baixos níveis de tensão. Por tratar-se de um processo convencional, isto é, regulado em tensão, à medida que baixos níveis de tensão são utilizados, obtém-se também baixos níveis de corrente média. Assim, com o intuito de se observar os valores mínimos de corrente e potência média necessária para a fusão de determinada quantidade de arame, foi definido o modo de transferência referido. Cabe ressaltar, contudo, que há limitação no nível de tensão em função da velocidade de arame utilizada para a ocorrência da transferência por curto circuito. Desta forma, a partir de determinada velocidade de arame imposta não é possível que a transferência ocorra normalmente, via curto circuito, e a transferência passa a se chamar curto circuito forçado. A partir dos resultados de velocidade de arame, corrente média e tensão média foi possível realizar a comparação com os resultados do processo TIG. Os parâmetros de comparação utilizados foram corrente média e potência média.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1. INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE ALIMENTAÇÃO NO PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO TANGENCIAL E RADIAL**

#### **5.1.1. Ensaio de soldagem, análise macrográfica e avaliação das características geométricas dos cordões no processo TIG com alimentação tangencial**

Com o intuito de verificar as influências relacionadas a posição de inserção do arame na poça de fusão, foram realizados cordões de solda sobre chapa, para cada posição foram executadas 3 repetições. No entanto, um importante fator antes da avaliação das características geométricas trata-se da estabilidade do arco elétrico.

Estabeleceu-se um comparativo entre a regularidade dos níveis de tensão para cada posição e o cordão de solda depositado. No entanto, não há na literatura um critério bem definido, é comum avaliar um arco estável por meio da inspeção visual da aparência do cordão. Desta forma, foram realizados ensaios de forma a obter a velocidade de arame ótima para as três diferentes posições de inserção de arame de modo a garantir a requerida regularidade e cordões com aspecto válido, ausente de descontinuidades. As Figuras 39, 40 e 41 ilustram as aquisições relacionadas a tensão entre eletrodo-peça (a ser chamado de tensão arco). Cabe ressaltar que a distância eletrodo peça (DEP) de 6 mm e distância eletrodo arame (DEA) de 1,9 mm.

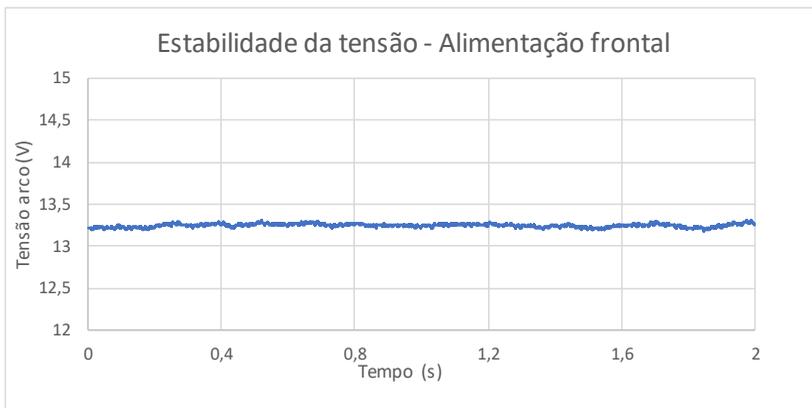


Figura 39 - Oscilograma de tensão relativo a regularidade desta variável no modo de alimentação frontal.



Figura 40 - Oscilograma de tensão relativo a regularidade desta variável no modo de alimentação traseira.



Figura 41 - Oscilograma de tensão relativo a regularidade desta variável no modo de alimentação frontal.

Baseando-se nos resultados apresentados por Delgado a respeito da regularidade da tensão arco, tem-se que as Figuras 39, 40 e 41 apresentaram variação máximas de 0,11, 0,49 e 1,10V. Este fato não corresponde aos aspectos morfológicos e superficiais em que apesar da elevada variação na tensão para a alimentação lateral, esta não apresentou descontinuidades ao longo do cordão.

Os testes foram realizados com velocidade de soldagem de 30 cm/min, corrente média 220 A e velocidade de arame 2,4 m/min. Estes experimentos foram avaliados inicialmente por simples inspeção visual, observou-se que o procedimento quando realizado por trás do arco apresentou melhores características em relação ao molhamento em relação as posições frontal e lateral (Figura 42).

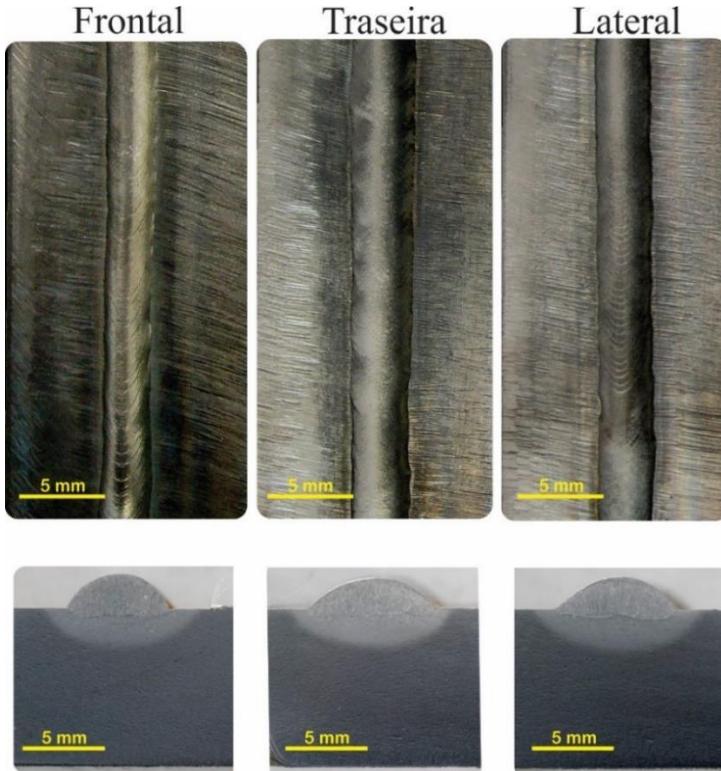


Figura 42 Cordões seguidos pelas respectivas seções transversais relativos a cada posição de inserção de arame no processo TIG com alimentação tangencial.

Seguido a observância dos cordões, apresenta-se as medições realizadas nas amostras (Figura 43). Os parâmetros analisados foram: largura, reforço, ângulo de molhamento e diluição.

	Largura (mm)			Reforço (mm)		
	Frontal	Traseira	Lateral	Frontal	Traseira	Lateral
Amostra 1	6,3	7,7	7,4	2,1	1,9	1,9
Amostra 2	6,5	8,0	6,9	2,2	1,8	2,0
Amostra 3	6,0	7,8	7,0	2,1	1,8	2,0
Média	<b>6,26</b>	<b>7,84</b>	<b>7,09</b>	<b>2,15</b>	<b>1,81</b>	<b>1,97</b>
	Ângulo de molhamento (°)			Diluição (%)		
	Frontal	Traseira	Lateral	Frontal	Traseira	Lateral
Amostra 1	60	45	51	20,8	18,3	17,5
Amostra 2	61	47	55	23,5	25,4	23,2
Amostra 3	61	41	54	24,5	22,0	25,1
Média	<b>60,7</b>	<b>44,3</b>	<b>53,3</b>	<b>22,9</b>	<b>21,9</b>	<b>21,9</b>

Figura 43 – Medições da seção transversal das amostras para as diferentes posições de inserção de arame no processo TIG com alimentação tangencial.

A alimentação traseira demonstrou melhor relação entre largura (média: 7,8 mm) e reforço (média: 1,8 mm). Em relação a largura, a alimentação traseira apresentou-se como 23% maior quando comparado a alimentação frontal e 10% maior para a alimentação lateral. Para o reforço a diferença entre os resultados é significativamente menor. O reforço para alimentação frontal é 16% maior quando comparado com a alimentação traseira. Já a alimentação lateral é 11% maior. Com relação ao ângulo de molhamento, a alimentação frontal apresentou níveis 38% maiores que a alimentação traseira, seguido por 20%, na alimentação lateral. Por último, a diluição obtida para os três casos diferentes de inserção de arame obteve-se aproximadamente os mesmos valores.

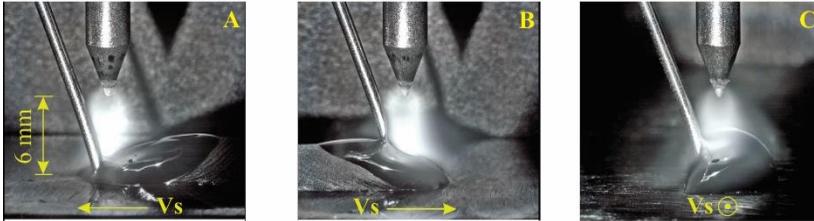
Para os experimentos realizados, a alimentação frontal, consistiu na posição em que os resultados quando comparados a melhor condição (alimentação traseira) apresentou maior discrepância em termos de características geométricas. Em vias de aplicação industrial, como por exemplo, revestimento, partindo-se da observância do operador e dos resultados destes experimentos, recomenda-se a utilização da alimentação traseira.

### 5.1.2. Estudo do comportamento da inserção de arame nos processos TIG com alimentação tangencial e radial por meio de filmagem de alta velocidade

De forma a se apresentar outras questões relacionadas a estabilidade do processo tal como discutido anteriormente e formação do cordão de solda, foi realizado um estudo utilizando uma câmera de

alta velocidade (Figura 44). Os ensaios seguiram-se utilizando os parâmetros adotados no item anterior (DEP: 6 mm; Va: 2,4 m/min; Vs: 30 cm/min). Além do modo TIG com alimentação tangencial (20°), foram avaliados os aspectos relacionados a posição de inserção do arame no modo de alimentação radial (70°).

### Alimentação tangencial



### Alimentação radial

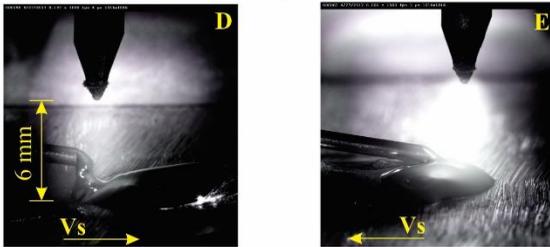


Figura 44 – Frame da filmagem de alta velocidade referente aos diferentes ângulos de inserção de arame. Tangencial frontal (A) traseira (B) e lateral (C); radial frontal (D) e traseira (E).

Na condição de alimentação tangencial (Figura 44A, 44B e 44C) é importante ressaltar alguns aspectos. Na Figura 44A, alimentação frontal, o arame é inserido na periferia da poça (frente de fusão). Na Figura 44B, alimentação traseira, o arame é inserido em uma região com uma poça fluida formada e estável (região central da poça de fusão). A poça é um fator bastante relevante no sentido de auxiliar a fusão do arame, além do próprio arco elétrico. A Figura 44C, a posição de inserção do arame (lateral) ocorre também na periferia da poça tal como na alimentação frontal. Outro aspecto importante, é o comprimento livre de eletrodo em contato com o arco, observa-se que para a alimentação frontal apresenta maior comprimento, no entanto, devido à região da poça inserida apresenta dificuldade em termos de estabilização da transferência. Diferentemente, na alimentação traseira,

que apesar de apresentar menor comprimento em relação a este último apresenta melhor estabilidade devido à região da poça. Região esta de maior temperatura, com maior quantidade de material em solidificação o que facilita a estabilização da transferência metálica. A partir da ilustração apresentada, torna-se mais evidente o fato da inserção do arame na região central da poça de fusão acarretar em maior estabilidade ao processo e a transferência metálica.

Da mesma forma, a condição de alimentação radial apresenta particularidades. Na Figura 44D, alimentação frontal, o arame é posicionado sutilmente acima do metal de base. E por último, a Figura 44E, ilustra a alimentação traseira. Este modo torna-se crítico por conta do ângulo de inserção do arame e principalmente a proximidade deste com a superfície em solidificação da poça de fusão. A superfície sólida do arame em direção a poça de fusão colide com a superfície da poça em solidificação, prejudicando desta forma em sua morfologia final. Assim, em função desta configuração no processo TIG com alimentação radial de arame torna-se mais crítico a execução de procedimentos em que a inserção de arame acontece pela região traseira. Estes resultados apresentados corroboram com pesquisas desenvolvidas por Delgado (16) e contemporâneo a este último, Pigozzo (28), em que apresentaram as dificuldades relacionadas a posição de inserção de arame por trás do arco no processo TIG com alimentação radial.

### **5.1.3. Estudo do perfil térmico da poça de fusão por meio de filmagem térmica da peça**

Em seguida, procedeu-se a análise com base no gradiente térmico da peça em função de possíveis efeitos do posicionamento de inserção de arame. A Figura 45 apresenta a influência do posicionamento de arame na poça no perfil térmico da poça de fusão. O perfil térmico o qual atingiu maior temperatura foi alimentação traseira, seguido pela lateral e posteriormente a frontal. No entanto, consiste de uma diferença pouco significativa entre as posições de inserção do arame. Diferença esta, também observada nas medições das macrografias dos cordões realizados. Apesar da diferença pouco relevante a respeito da temperatura do perfil térmico da poça, os fatores de maior significância entre as condições de inserção do arame foram o ângulo de molhamento e a largura. Estes parâmetros apresentam elevada importância quando se trata de aplicações em que há sobreposição de cordões. O primeiro está relacionado a fusão completa dos cordões sobrepostos, de forma a prevenir descontinuidades como falta de fusão.

O segundo relaciona-se com a eficiência de material gasto para o revestimento, ou seja, quanto maior o ângulo de molhamento do cordão menos material de adição será consumido.

