

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL GOMES NUNES SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM
ALIMENTAÇÃO DE ARAME DINÂMICA EM ALTA FREQUÊNCIA**

FLORIANÓPOLIS

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL GOMES NUNES SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM
ALIMENTAÇÃO DE ARAME DINÂMICA EM ALTA FREQUÊNCIA**

Trabalho de Graduação apresentado
ao Curso de Engenharia de Materiais
da Universidade Federal de Santa
Catarina como parte dos requisitos
para obtenção do título de
Engenheiro de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva

FLORIANÓPOLIS

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL GOMES NUNES SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG COM
ALIMENTAÇÃO DE ARAME DINÂMICA EM ALTA FREQUÊNCIA**

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof.^a Sônia Maria Hickel Probst, PhD.
Coordenadora do Curso

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M. Eng.
Professor da Disciplina

Comissão Examinadora

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.
UFSC
Orientador

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr.
UFSC

Cleber Marques
M. Eng.

Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu irmão e ao Sleep, por todo amor e incentivo que deles já recebi, espero um dia poder retribuí-los a altura.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Instituto de Soldagem e Mecatrônica LABSOLDA por todo o suporte e acolhimento em todos esses anos de trabalho, e em especial aos professores Dr. Jair Carlos Dutra, Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva e Dr. Mateus Barancelli Schwedersky por todo o conhecimento a mim repassado e por fazer do LABSOLDA esse ambiente de imenso crescimento intelectual a todos os alunos.

A toda equipe do LABSOLDA, graduandos, mestrandos, doutorandos e funcionários com quem pude trocar conhecimento e experiência durante os cinco anos de bolsista de graduação.

Gostaria de agradecer a todos que compartilharam esse período de graduando universitário. O meu crescimento pessoal e profissional se deve também a vocês.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia de Materiais e aos seus antigos e atuais membros. Tenho enorme orgulho de ter feito parte dessa família.

A Coordenadora do curso de graduação de Engenharia de Materiais, Prof.^a Sônia Hickel Probst, por lutar tanto para tornar o curso cada dia melhor.

A minha namorada, Andjara Consentino, pelo todo amor, carinho e motivação demonstrados diariamente.

Gostaria de agradecer por último e mais importante, à minha família. Sem pensar nas dificuldades, sempre me apoiaram incondicionalmente em todas as minhas decisões, mesmo nas mais incertas. Todas as minhas conquistas são de vocês. Obrigado!

A todos estes, o meu mais sincero agradecimento!

Resumo

Com a crescente demanda do mercado pela utilização de processos de soldagem com alta qualidade metalúrgica e elevada produtividade, tem-se uma procura cada vez maior por adaptações em modalidades do processo TIG convencional. Neste cenário, técnicas comercialmente utilizadas como pré-aquecimento de arame (*Hot Wire*) e alimentação de arame tangencial e dinâmica em baixa e em alta frequência buscam promover os benefícios de produtividade almejados, aliados com a qualidade metalúrgica e operacional já existente, e até mesmo reforçando essas características. Neste contexto, o presente trabalho abordou a comparação entre a alimentação dinâmica em alta frequência e alimentação contínua, buscando compreender e avaliar suas particularidades. Para o estudo da adição de arame realizada em alta frequência foi utilizado o equipamento da empresa TIP TIG, para o qual promoveu-se uma ampla avaliação do comportamento mecânico de seu sistema de alimentação de arame. Utilizando-se de sistemas automáticos de movimentação de tocha de soldagem, bem como sistemas de filmagem de alta velocidade e câmeras termográficas, foram avaliadas: as consequências do posicionamento do arame em relação ao arco de soldagem; a utilização ou não do pré-aquecimento de arame; a forma de alimentação (dinâmica ou contínua); bem como, o tipo de transferência do material de adição (por ponte ou destacada). Com isso, foram gerados subsídios para a escolha de parâmetros para aplicações em processos de soldagem, seja em revestimento, passe de raiz, passe de preenchimento ou passe de acabamento. Por fim, foi realizada uma caracterização de procedimentos semiautomáticos evidenciando a boa operacionalidade do processo com alimentação dinâmica de arame e em aplicação de preenchimento de chanfro de aço com liga de Inconel 625. De maneira geral, os resultados comprovam que as inovações do processo de soldagem TIG contribuem para uma maior facilidade de aplicação e uma maior qualidade nos procedimentos de soldagem.