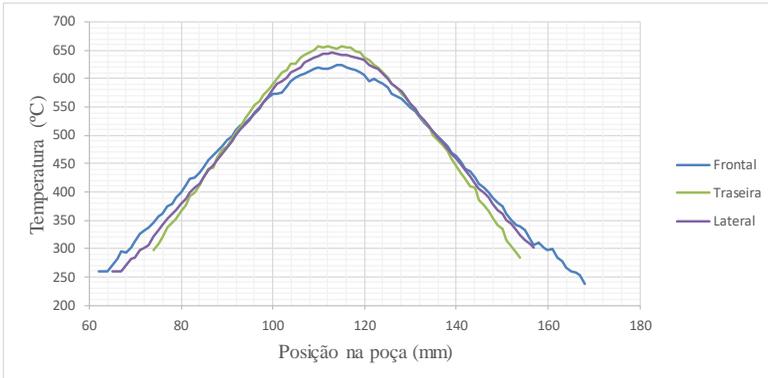


Figura 45 – Gráfico comparativo das temperaturas em relação às posições de inserção de arame na filmagem térmica realizada no verso do corpo de prova (chapa de aço carbono SAE 1020).

O termograma (Figura 46) caracteriza a alimentação traseira (Figura 46B) como o posicionamento em que a poça apresenta maior temperatura ( $T_{\text{máx}} = 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Nas condições de alimentação frontal e lateral as temperaturas máximas foram  $620$  e  $648^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Nota-se neste termograma que o perfil térmico para a alimentação traseira apresenta limitação em termos de comprimento. A hipótese atribuída a este perfil, relaciona-se com o posicionamento do arame. O fato do arame posicionar-se na região traseira do arco, impede que este aja no comprimento em solidificação da poça de fusão.

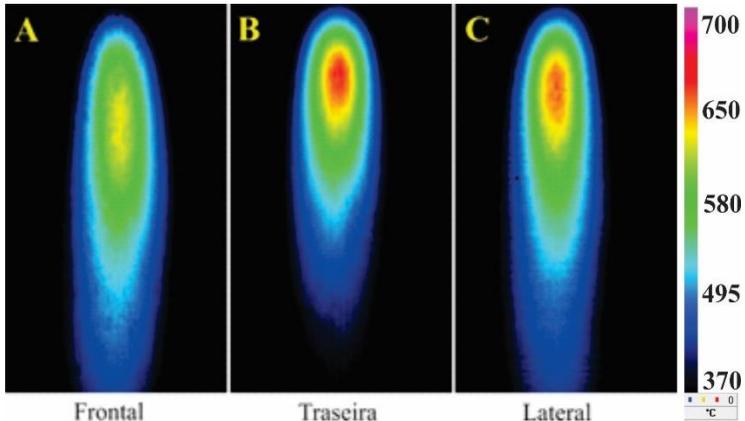
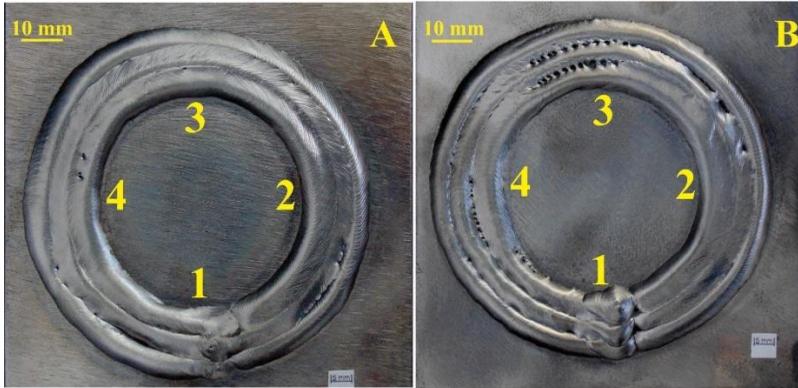


Figura 46 – Termograma relativo a filmagem térmica realizada no verso do corpo de prova (chapa de aço carbono).

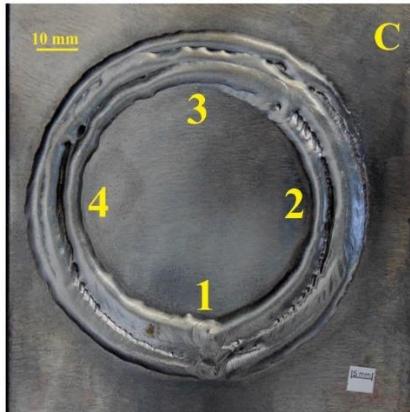
#### 5.1.4. Avaliação para aplicações em revestimento (soldagem circular)

Com o intuito de caracterizar as diferentes posições de inserção de arame na poça de fusão (frontal, traseira e lateral) no processo com alimentação tangencial e radial executou-se procedimentos em geometria circular, tal como ilustrado na Figura 42. Os parâmetros utilizados para realizar o procedimento foram os mesmos do [item 4.2.2.](#)



TOPTIG - Movimentação alternada

TOPTIG - Movimentação sem alternância



TIG Convencional - Movimentação alternada

Figura 47 – Resultados relativos a soldagem circular realizada sobre chapa na posição plana. Processo TIG com alimentação tangencial com movimentação alternada nos passes de sobreposição (A) TIG com alimentação tangencial sem movimentação alternada (B) TIG com alimentação radial com movimentação alternada (C).

Os resultados evidenciam maior dificuldade em operacionalizar o processo TIG com alimentação radial nas diferentes posições de inserção do arame (figura 47C). Diferentemente, observa-se no modo de alimentação tangencial (figura 47A e 47B) em que os resultados encontrados ilustram melhor capacidade do processo na realização dos procedimentos. A indicação numerada nos cordões representa as diferentes posições de inserção do arame para o primeiro passe realizado (1 – Lateral; 2 – Frontal; 3 – Lateral e 4 – Traseira)

Em função das dificuldades encontradas durante os ensaios preliminares para o modo de alimentação tangencial, definiu-se a execução dos procedimentos a partir de duas estratégias de movimentação. Nas Figuras 47A e 47C foi utilizada a movimentação da tocha de forma alternada (Primeiro cordão: sentido anti-horário; segundo cordão: sentido horário; terceiro cordão: sentido anti-horário). Na Figura 47B o procedimento foi realizado com a tocha rotacionando sempre no mesmo sentido. Para o procedimento utilizando a tocha com alimentação radial (Figura 47C) verificou-se a difícil tarefa de sobrepor cordões mesmo quando o arame é inserido na região frontal. Atribuiu-se as dificuldades devido ao direto posicionamento do arame na poça. Para isso, o ajuste do correto *offset* em relação ao cordão anterior a partir do segundo passe seria necessário. No entanto, este ajuste tem como ponto de partida as características geométricas do cordão em que cada posição de inserção, tal como obtido no [item 5.1.1](#). Em algumas regiões não foi possível inserir o arame diretamente na poça fluida, de forma que metal de adição incidia no cordão anterior, prejudicando assim a correta fusão e sobreposição. Os cordões para as diferentes posições de inserção apresentam diferentes características geométricas, e este fato torna a execução do procedimento multidirecional mais difícil. Assim, a proposição de realização de cordões com alternância de rotação do sentido de movimentação (Figura 47A) apresentou notória melhoria em relação a movimentação sem alternância (Figura 47B).

#### **5.1.5. Verificação experimental em potencial peça real**

Na Figura 48 é apresentado o resultado da estratégia correspondente a etapa 1 para o preenchimento do chanfro. A estratégia adotada foi realizar o passe na região central, seguido dos passes nos flancos do chanfro. Nesta etapa foi utilizada a rotação da mesa, mantendo-se a tocha fixa com alimentação traseira.

Etapa 1



Figura 48 – Resultado da execução do procedimento na etapa 1. Em destaque (setas amarelas) a dificuldade encontrada para a fusão do material junto aos bordos do chanfro.

Nesta etapa observou-se a dificuldade relacionada a fusão das paredes do chanfro (indicação em setas amarelas). Atribuiu-se este fato principalmente ao posicionamento da tocha em relação a parede do chanfro ilustrado na Figura 49 (isto é, o eixo do eletrodo foi levemente deslocado em direção ao centro do chanfro e, conseqüentemente, apenas a periferia o arco incidiu nos bordos do chanfro). Com relação ao posicionamento da tocha, como já discutido anteriormente em relação ao perfil térmico de temperatura do arco elétrico, tem-se que a periferia do arco trata-se de uma região “menos quente”, portanto apresentam menor capacidade para fundir material. Desta forma, após a execução do procedimento observou-se que este posicionamento da tocha não seria adequado. Vale ressaltar que esta etapa de experimentos foi adotada como etapa preliminar de forma que fosse possível identificar as dificuldades relacionadas ao procedimento. Outro aspecto, trata-se dos materiais de adição e de base utilizados para aplicação. A liga de Níquel (Inconel 625) trata-se de um material com uma poça de fusão de menor fluidez. Este aspecto resulta em um cordão mais convexo e irregular, à medida que a poça não apresenta a mesma fluidez quando utilizado o aço carbono (43). Este aspecto faz com que seja necessários maiores cuidados no ajuste do procedimento.

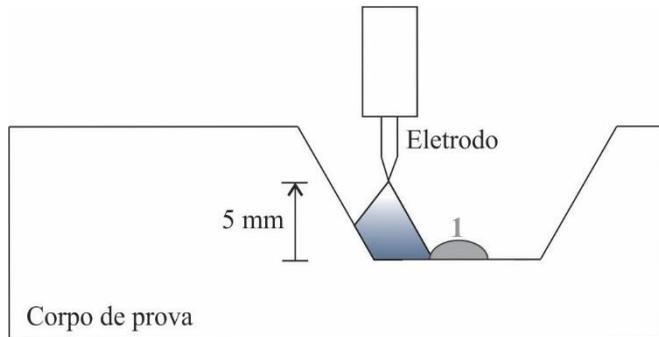


Figura 49 – Esquemático de posicionamento do eixo central da tocha em relação ao bordo do chanfro.

Para a etapa 2, a estratégia adotada foi realizar os passes inicialmente nos flancos seguido pela região central do chanfro utilizando a técnica de movimentação com tecimento. A Figura 50 ilustra o resultado após a execução dos passes nos bordos do chanfro.

Etapa 2

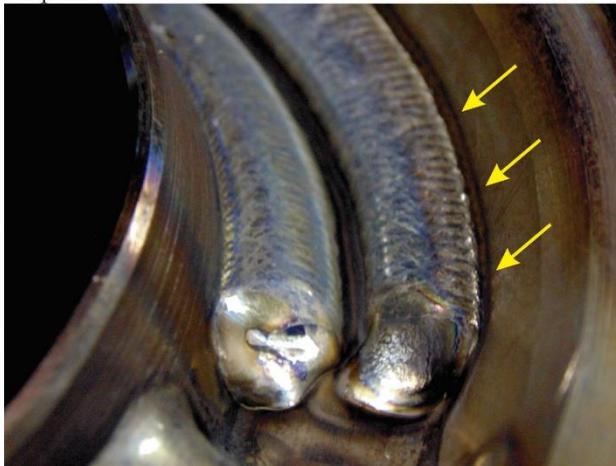


Figura 50 – Chanfro após a execução dos passes de preenchimento junto ao flanco.

Após a readequação do posicionamento da tocha por meio da utilização da técnica de movimentação com tecimento observou-se notável ganho na qualidade da deposição nos bordos do chanfro

(indicação em setas amarelas). No entanto, a presença de uma “valeta” na região central do chanfro após a execução do procedimento comprometeu a execução do passe seguinte. Desta forma, para que fosse possível a execução do passe na região central, realizou-se um passe de re-fusão do material de forma a readequar as características do cordão e executar posteriormente o passe de preenchimento. Para a execução da primeira camada do preenchimento neste caso foram necessários 4 passes, sendo 3 de preenchimento e 1 de re-fusão. A Figura 51 ilustra o resultado da etapa de re-fusão (A) e preenchimento (B). A seta amarela indica a região preenchida após o passe de re-fusão.

## Etapa 2

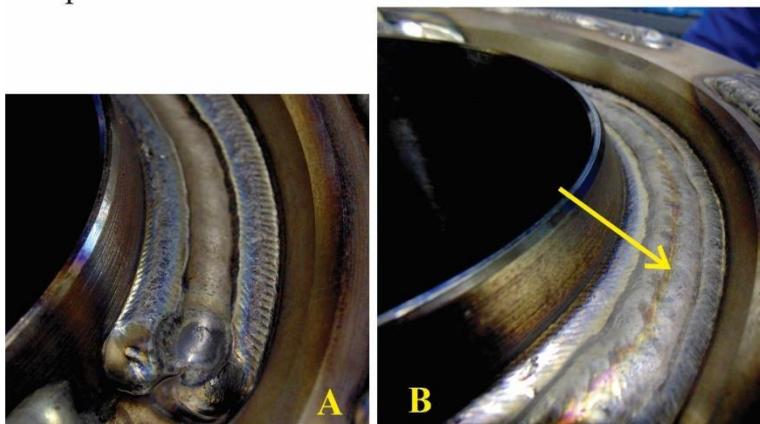


Figura 51 – Chanfro após o procedimento de re-fusão (A), seguido pelo passe de preenchimento (B).

Na execução da etapa seguinte (etapa 3) o objetivo principal seria retirar a necessidade da utilização de um passe de re-fusão. Neste caso, foi utilizada a mesma estratégia da etapa 2 em relação a sequência de passes. No entanto, foi alterado o posicionamento da tocha para a condição com inclinação de  $20^\circ$  no ângulo de trabalho (movimentação do tipo empurrando). O resultado após a realização dos primeiros cordões nos bordos do chanfro é apresentado na Figura 52.

### Etapa 3



Figura 52 – Condição do chanfro após a execução dos passes de preenchimento nos bordos do chanfro (Etapa 3).

Observa-se que após a realização dos cordões nos bordos do chanfro com a técnica de movimentação da tocha empurrando obteve-se uma região mais adequada para o preenchimento na região central. Apesar da técnica de movimentação por tecimento também ter apresentado bons resultado em relação a qualidade do cordão, observou-se que a utilização do ângulo de inclinação da tocha mostrou-se mais promissor em função da eliminação do passe de re-fusão. Além disso, observa-se a progressiva melhoria do cordão indicado (seta amarela), tanto em relação a aspecto superficial quanto as características geométricas passíveis de se verificar a olho “nu”, em relação ao primeiro teste realizado (Figura 45).

Os resultados após a execução dos três passes de preenchimento são apresentados na Figura 53.

### Etapa 3

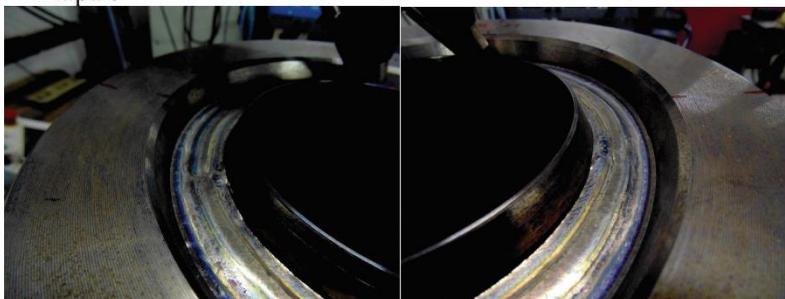


Figura 53 – Corpo de prova após a execução da etapa 3 do procedimento de preenchimento do chanfro.

Após inspeção visual por parte do operador notou-se bom aspecto superficial e durante o procedimento não foi constatado nenhum tipo de instabilidade. Por isso, foi proposto a realização de ensaios não destrutivos a fim de avaliar estes testes. Foram realizadas avaliações não destrutivas pela técnica de líquido penetrante (LP) e raio X.

A Figura 54 expõe o resultado do ensaio por LP. Este método tem como principal característica a avaliação superficial dos cordões depositados e os defeitos característicos são revelados em coloração diferenciada. Desta forma, é possível afirmar que superficialmente os cordões foram aprovados no critério deste ensaio não destrutivo.

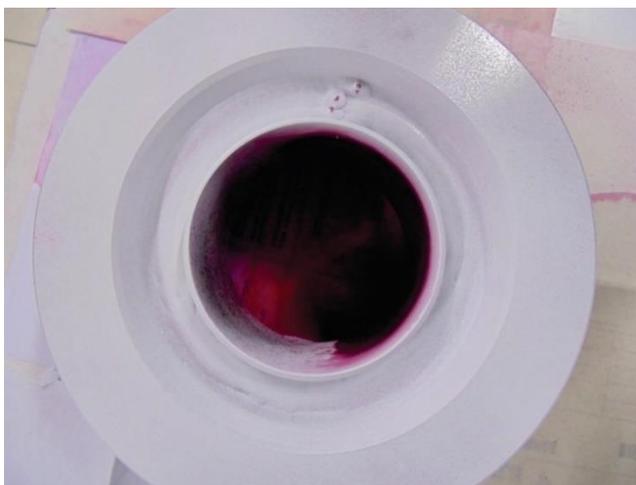


Figura 54 – Corpo de prova após a realizado da execução do procedimento não destrutivo por líquido penetrante.

A Figura 55 apresenta o resultado após a execução do ensaio por raio-X.

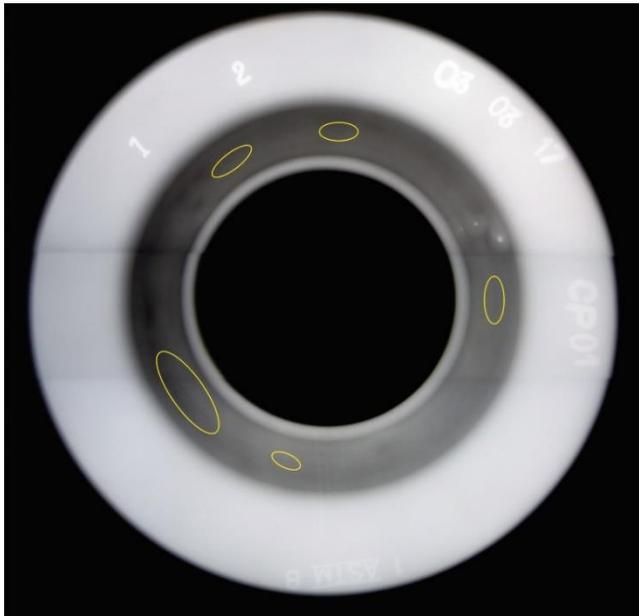


Figura 55 - Filme radiográfico do corpo de prova.

A partir de critérios pré-estabelecidos (44) para interpretação de filmes radiográficos tem-se a partir das indicações (em amarelo) na própria Figura 55 a existência de diferentes regiões onde ocorreram falta de fusão. Estas discontinuidades são caracterizadas por linhas contínuas escuras. As regiões em que foram coletadas as discontinuidades condizem a região interpasse, ou seja, na execução da sobreposição dos cordões o procedimento não foi qualificável, gerando desta forma estas discontinuidades.

Por fim, a validação da execução do procedimento a partir da movimentação do robô no entorno do corpo de prova. Inicialmente, propôs-se a realização de um procedimento na face do corpo de prova (Figura 56), no sentido de avaliar os mesmos aspectos como realizado no [item 5.1.4](#), em seguida a execução do passe no interior do chanfro (Figura 57).

## Etapa 4



Figura 56 – Procedimento de sobreposição de passes na face do corpo de prova utilizando a movimentação do robô. As regiões indicadas referem-se à posição de inserção do arame. (1) Lateral; (2) Frontal; (3) Lateral; (4) Traseira.

As regiões 1 – 4 indicam as diferentes posições em que o arame foi inserido na poça de fusão. As regiões 1 e 3 ocorrem com inserção lateral de arame, e para as regiões 2 e 4, frontal e traseira, respectivamente. Apesar dos esforços durante os procedimentos preliminares observa-se a partir do resultado apresentado na Figura 56 a repetição da dificuldade relacionada ao ajuste de *offset* de sobreposição dos cordões. No entanto, vale ressaltar o potencial apresentado por esta técnica na execução de cordões multidirecionais.



Figura 57 – Passe de preenchimento realizado utilizando a rotação do robô no entorno da geometria do corpo de prova.

Após a execução do procedimento ilustrado na Figura 57 observou-se que notória viabilidade de aplicação neste contexto de aplicação industrial. A região ilustrada na Figura 57C apresentou menor molhamento do cordão. Esta característica foi atribuída devido ao reposicionamento da tocha em função de sua configuração geométrica (vide Figura 58).



Figura 58 – Ilustração de reposicionamento da tocha em função da proximidade da parede do chanfro e a região de passagem do arame (seta amarela).

Atribuiu-se desta forma, esta característica do cordão, menos favorável sob termos geométricos, em função desta readequação pois tornou-se mais difícil o posicionamento do arame em uma região do arco em que fosse possível sua fusão de forma a favorecer um melhor molhamento do cordão. Sobretudo, vale ressaltar tanto a viabilidade técnica em relação ao aspecto geométrico da tocha para posicionamento no interior do chanfro, tanto a viabilidade de execução de um cordão com características adequadas ao procedimento de preenchimento.

## 5.2. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ALIMENTAÇÃO NA TAXA DE FUSÃO DO PROCESSO TIG E ANÁLISE COMPARATIVA COM O PROCESSO MIG/MAG

Os resultados encontrados por Delgado, utilizando a tocha TIG representada pelo desenho esquemático da Figura 59 mostram que enquanto a potência média é utilizada como medida de comparação entre os processos MIG/MAG e TIG (alimentação radial), é possível alcançar praticamente as mesmas taxas de fusão (Figura 60), notado a partir da sobreposição das curvas. Porém, quando o parâmetro de comparação utilizado é a corrente média o que se observa é que o processo TIG Convencional não possui a mesma capacidade de fusão do processo MIG/MAG (Figura 61)

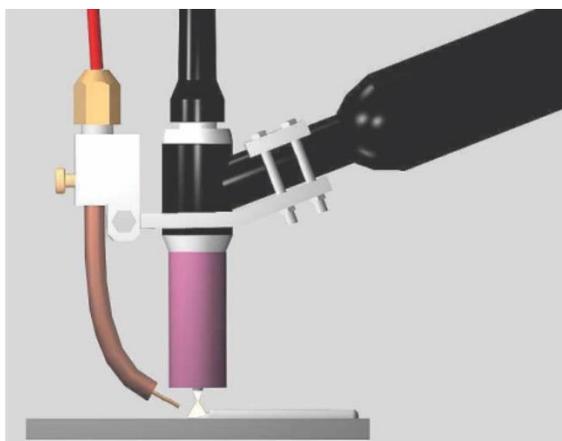


Figura 59 – Desenho esquemático de tocha TIG com alimentação de arame utilizado por Delgado. Adaptado de (16).

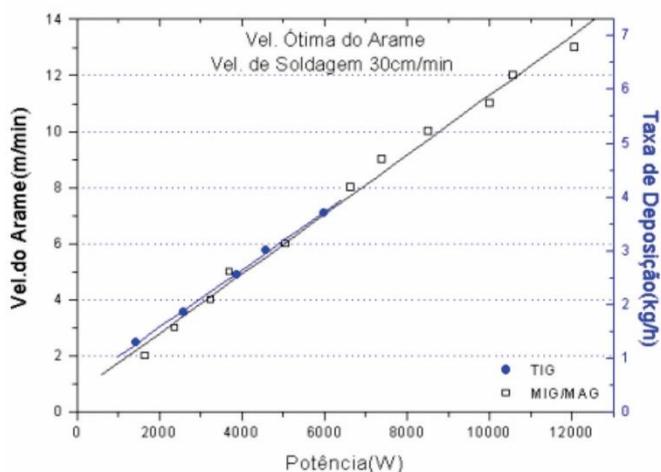


Figura 60 – Comparação entre os processo TIG e MIG (Relação entre velocidade de arame/taxa de deposição e potência apresentada por Delgado). Adaptado de (16).

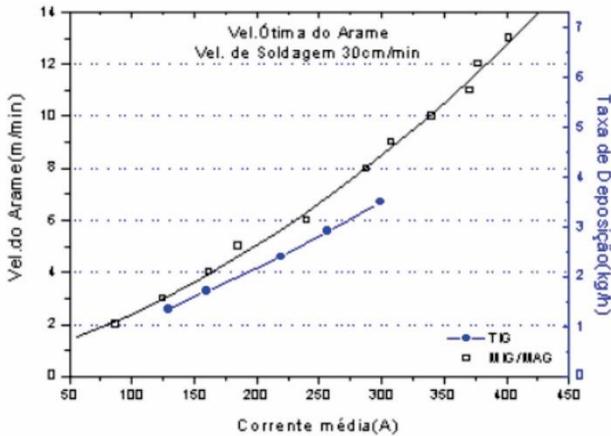


Figura 61 – Comparação dos processos TIG e MIG (Relação entre velocidade de arame/taxa de deposição e corrente média apresentada por Delgado). Adaptado de (16).

### 5.2.1. Ensaios de soldagem, avaliação do perfil geométrico dos cordões e da taxa de fusão no processo TIG com alimentação tangencial

Tal como já apresentado anteriormente no [item 3.1.3.1](#) o processo TIG possui duas importantes variáveis (DEP e DEA) a serem reguladas antes do início do procedimento de soldagem. Para isso, inicialmente, por consistir de um processo ainda em início de estudo na literatura foram realizados ensaios preliminares com o objetivo de identificar as influências destes parâmetros. A Figura 62 ilustra a condição em que a distância eletrodo-arame está fixo para dois níveis de DEP, 3 e 6 mm. Observa-se essencialmente que a posição de entrada do arame na poça de fusão é diferente. Na condição de 6 mm o arame é inserido no centro da poça de fusão, enquanto para 3 mm, o arame é inserido mais a periferia da poça. Estes ensaios foram realizados com alimentação traseira.

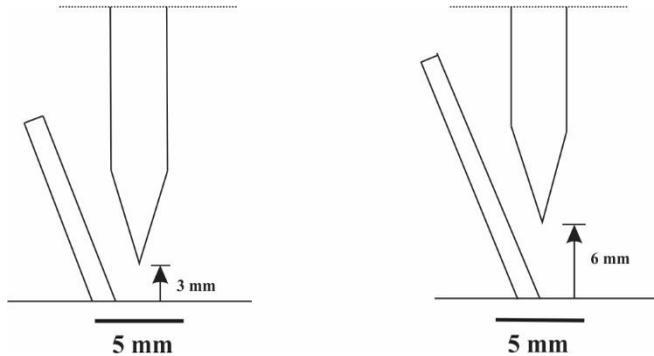


Figura 62 – Figura esquemática para dois níveis de DEP no processo TIG com alimentação tangencial e a posição de inserção do arame em relação ao eixo do eletrodo.

Este estudo torna-se importante pois em função de uma maior DEP (consequentemente maior potência), a posição de inserção do arame na poça e o comprimento de arame em contato direto com o arco, influenciará diretamente nos aspectos de taxa de fusão do processo. As Figuras 63 e 64 apresentam a relação  $V_a \times I$  e  $V_a \times P$  para dois níveis de DEP.

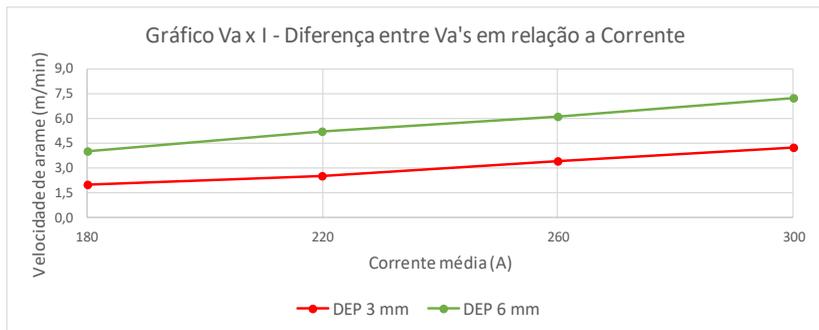


Figura 63 – Gráfico comparativo entre as velocidades de arame ótimas em função da corrente média para dois níveis de DEP no processo TIG com alimentação tangencial.

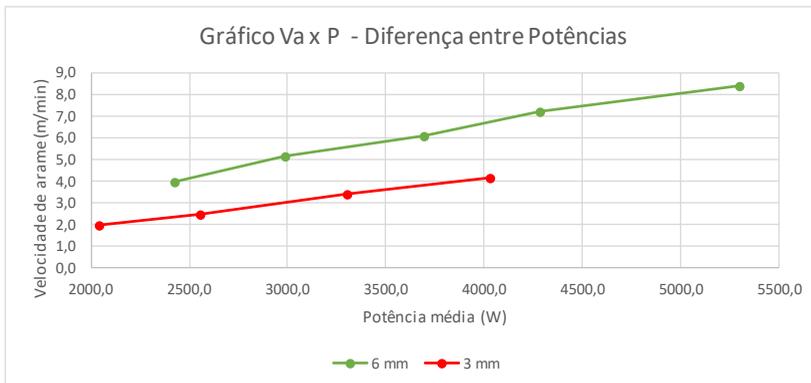


Figura 64 - Gráfico comparativo entre as velocidades de arame ótima em função da potência média calculada para dois níveis de DEP no processo TIG com alimentação tangencial.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 63 e 64 – para o processo TIG com alimentação tangencial - diferentemente do que foi apresentado por Delgado (Figuras 60 e 61) no processo TIG com alimentação radial, nota-se grande relevância em relação a utilização de dois níveis de DEP (3 e 6 mm), permitindo desta forma que o processo TIG com alimentação tangencial atinja níveis mais elevados de velocidade de arame. Observou-se boa operacionalização e bons resultados em termos de aspectos geométricos para ambos os níveis de DEP, no entanto, a critério de comparação com processos de elevada produtividade, a DEP 3 mm torna-se pouco significativa. Tal como apresentado acima, Delgado também propôs ensaios baseados na mudança da DEP (Figura 17 – [item 3.1.4](#)) para o processo TIG com alimentação radial (45°). Ao compara-los observa-se que na técnica de alimentação radial as curvas de potência para uma determinada faixa de alimentação estão sobrepostas, diferentemente do que se observa na técnica de alimentação tangencial. No entanto, em ambos os casos é notável que a DEP influencia diretamente na taxa de fusão do processo, representado pelo ponto máximo alcançado pela curva. Ainda a respeito desta influência, a partir das simulações realizadas por Traidia (35) é possível observar que a região central da poça é a região mais quente, pois está sob o arco, provendo assim maior estabilidade a transferência metálica e maior taxa de fusão. Infere-se, também, considerando a Figura 18 (densidade de potência x DEP [30]), que os fatores acima levantados, aliados ao fato de que com maior DEP um maior comprimento do arame fica submetido ao aquecimento anódico e

contato com o arco, se sobrepõe ao efeito de maior densidade de potência para menores DEPs.

A relação geométrica entre os parâmetros avanço de eletrodo e distância eletrodo-arama estão definidos na Figura 65.

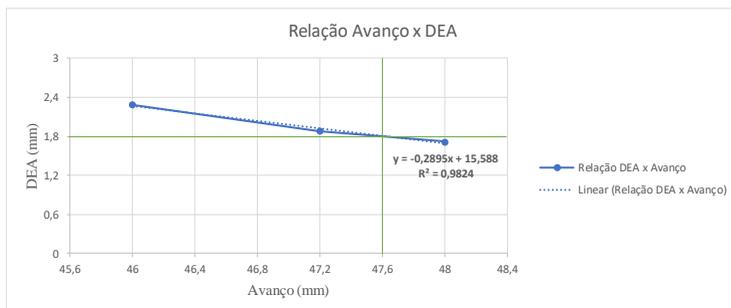


Figura 65 – Relação entre avanço de eletrodo e a distância eletrodo-arama (DEA).

Este estudo está relacionado ao que é proposto pelo sistema de alimentação tangencial, em que o arame deve adentrar uma região próxima o bastante da extremidade do eletrodo de forma a explorar a região de maior energia do arco. A curva  $V_a \times I$  (Gráfico 8) apresenta a influência deste parâmetro sobre o aspecto da taxa de fusão. Por exceder o valor mínimo recomendado pelo fabricante o avanço de 48,0 mm não foi avaliado (DEA mínimo de 1,8 mm). Desta forma, esta etapa de ensaios visou maximizar a taxa de fusão a partir da relação existente entre a distância eletrodo-arama e a posição de entrada do arame no arco, mantendo-se a transferência metálica e os cordões regulares. Foi definido a partir de observações preliminares que os experimentos fossem realizados com alimentação traseira.

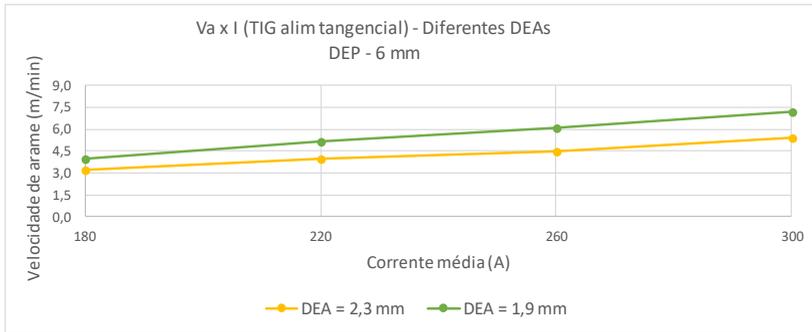


Gráfico 1 – Relação da corrente média x velocidade de arame em função do avanço de eletrodo.

É notável a influência da distância entre o arame e o eletrodo na taxa de fusão do processo. Este parâmetro atua diretamente na posição de entrada do arame no arco elétrico proporcionando uma melhora na fusão do processo. Ressalta-se que, apesar da diferença de 0,4 mm na DEA quando se mudou o avanço de 46 para 47,2 mm, este resultado corrobora com abordagem da literatura (22) em que que o gradiente térmico do arco elétrico para pequenas distâncias sofre grandes variações no gradiente térmico do arco. A partir destes resultados fica definido para o prosseguimento do estudo a utilização da DEP em 6 mm e DEA em 1,9 mm.

Posto isso, os próximos resultados visam avaliar a taxa de fusão do processo TIG com alimentação tangencial para as diferentes posições de inserção de arame no arco (frontal, traseira e lateral). O resultado apresentado na Figura 66 ilustra a taxa de fusão ( $V_a \times I$ ) para a condição de inserção de arame frontalmente ao arco. Os limites inferiores e superiores ótimos referem-se as faixas operacionais ideais para o processo.

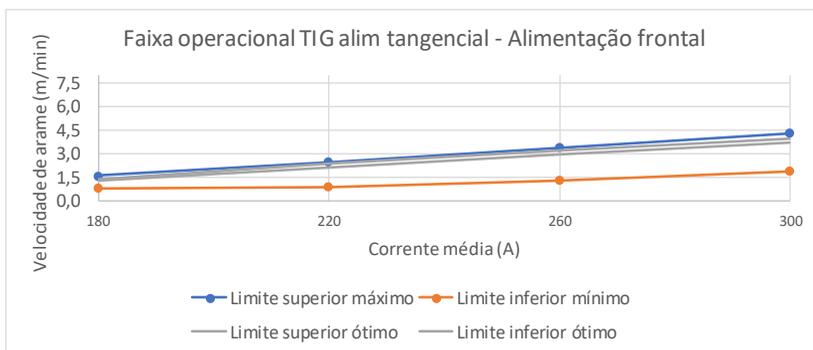


Figura 66 – Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação tangencial com inserção frontal de arame.

Na condição de alimentação frontal os resultados apresentam uma faixa estreita de operação, o que torna esta condição difícil e pouco operacional. É importante ressaltar, desde já, que nesta condição em que as curvas operacionais estão posicionadas próximas torna-se difícil uma distinção, dita absoluta, entre modos de transferência. Há uma grande possibilidade de ocorrer transferência intermitente em uma condição que se deseja a transferência em ponte.

Outro aspecto, a susceptibilidade a ocorrência de defeitos, é iminente devido à necessidade de um ajuste fino das condições de soldagem e também parâmetros elétricos como corrente e velocidade de soldagem. Nos ensaios preliminares, observou-se que pouco arame acaba formando gotas grosseiras na extremidade do arame com dificuldade para o destacamento, dificultando o preenchimento da poça. Do contrário, excedendo a velocidade de arame haverá incidência de material sólido no metal de base, de forma a instabilizar o processo, em função de uma vibração na tocha de soldagem (fenômeno *stubby*). Os resultados obtidos corroboram com a afirmação do fabricante em que a alimentação frontal é uma condição mais susceptível a contaminação do eletrodo em função do eletrodo sempre movimentar-se em direção ao arame aumentando principalmente os riscos de contaminação do eletrodo. Além da posição relativa do arame em relação a movimentação do robô, outro aspecto importante consiste na região da poça em que o arame é inserido. Trata-se de uma região muito próxima ao metal de base, onde a poça se encontra em formação. A Figura 21 ratifica esta afirmação. Tal região é chamada de frente de fusão. Não há uma poça fluida com profundidade suficiente que possa auxiliar na fusão do arame pelo próprio calor da poça. Outro autor, Oliveira (30) discute a respeito

da dependência do posicionamento do arame em relação ao centro da coluna de arco plasma. Este autor afirma que o posicionamento incorreto de arame faz com que este atinja uma região periférica do arco, esta mais fria. Por conseguinte, o arame não funde e passa a sofrer contatos com o metal de base, provocando oscilações na tocha de soldagem.

De acordo com as iminentes dificuldades relacionadas a alimentação frontal, verifica-se os resultados na Figura 67 para a condição de alimentação contínua com transferência metálica em ponte.

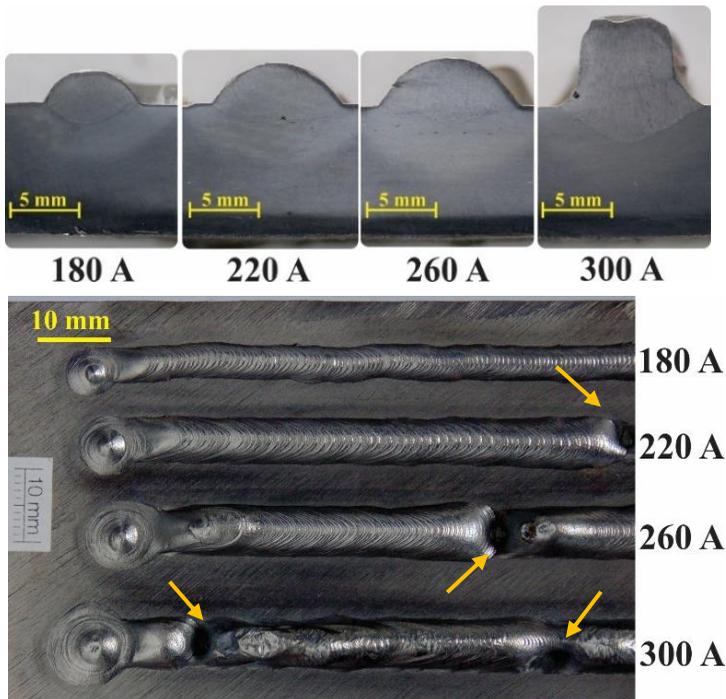


Figura 67 – Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,4 m/min; 220 A – 2,4 m/min; 260A – 3,2 m/min; 300A – 4,0 m/min.

Os resultados ilustram a dificuldade em se estabelecer uma condição com um cordão regular. A Figura 21 ilustra o comportamento da poça na região frontal. O fato do arco deslocar o metal fundido para região traseira da poça dificulta a inserção de arame em uma região de

poça fluida. Este deslocamento de material é causado pela pressão exercida pelo arco sobre a poça o qual gera padrões de fluxo da poça fundida, caracterizando assim a geometria do cordão de solda (45). Outro aspecto, observado durante os ensaios está associado a velocidade de soldagem. Níveis menores que 30 cm/min devem ser estudados posteriormente a fim de analisar o comportamento da alimentação frontal em outras condições pois observou-se a dificuldade de a alimentação de arame acompanhar a movimentação da poça de fusão, de forma que o arame seja inserido na região da poça permitindo um processo estável. Observa-se que para a condições de 220, 260 e 300 A, em algumas regiões a poça de fusão solidificou-se antes do preenchimento da cratera formada pelo arco (indicação em setas amarelas). Como observações finais a partir da análise da condição de alimentação frontal, entende-se que devido à proximidade entre as curvas ótimas torna-se difícil a continuidade da transferência e do perfil de solda O fenômeno observado em que a solidificação ocorre de forma irregular, acarretou na formação de defeito *humping*.

Diferentemente, na condição de transferência intermitente, observou-se a continuidade do cordão durante a execução dos procedimentos, vide Figura 68. No entanto, para a corrente de 220 A verifica-se uma irregularidade na geometria do cordão, fruto da sensibilidade citada quando o arame é inserido pela frente do arco elétrico.

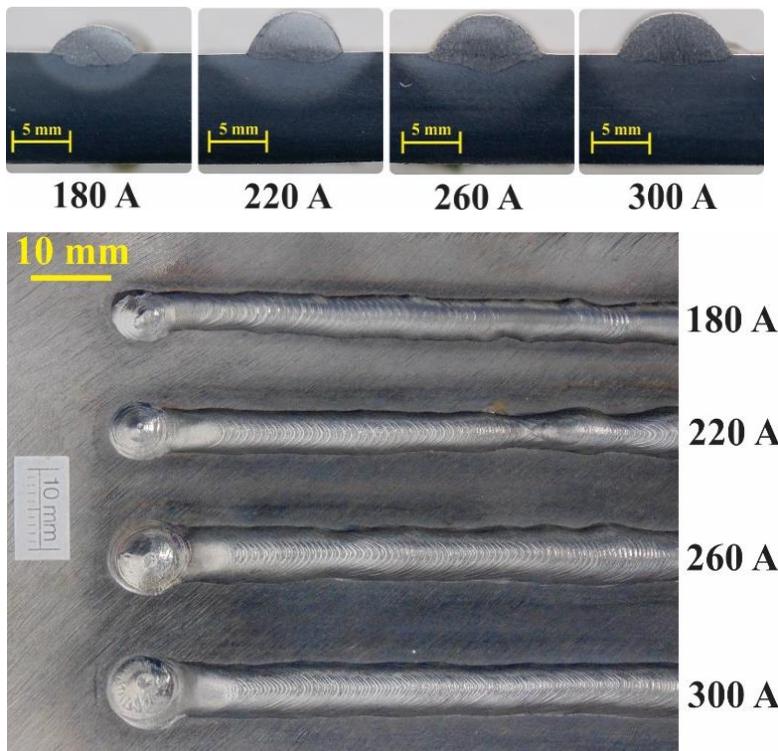


Figura 68 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,3 m/min; 220 A – 2,1 m/min; 260A – 3,0 m/min; 300A – 3,7 m/min.

A estabilidade permitida pela transferência metálica intermitente, torna possível a execução do procedimento em melhores condições. Levanta-se a explicação para a melhor estabilidade do modo intermitente em função do arame alternar momentos em contato direto com a poça (momento de ancoramento do arco diretamente no arame) e momentos fora da poça de fusão (momento de ancoramento do arco diretamente na poça). Esta condição permite ao arco entrar em contato direto com a poça de fusão nos momentos em que o arame está fora da poça, do contrário quando o arame estiver em curto circuito com a poça de fusão ocorrerá a completa fusão e, por conseguinte, a transferência do arame de forma mais estável. A Figura 69 ilustra o fenômeno da transferência metálica intermitente em quatro momentos distintos. Inicia-se com o arame aproximando da poça (I) até o momento em que

rompe a interação (IV). Desta forma, de acordo com o mencionado da morfologia da poça na região frontal, surge a hipótese de que para o caso em que o arame está todo o tempo em contato com a poça de fusão (transferência em ponte) o arame consome muito calor da poça dificultando desta forma fusão completa de arame e, portanto, apresentar um cordão regular e contínuo.

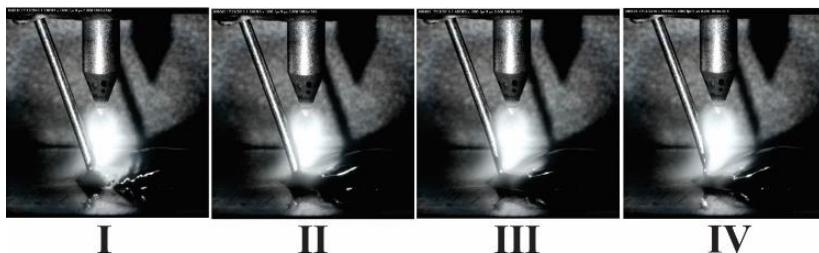


Figura 69 – Ilustração a partir de frames de filmagem de alta velocidade a dinâmica da transferência metálica intermitente na alimentação frontal do processo TIG com alimentação tangencial.

Para a condição de alimentação traseira, o resultado para os limites de taxa de fusão é apresentado na Figura 70.

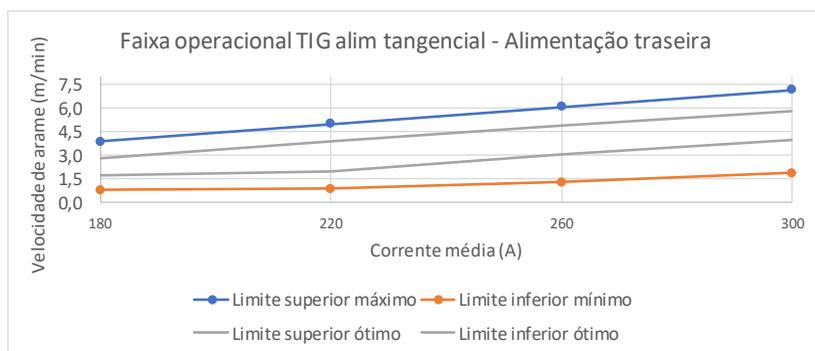


Figura 70 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação tangencial com inserção traseira de arame.

Primeiramente, nota-se a discrepância entre os níveis operacionais da alimentação traseira em relação à frontal. Outro aspecto condiz ao afastamento observado entre as curvas ótimas, evidenciando assim melhor operacionalidade do processo, no sentido que ajustes finos não são tão relevantes quanto na condição de alimentação frontal. Este fato pode ser melhor explicado a partir da Figura 71. Observa-se que

quando ocorre alimentação traseira o arame é adicionado na região central da poça de fusão a qual consiste de uma região de elevada temperatura (além disso, trata-se de uma região de maior volume de metal fundido), diferentemente da alimentação frontal em que o metal de adição é inserido na periferia da poça. Traidia (35) revelou esta característica da poça de fusão em relação a temperatura e também ao volume em resultados de simulação numérica ilustrados pela Figura 21 – [item 3.1.4](#). A proximidade entre a linha do metal de base e a região frontal da poça de fusão incorre nas dificuldades observadas no estabelecimento dos parâmetros.

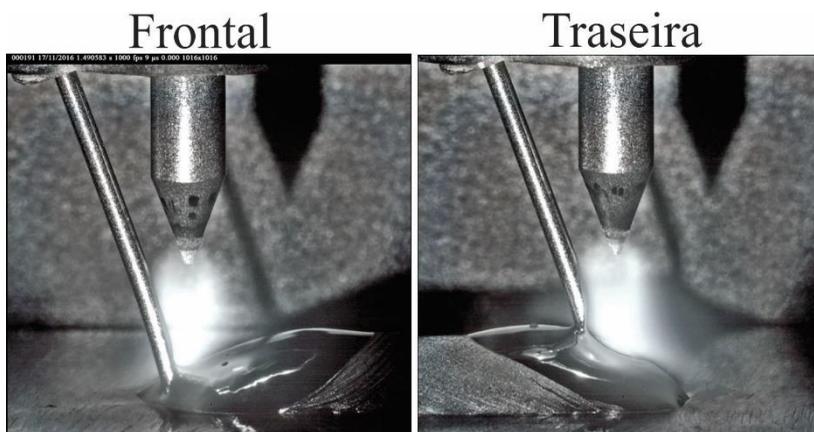


Figura 71 – Indicação do posicionamento do arame em relação a poça de fusão na transferência metálica por ponte nas condições de inserção de arame na região frontal e traseira para o processo TIG com alimentação tangencial.

As macrografias para a condição de alimentação traseira revelam um significativo menor molhamento (maior convexidade) dos cordões no modo de transferência por ponte (Figura 72) em relação aos cordões no modo de transferência intermitente (Figura 73). O contato permanente entre arame e poça de fusão, torna o arame, uma barreira, a ação do arco na poça. Desta forma, supõe-se que esta interação do arco e arame na transferência contínua por ponte interfira diretamente na geometria do cordão, isto é, expondo um cordão com menor molhamento em relação a transferência intermitente. Outro aspecto, é a presença do metal de adição ainda sólido no interior da poça o que tenderia a absorver calor da mesma, em detrimento a própria fusão do arame adicionado. Contudo, as vantagens associadas a transferência por

ponte com alimentação traseira é a possibilidade de atingir os maiores patamares de taxa de fusão deste processo de alimentação tangencial.

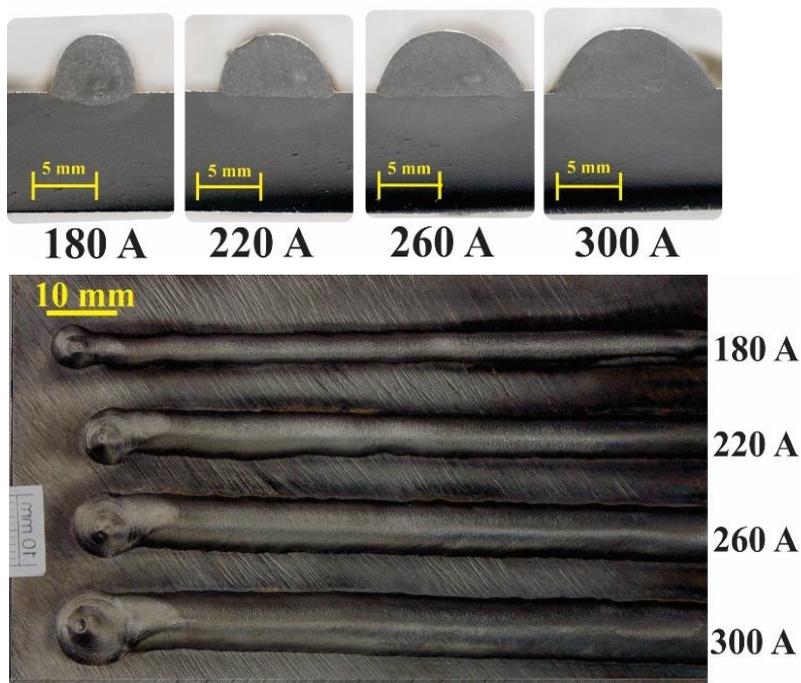


Figura 72 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação traseira (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 2,8 m/min; 220 A – 3,9 m/min; 260A – 4,9 m/min; 300A – 5,8 m/min.

Vale ressaltar que no modo de transferência intermitente, observou-se a formação perfil de penetração *finger shape* a partir da corrente de 260 A. No processo TIG, a depressão na poça é causada pelo fluxo plasma, e a maior evidência é observada a partir do aumento da corrente, logo, há um aumento na velocidade da gota, aumentando assim o perfil de penetração (45).

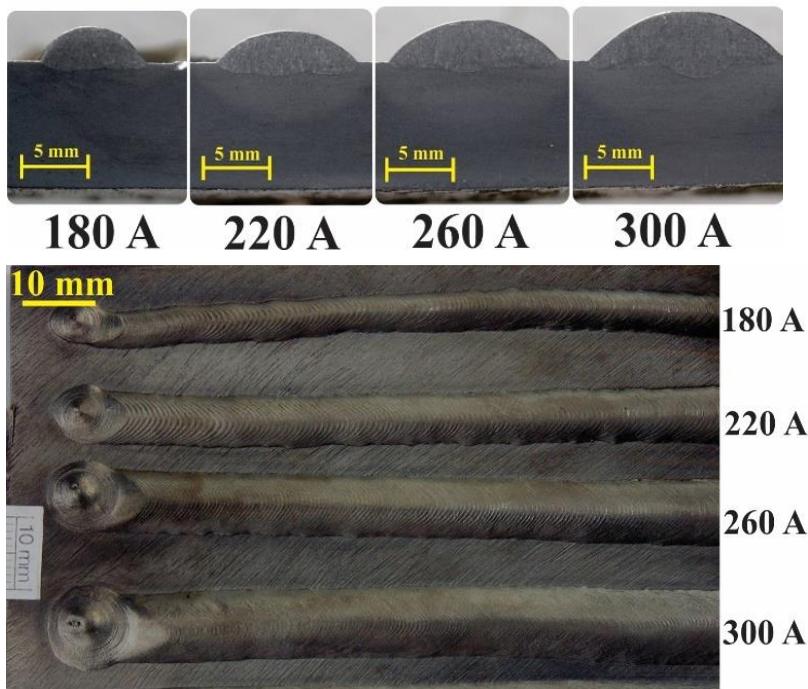


Figura 73 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação traseira (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,7 m/min; 220 A – 2,0 m/min; 260A – 3,1 m/min; 300A – 4,0 m/min.

A alimentação lateral também apresentou resultados satisfatórios (Figura 74), obtendo-se uma larga faixa de operação, mas inferior à alimentação traseira.

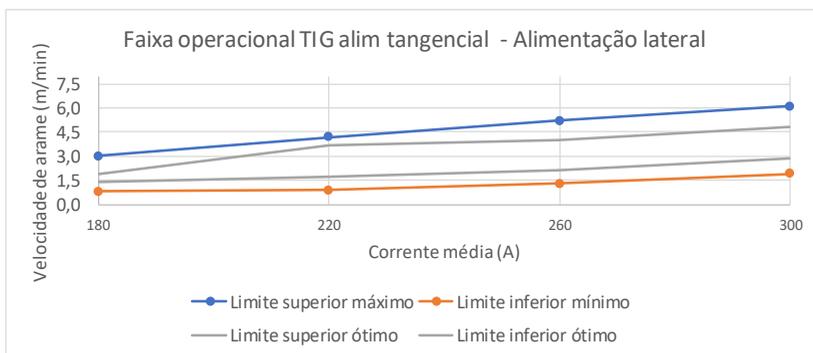


Figura 74 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação tangencial com inserção lateral de arame.

As macrografias da alimentação lateral (Figura 75) apresentaram como característica do perfil de penetração um deslocamento de material para as laterais do cordão. Este fenômeno é mais relevante nas correntes de 180, 220 e 260A. A hipótese para este fenômeno decorre do deslocamento de material ao lado oposto de inserção do arame, local este em que ação do arco seria mais eficiente. As setas em laranja indicam o lado de entrada do arame. Vergara (46) analisa a posição da tocha de soldagem plasma com adição de pó pela região lateral da poça sobre o aspecto superficial do cordão e a qualidade do perfil geométrico. De forma análoga à alimentação tangencial, este autor utiliza alimentação de pó a 30° em relação ao eixo do eletrodo e os resultados evidenciam do fluxo do gás de arraste sobre o arco plasma. Segundo ele, o gás ocasiona um efeito de deflexão do arco, gerando uma geometria irregular do cordão, o que corrobora com o perfil de penetração obtido.

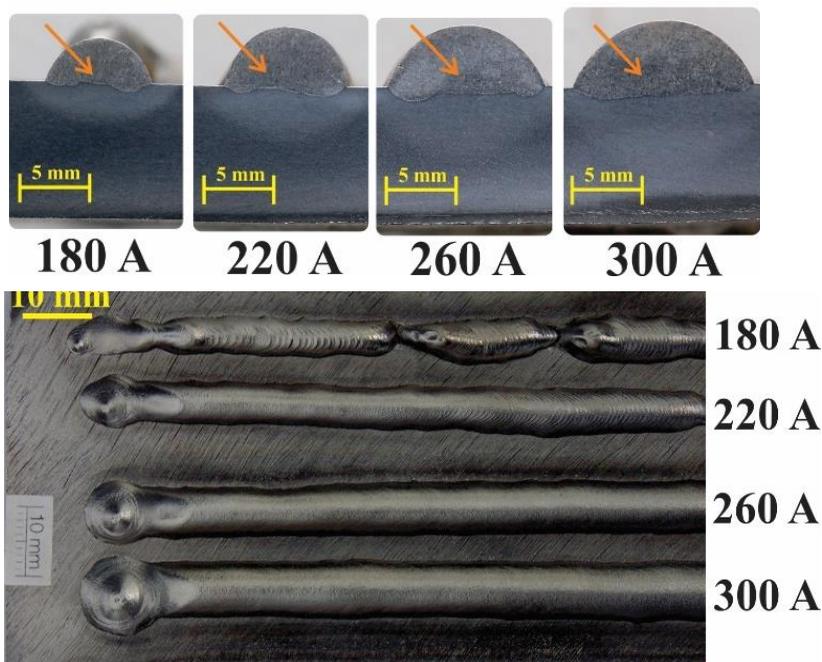


Figura 75 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação lateral (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,9 m/min; 220 A – 3,7 m/min; 260A – 4,0 m/min; 300A – 4,8 m/min.

Observa-se novamente, que a transferência no modo intermitente (Figura 76) de fato evidencia maior molhabilidade em relação a transferência por ponte. Este molhamento mais acentuado sugere-se que esteja relacionado com o deslocamento de material promovido pelo próprio arco. O fato de inserir o arame pela lateral promove um tipo de espalhamento na direção oposta. Esta hipótese é reforçada, quando o comparativo é realizado com a alimentação traseira e também pela Figura 77. Os resultados obtidos pela alimentação lateral apresentaram uma relevância muito maior em termos de molhamento.

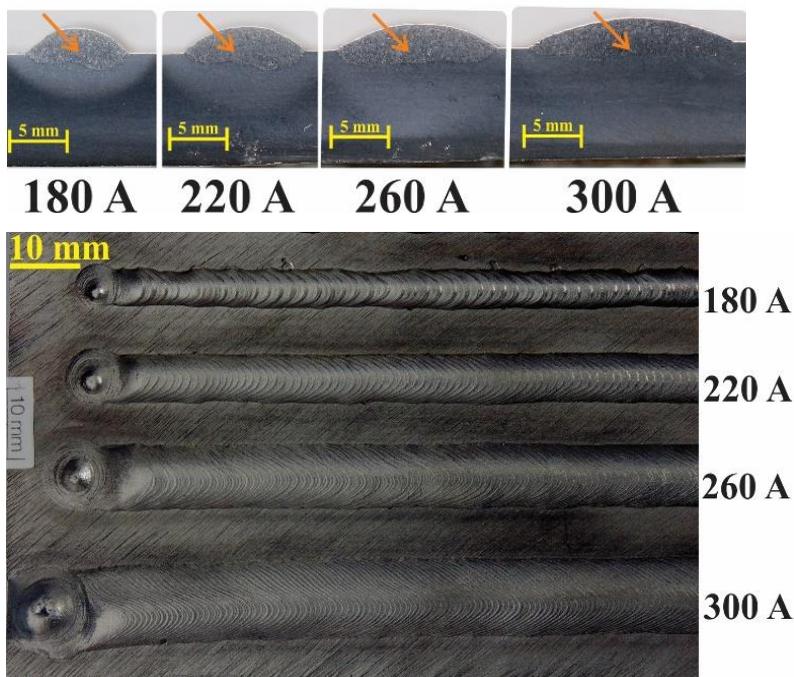


Figura 76 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação lateral (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação tangencial; 180A – 1,4 m/min; 220 A – 1,7 m/min; 260A – 2,1 m/min; 300A – 2,9 m/min.

Para confrontar o resultado de Vergara foi realizado ensaio com alimentação lateral com registro de filmagem em alta velocidade. Observa-se a partir da Figura 77, uma tendência de deslocamento do volume do cordão para o lado oposto a inserção de arame. Este efeito pode caracterizar maior eficiência da ação do arco nesta região, o que pode gerar um perfil assimétrico.

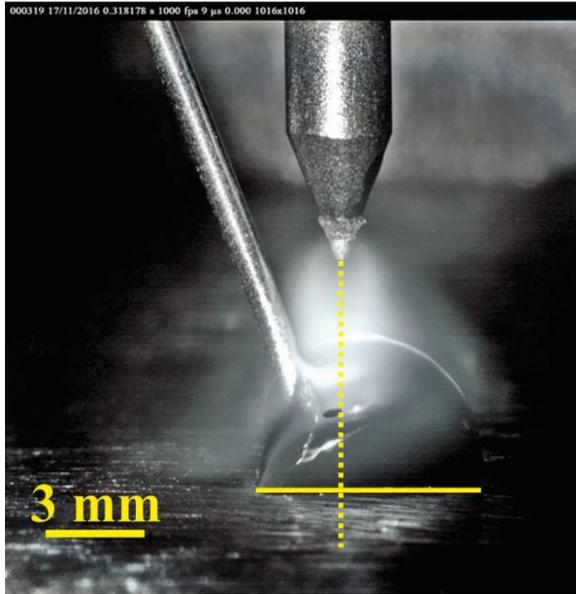


Figura 77 – Ilustração do deslocamento da poça de fusão ao lado oposto de inserção do arame quando ocorre inserção de arame lateral no processo TIG com alimentação tangencial.

### 5.2.2. Ensaios de soldagem, avaliação do perfil geométrico dos cordões e da taxa de fusão no processo TIG com alimentação radial

Esta etapa consiste em avaliar a taxa de fusão para alimentação radial, nas condições de  $45^\circ$  e  $65^\circ$ . Observa-se que os valores de velocidade de arame atingidos são muito menores, além dos limites operacionais ótimos apresentarem uma faixa tão estreita quanto a alimentação frontal do modo de alimentação tangencial. Estes resultados corroboram com o esperado, a influência do ângulo de alimentação é notável. No processo com alimentação radial, o fato do arame ser inserido em isothermas mais externas ao arco, faz com que não ocorra uma ação tão eficiente quanto a alimentação tangencial. A Figura 78 ilustra os níveis de velocidade de arame para as respectivas correntes no processo TIG com alimentação radial ( $45^\circ$ ).

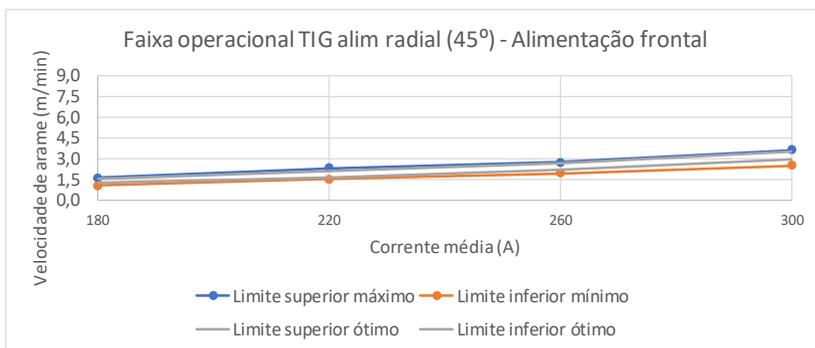


Figura 78 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação radial (45°) com inserção frontal de arame.

Em relação as macrografias para o modo de alimentação em ponte com ângulo de 45° (Figura 79), observa-se um perfil de penetração com maior profundidade para os valores de corrente 180 e 220 A. Para o valor de 260 e 300 A observa-se o deslocamento da penetração para as extremidades do cordão. Este fenômeno é apresentado por Tokar (40) como uma irregularidade oriunda do resfriamento do metal fundido pelo arame mais frio, isto é, sem pré-aquecimento, quando inserido na poça de fusão.

Tal como ocorreu na alimentação tangencial, a corrente de 180 A mostrou-se crítica para a execução de um cordão contínuo e regular além do elevado nível de convexidade na condição de limite superior. Para correntes mais altas, contudo, o processo TIG com alimentação radial apresentou descontinuidades ao longo do cordão. Atribui-se este efeito a maior sensibilidade do processo TIG com alimentação radial a distâncias entre eletrodo arame no que concerne à rigidez do arco elétrico. Tokar (40) afirma que o comprimento do arco tem notória influência sobre esta característica. Contudo, não foi observada esta influência no processo TIG com alimentação tangencial.

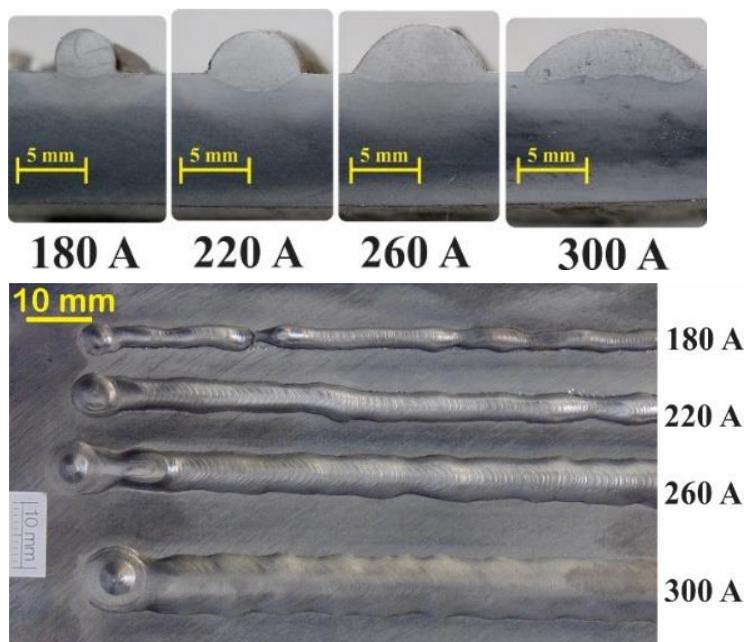


Figura 79 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação radial (45°); 180A – 1,5 m/min; 220 A – 2,1 m/min; 260A – 2,6 m/min; 300A – 3,5 m/min.

Na Figura 79, condição de transferência por ponte, para a corrente de 180 A notou-se que é possível gerar um cordão com geometria regular, apesar dos efeitos (menor rigidez do arco) do comprimento do arco citado por Tokar (40), e o mesmo ocorreu em menor relevância para os outros níveis de corrente. Além da melhor regularidade do cordão observada em relação a transferência em ponte, ocorre um maior molhamento dos cordões para a condição da Figura 80.

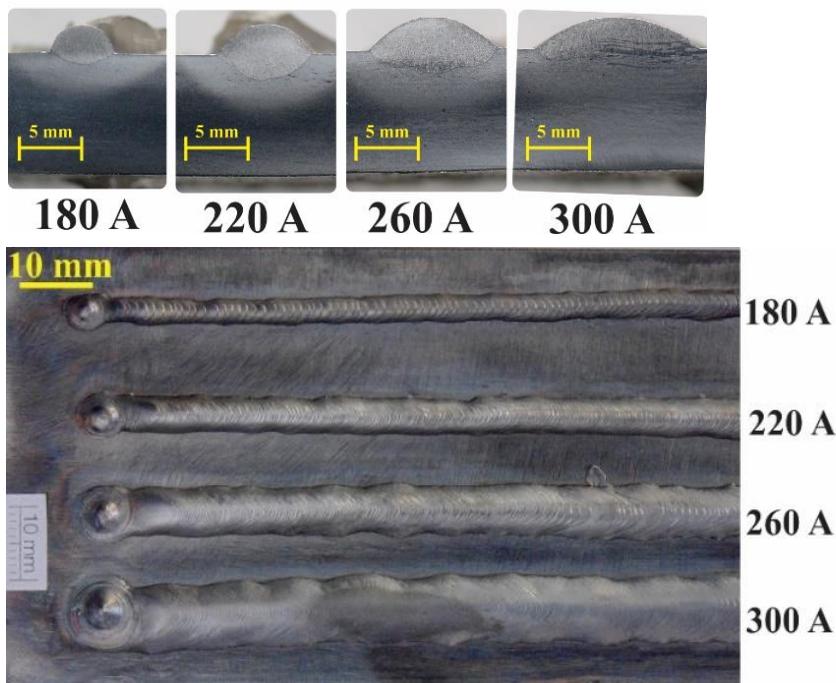


Figura 80 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação radial (45°); 180A – 1,2 m/min; 220 A – 1,6 m/min; 260A – 2,2 m/min; 300A – 2,9 m/min.

Os ensaios na condição com ângulo de 65° tornou-se mais crítico em relação ao posicionamento de arame na poça. Durante a execução dos experimentos observou-se que o limite operacional ótimo coincide com o limite máximo, o que propiciou uma faixa operacional mais estreita (Figura 81).

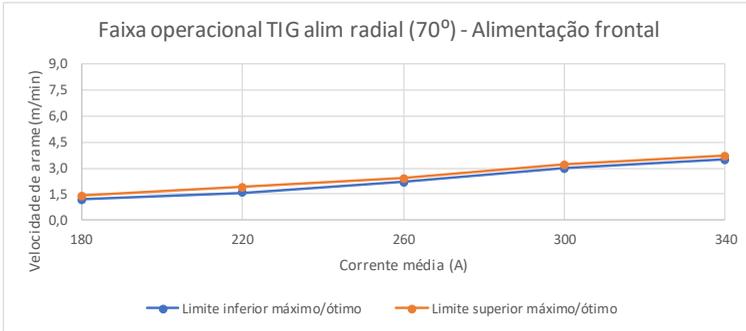


Figura 81 - Curva de velocidade de arame pela corrente média no modo de alimentação radial (65°) com inserção frontal de arame.

A partir das macrografias (Figura 82) observa-se para a corrente de 180 A um perfil com baixa molhabilidade. Para 220 A, um perfil de penetração não uniforme em que a maior quantidade de material se apresentou assimétrica. Este perfil justifica-se motivado por um possível deslocamento da inserção de arame na poça, isto é, a entrada de arame não se deu no meio da poça de fusão. No mesmo sentido, observa-se para a condição de 260 e 300 A um perfil de penetração característico quando o material adentra a região central da poça reiterando resultados de Tokar (40). A autora associa a ocorrência deste tipo de perfil de penetração à posição de inserção do arame na poça de fusão. A explicação está relacionada a geração de um “efeito sombra” pelo arame o que impede a ação direta do arco sobre poça de fusão.

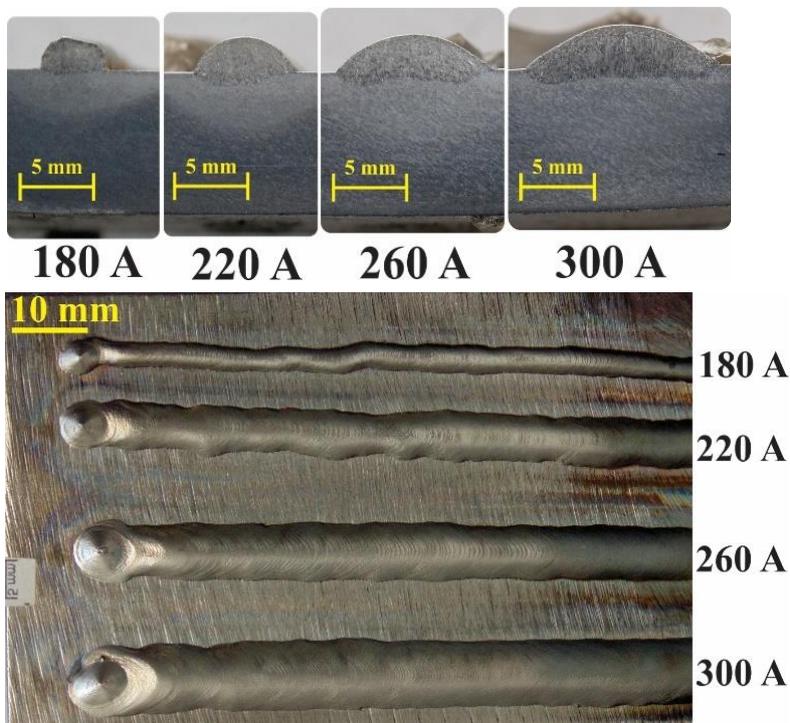


Figura 82 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica em ponte) no processo TIG com alimentação radial (65°); 180A – 1,4 m/min; 220 A – 1,9 m/min; 260A – 2,4 m/min; 300A – 3,2 m/min.

Da mesma forma, o fenômeno (perfil de penetração menor na região da poça em que o arame é inserido) ocorrido na condição de transferência metálica em ponte foi observado no modo de transferência metálica intermitente (Figura 83).

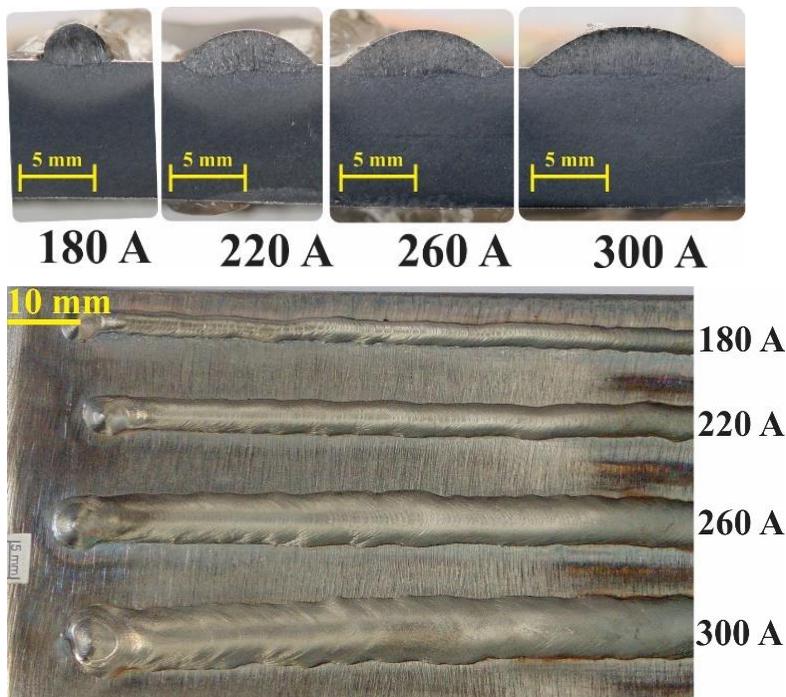


Figura 83 - Macrografias e cordões sobre chapa da condição de alimentação frontal (Transferência metálica intermitente) no processo TIG com alimentação radial (65°); 180A – 1,2 m/min; 220 A – 1,6 m/min; 260A – 2,2 m/min; 300A – 3,0 m/min.

Após a análise destas condições para a alimentação tangencial e radial plotou-se a sobreposição das curvas de velocidade de alimentação ótima máxima para cada posição de alimentação (Gráfico 14). A partir dos resultados, a melhor condição de taxa de fusão ocorreu para a inserção de arame por trás do arco no processo TIG com alimentação tangencial, seguido da alimentação lateral e alimentação frontal no mesmo processo. Atribui-se os resultados desta técnica de inserção de arame tangencial a dois fatores fundamentais: primeiramente, ao ângulo de alimentação de arame, o qual sua influência sobre o modo de alimentação radial é confirmada pelos patamares de velocidade de arame alcançados e outro aspecto que se mostrou bastante relevante consistiu no direcionamento do arame diretamente na poça de fusão (a melhor condição trata-se da região central da poça, isto é, quando ocorre a alimentação traseira), garantindo maior estabilidade ao processo, além da maior taxa de fusão. As condições mais críticas foram para a

condição de TIG alimentação radial a 45° seguida por último pelo ângulo de 65°. Estes resultados ratificam a real influência do ângulo de inserção de arame em relação ao eixo do eletrodo. Corroborando a estes resultados, Bonarcorso conclui que foi possível aumentar em cerca de 23% a taxa de fusão além de possibilitar a realização de depósitos em situações de soldagem fora de posição com segurança quando alterou o ângulo de entrada de arame de 70° para 30° (processo plasma com adição de arame). Este autor afirma, que a partir da mudança do ângulo foi possível garantir a direta inserção do arame na poça de fusão, tal como ilustrado na Figura 21.

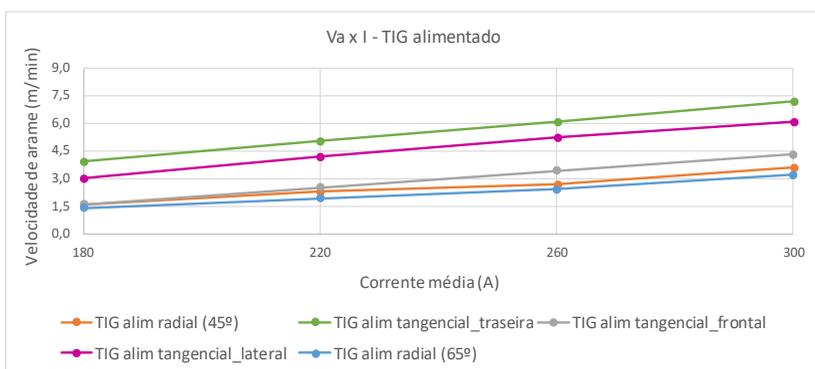


Figura 84 – Comparativo entre as condições de inserção de arame tangencial e radialmente ao arco.

### 5.2.3. Ensaios de soldagem processo MIG/MAG e comparação da taxa de fusão dos processos TIG e MIG/MAG

Inicialmente para esta etapa foram realizados ensaios com o processo MIG/MAG a fim de compará-lo posteriormente com o processo TIG. A curva Va x I (Figura 85) abaixo ilustra os resultados para o processo MIG/MAG.

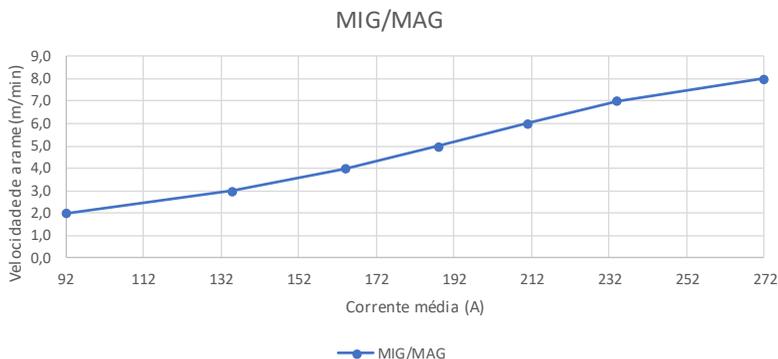


Figura 85 – Curva de corrente média pela velocidade de arame no processo MIG/MAG convencional.

Após a conclusão dos experimentos com o processo MIG/MAG foi possível compara-los em relação ao TIG. Como era esperado, o processo apresentou boa estabilidade e consequentemente gerando cordões regulares. A partir da velocidade de arame de 5 m/min foi aplicado o modo de transferência metálica por curto circuito forçado. Para a análise comparativa foram utilizados os resultados nas condições de injeção de arame por trás (melhor condição da alimentação tangencial) e pela frente para a condição de alimentação radial (45°). Posto isso, plotou-se os gráficos  $V_a \times P$  (Figura 86) e  $V_a \times I$  (Figura 87), comparando-se os resultados entre processos.

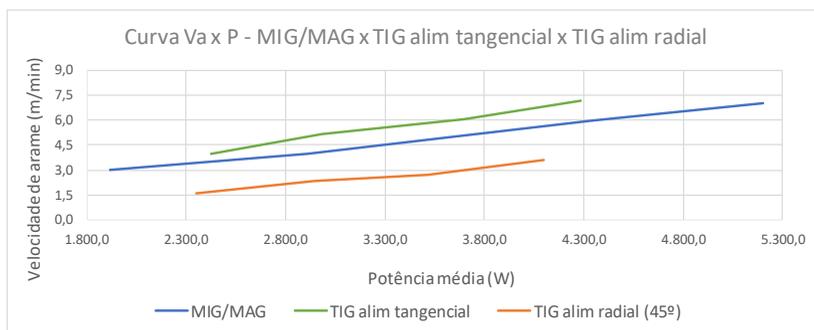


Figura 86 – Comparativo entre processos no que concerne ao parâmetro de potência média; Condição de alimentação traseira no TIG com alimentação tangencial e alimentação frontal no TIG com alimentação radial (45°).

Analisando os resultados a partir do parâmetro de potência média (Figura 86), nota-se que a curva para o modo de alimentação

radial com injeção de arame frontal não se aproxima da técnica MIG/MAG, posicionando-se abaixo desta. Porém, a alimentação tangencial com inserção de arame por trás do arco, revela-se acima da curva do MIG/MAG. Este resultado reforça a hipótese de que o processo TIG com alimentação tangencial apresenta maior taxa de fusão, no entanto, baseando-se no parâmetro de potência. Todavia, quando se analisa a taxa de fusão sob o ponto de vista da corrente média os resultados são bastante diferentes, vide Figura 87.

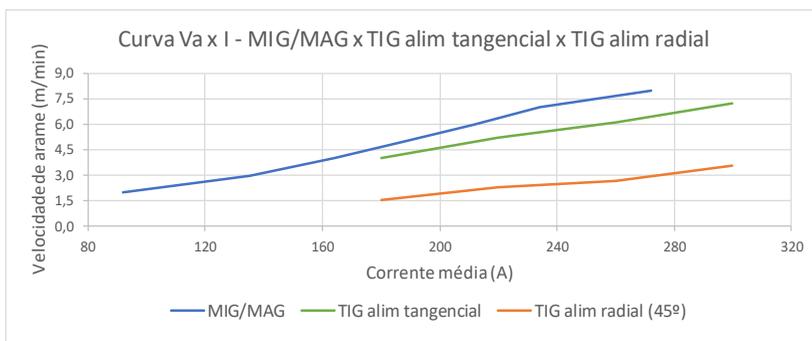


Figura 87 - Comparativo entre processos no que concerne ao parâmetro de corrente média; Condição de alimentação traseira no TIG com alimentação tangencial e alimentação frontal no TIG com alimentação radial (45°).

Apesar da sutil diferença entre os resultados do processo MIG/MAG e TIG com alimentação tangencial, estes eram esperados em função das contribuições para fusão de arame no processo MIG/MAG. Além do aquecimento anódico, tem-se o efeito Joule, o que não ocorre no processo TIG, que também funde material por aquecimento anódico, no entanto, a outra parte da energia é perdida em função do aquecimento do eletrodo não consumível. Segundo levantamento e formulação empírica de Lesnewich a maior contribuição para fusão de material no processo MIG em relação ao TIG está associada ao efeito Joule que com que o processo atinja maiores níveis de deposição de material. A partir deste estudo de Lesnewich, recentemente Paes (47) fez um estudo numérico a respeito da influência dos efeitos de aquecimento anódico e Joule no arame de adição para o processo MIG/MAG. Este autor mostrou que a influência do efeito Joule pode atingir pouco mais de 40% da capacidade de fusão do metal de adição.

Desta forma, a partir dos resultados encontrados o processo de soldagem TIG com alimentação tangencial, apresentou como principal vantagem o aumento da taxa de fusão de arame principalmente quando

em comparação com o processo com alimentação radial e equiparando-se ao processo MIG/MAG.

Vale ressaltar a característica operacional que distingue o processo por alimentação radial do processo com inserção tangencial. Atualmente são comercializados sistemas que permitem adição de arame pré-aquecido no modo radial, o que não ocorre para o modo tangencial. Apesar desta característica, esta última técnica dispõe das características inerentes ao processo TIG como a variedade de materiais possíveis para aplicação industrial, uniformidade de características metalúrgicas, ausência de fumos, respingos além da possibilidade de operacionalização sem inserção de arame.

## 6. CONCLUSÕES

- O processo com alimentação tangencial apresenta-se como promissor em aplicações com diferentes posições de inserção de arame (frontal, traseira e lateral), o que não ocorre para o processo com alimentação radial (elevado grau de alteração na forma do cordão). A inviabilidade do uso multidirecional da alimentação radial (convencional) também se dá pela elevada solicitação que seria imposta sobre o sistema de mecanização.
- É possível também concluir que, sem prejuízo para a estabilidade da soldagem, é possível manipular, de maneira refinada a geometria da seção transversal da solda pela atuação sobre a posição de inserção do arame, sem alteração de outros parâmetros de soldagem. Este aspecto pode ser atrativo em juntas e passes delicados, como passes de raiz;
- O ângulo de alimentação mostrou grande influência tanto na taxa de fusão, como na capacidade de operacionalização nas diferentes posições; sendo que o modo tangencial foi superior em ambos os casos. Quando comparado ao processo TIG com alimentação radial, houve um ganho médio de 113% na taxa de fusão para a alimentação tangencial (coldwire). Quando comparado ao processo MIG/MAG (em termos de potência) o processo TIG com alimentação tangencial (alimentação traseira) apresentou ganho médio de 20% na taxa de fusão.
- Os parâmetros DEA (distancia eletrodo-arama) e DEP (distancia eletrodo-peça) apresentaram grande influência sobre a taxa de fusão no processo TIG com alimentação tangencial. Para um mesmo valor de DEP, a partir da alteração da DEA foi possível um ganho médio de 30% na velocidade de arame;
- Para o melhor aproveitamento, em relação a estabilidade do processo, transferência metálica, e maior taxa de fusão, recomenda-se a utilização da técnica com alimentação tangencial com inserção de arame por trás do arco.
- Quando utilizado o modo de transferência metálica intermitente, é possível garantir maior molhabilidade dos cordões;
- O perfil térmico da peça (resultante do perfil térmico da poça) sofre impacto da posição de inserção de arame, o que deve ser considerado em aplicações simétricas, como juntas chanfradas,

principalmente passe de raiz, para garantia de penetração e fusão consistentes;

- Conclui-se, a partir da avaliação experimental realizada e dos testes realizados em corpo de prova em simulação prática, que há potencial no uso da técnica de alimentação tangencial no desenvolvimento de equipamentos para soldagem em aplicações de revestimento metálico voltadas para a indústria de Petróleo e Gás;
- Estabeleceu-se infraestrutura (fonte de soldagem com capacidade aumentada, integração com robô antropomórfico e protótipo de tocha de soldagem inovadora), sendo que a expansão de capacidade de potência do sistema permite maior flexibilidade e gama de aplicações passíveis de investigação com o processo TIG com alimentação tangencial de arame.

## 6.1. TRABALHOS FUTUROS

As conclusões acima justificam a continuidade dos trabalhos no processo TIG com alimentação tangencial. De acordo com as aplicações em vista, são estabelecidos diretivas e sugestões de responsabilidades futuras. Seguem:

- Pesquisa e Desenvolvimento (P & D) direcionado para aplicações fora de posição (horizontal, vertical e sobre cabeça), com finalidade de averiguar potencialidades do processo principalmente na indústria de Petróleo e Gás visando união de dutos (passe de raiz);
- P & D comparativo em relação ao processo TIG alimentado com arame pré-aquecido (*hotwire*), com finalidade de avaliar as potencialidades em termos de taxa de fusão de ambos os processos;
- P & D direcionado para aplicações voltados para a Manufatura Aditiva, verificando as potencialidades (vantagens e desvantagens) em relação a processos difundidos na área (MIG/MAG CMT);
- P & D direcionado para o estudo da variante com alimentação dinâmica do processo TIG com alimentação tangencial; averiguar as vantagens e desvantagens de utilização desta técnica frente a alimentação contínua constante;

- P & D direcionado para o estudo do processo TIG com injeção de arame em diferentes ângulos reduzidos a partir de um protótipo já desenvolvido no próprio laboratório.



## REFERÊNCIAS

1. Hoyle D. ISO 9000: quality systems handbook. 2001.
2. Srinivasan S, Ikuma LH, Shakouri M, Nahmens I, Harvey C. 5S impact on safety climate of manufacturing workers. *J Manuf Technol Manag.* 2016;27(3):364–78.
3. Sari AD, Rahmillah FI, Aji BP. Implementation of 5S Method for Ergonomic Laboratory. In: 5th International Conference on Manufacturing, Optimization, Industrial and Material Engineering. 2017.
4. Nallusamy S, Ahamed A. Implementation of Lean Tools in an Automotive Industry for Productivity Enhancement-A Case Study. In: *International Journal of Engineering Research in Africa.* 2017. p. 175–85.
5. Global Institute M. A future that works: automation, employment and productivity. McKinsey Global Institute. 2017.
6. Lobo ACO. Qualidade e produtividade. 2003;
7. Renor T. Brasil Offshore chama a atenção do petróleo no mundo [Internet]. 2017 [cited 2017 Jan 1]. Available from: <http://www.tribunaj.com.br/brasil-offshore-chama-a-atencao-do-petroleo-no-mundo/>
8. PETROBRAS. Planos de Negócio e Gestão [Internet]. 2016 [cited 2017 Jan 1]. Available from: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia/plano-de-negocios-e-gestao/>
9. Kindermann RM. Soldagem orbital do passe de raiz. 2016;
10. Meller RN, Marques C, Gonçalves e Silva RH, Dutra JC. Automação da soldagem de elementos componentes da árvore de natal. In: Congresso Nacional de Soldagem [Internet]. 2015. Available from: <http://www.labsolda.ufsc.br/index.php/public/artigos/congressos/383-automacao-da-soldagem-de-elementos-componentes-da-arvore-de-natal-modulo-de-extracao-de-petroleo-offshore>
11. Machado R da S, Marques C, Viviani AB, Gonçalves e Silva RH. Revestimento por soldagem fora de posição em painéis de caldeiras termoeletricas - MIG/MAG pulsado versus convencional. In: Congresso Nacional de Fabricação. 2017.
12. Lucas RP, Dutra JC, Bonacorso NG. Sistema de geração de trajetórias em manipulador cartesiano para aplicações na soldagem naval. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2012.
13. Bonacorso NG, Dutra JC, Hemmer MH, dos Santos DE. Desenvolvimento de uma célula de fabricação automatizada para soldagem MIG/MAG dos componentes estruturais das rodas metálicas de tratores agrícolas. In: Congresso Nacional de

- Soldagem. 2011.
14. Manz A. Consumable electrode arcless electric working. Google Patents; 1964.
  15. Ueguri S, Tabata Y, Shimizu T, Mizuno T. A study on control of deposition rate in hot-wire TIG welding. *Yosetsu Gakkai Ronbunshu*. 1986;4(4):678–84.
  16. Delgado LC. Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame. Universidade Federal de Santa Catarina; 2000.
  17. Gomes Nunes Silva R. Caracterização do processo de soldagem TIG com alimentação de arame dinâmica em alta frequência. 2017.
  18. Paes LE dos S. Soldagem TIG orbital: técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade. 2016;
  19. Wilson M. TIP TIG: new technology for welding. *Ind Robot An Int J*. 2007;34(6):462–6.
  20. Opderbecke T, Guiheux S. TOPTIG: robotic TIG welding with integrated wire feeder. *Weld Int*. 2009;23(7).
  21. Jackson CE. The science of arc welding. Internal document of the Union Carbide Corporation, No. 52–501, also published in the *Weld J*. 1960;
  22. Lancaster JF. The physics of welding. *Phys Technol*. 1984;15(2):183.
  23. Spille-Kohoff A. Arc Welding: From Process Simulation to Structural Mechanics Part I: Process Simulation with ANSYS CFX. *EASC 2009 4th Eur Automot Simul Softw*. 2009;
  24. Panasonic. Panasonic Introduce TAWER-TIG, an Adaptable High Speed TIG Welding Solution [Internet]. 2007 [cited 2017 Oct 16]. Available from: <https://www.panasonicfa.com/content/panasonic-introduce-tawers-tig-adaptable-high-speed-tig-welding-solution>
  25. Yin X, Gou J, Zhang J, Sun J. Numerical study of arc plasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic fields. *J Phys D Appl Phys*. 2012;45(28):285203.
  26. Díaz VV, Cortes JM, Alvarez AE. A contribution to the study of the cold wire TIG process in the flat, horizontal and overhead position with new torch designs and wire feed methodologies. *Weld Int*. 2017;31(6):415–24.
  27. Menezes VGS de. Estudo comparativo entre técnicas de alimentação de arame no processo tig. 2016;
  28. Pigozzo IO. Soldagem TIG Orbital:: Otimização de Equipamentos e Prospecções tecnológicas para Procedimentos de Passe de Raiz. Universidade Federal de Santa Catarina; 2015.
  29. Direne Filho H. Estudo do processo de soldagem TIG com alimentação automática de topo visando aplicações de alta

- produtividade. 2011.
30. Oliveira MA de. Estudo da soldagem plasma com alimentação automática de arame para aplicação em revestimentos metálicos. 2001;
  31. Riffel KC, Paes LE dos S, Gonçalves e Silva RH, Schwedersky MB, Andrade JF. Projeto de um Dispositivo Direcionador para Melhor Ajuste da Posição do Arame na Soldagem GTAW Orbital Mecanizada. In: Consolda. 2016.
  32. Borne A, Fortain J-M. Wire-guide/nozzle assembly for a robotic TIG welding torch. Google Patents; 2006.
  33. Shipilov A V, Erofeev VA, Poloskov SI. Determination of the optimum conditions of melting of filler wire in automatic orbital welding of steel pipelines. *Weld Int.* 2013;27(5):397–402.
  34. Tsai MC, Kou S. Electromagnetic-force-induced convection in weld pools with a free surface. *Weld J.* 1990;69(6):241s–246s.
  35. Traidia A. Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools. Ecole Polytechnique X; 2011.
  36. Bonarcoso NG. Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando a recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA; 2004.
  37. Schwedersky MB. Um estudo da eficiência e produtividade dos principais processos de soldagem a arco. 2011;
  38. Sartori F. Tecnologias e técnicas modernas do processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos. 2016;
  39. IMC Soldagem. IMC Soldagem.
  40. Tokar A. Efeito dos parâmetros de pulsação no processo TIG sobre a formação da poça de fusão. 2011;
  41. ABNT. Ensaios não destrutivos - Termografia - Terminologia. 2006. p. 6.
  42. Godinho C, Gonçalves e Silva RH, Schwedersky MB. Estudo comparativo entre a injeção tangencial e transversal de arame do processo TIG. In: Consolda. 2016.
  43. The Welding Institute. Welding of nickel alloys - Part 1 [Internet]. [cited 2017 Oct 3]. Available from: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-nickel-alloys-part-1-107/>
  44. NDT Resource Center. Radiography Interpretation - Welds [Internet]. [cited 2017 Sep 29]. Available from: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>
  45. Kou S. *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons; 2003.
  46. Vergara Díaz VM. Inovação do equipamento e avaliação do

- processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para soldagem fora de posição. 2005;
47. Paes LE dos S, Barbosa RC, Sartori F, Dutra JC, Gonçalves e Silva RH. Avaliação dos efeitos decorrentes do aumento da extensão sólida de arame-eletrodo (stick-out) - Processo MIG/MAG Convencional com transferência por vô livre. In: Consolda. 2015.