Palavras-chave: TIG, TIP TIG, alimentação dinâmica de arame, alimentação dinâmica em alta frequência, *Hot Wire*, *Cold Wire*, soldagem de revestimento

Abstract

The increasing of the market's demand surrounding high metallurgical quality and high productivity of welding process, comes along the need for the adaptations in terms of conventional GTAW process. In this scenario, techniques commercially used such as pre-heating wire, as known as Hot Wire, tangential wire feed and dynamic in high and low frequency wire feed, provide the productivity benefits targeted, along with the metallurgical and operational quality existing, even enhancing these characteristics. In this context, the present work addressed the comparison between the high frequency dynamic wire feed and the continuous wire feed, aiming to understand and evaluate its features. For the high frequency dynamic wire feed study was used the TIP TIG's equipment in which was performed an extensive evaluation of mechanical behavior of its wire feed system. Using automated moving systems of welding torch, high-speed recording system and thermographic camera were evaluate: the impact of the wire positioning regarding the welding arc; the doubt in using or not the pre-heating wire feed; the type of wire feed (dynamic or continuous); also the metal transfer type (bridge and drop transfer), putting together information necessary for choosing parameters for applications in the welding process, such as coating, root pass, filling pass, and cap pass. Finally, a characterization of semiautomatic procedures indicated good operability of the process with dynamic wire feeding and steal chamfer filling with Inconel 625 alloy application. Overall, the results shown that the innovations of the GTAW welding process contribute to an easier application and greater quality in the welding procedures.

Keywords: GTAW, TIP TIG, dynamic wire feed, high-frequency dynamic wire feed, *Hot Wire, Cold Wire, cladding welding*

Lista de Figuras

FIGURA 1 - CURVA DE TENSÃO X CORRENTE DO ARCO TIG PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE O ELETRODO E PEÇA; B) CURVA TENSÃO X COMPRIMENTO DO ARCO TIG [5].	20
FIGURA 2 - SOLDAGEM TIG SEM ALIMENTAÇÃO DE MATERIAL. FONTE: DISPONÍVEL EM WWW.EWM-GROUP.COM.....	21
FIGURA 3- CORDÃO SOBRE CHAPA REALIZADO COM O PROCESSO TIG COM ELEVADA CORRENTE, EVIDENCIANDO A PRESENÇA DE HUMPING. [7]	22
FIGURA 4 - TOCHAS DE SOLDAGEM TIG REALIZADAS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME AUTOMÁTICA, COM O USO DE DISPOSITIVOS ACOPLADOS E NÃO ACOPLADOS Á TOCHA DE SOLDAGEM, RESPECTIVAMENTE.	22
FIGURA 5 - SOLDADOR EXECUTANDO SOLDAGEM TIG COM A UTILIZAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME DE FORMA MANUAL.	23
FIGURA 6 - TAXAS DE DEPOSIÇÃO QUE PODEM SER ALCANÇADAS COM O PROCESSO TIG HOT-WIRE COMPARADA COM O TIG COLD-WIRE.	24
FIGURA 7 - MODOS DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME COM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME - HOT WIRE (A), E SEM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME - COLD WIRE (B).	24
FIGURA 8 - ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA (A) E DINÂMICA (B) DE ARAME NO PROCESSO TIG.....	25
FIGURA 9 - SISTEMA DE OSCILAÇÃO DE ARAME DO PROCESSO TIP TIG.	25
FIGURA 10 - VARIAÇÃO DO PERFIL DE PENETRAÇÃO COM A ALTERAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO EM SOLDAGEM DE AÇOS [7].	26
FIGURA 11 - FONTE DE SOLDAGEM WIG 500i DC PULSE, DO FABRICANTE JÄCKLE.	27
FIGURA 12 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO PORTÁTIL (SAP). FONTE: DISPONÍVEL EM WWW.IMCSOLDAGEM.COM.BR.....	28
FIGURA 13 - CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE. FONTE: DISPONÍVEL EM IDTVISION.COM/IMAGING/YSERIES.PHP.	28
FIGURA 14 - CÂMERA INFRAVERMELHA SC7200 F/3, FABRICADO PELA EMPRESA FLIR.....	29
FIGURA 15 - BANCADA DE ENSAIOS UTILIZADA PARA OS ENSAIOS COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E CONTÍNUA COM AQUISIÇÃO DE DADOS E FILMAGEM TÉRMICA. A) FONTE DE SOLDAGEM, B) TRACIONADOR DE ARAME, C) MANIPULADOR ROBÓTICO, D) TOCHA DE SOLDAGEM E DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME, E) CORPO DE PROVA, F) GÁS DE PROTEÇÃO, G) SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS SAP, H) SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE FILMAGEM TÉRMICA, I) CÂMERA INFRAVERMELHA.	29
<i>FIGURA 16- BANCADA DE ENSAIOS UTILIZADA PARA OS ENSAIOS COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E CONTÍNUA COM AQUISIÇÃO DE DADOS E FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE. A) FONTE DE SOLDAGEM, B) TRACIONADOR DE ARAME, C) MANIPULADOR ROBÓTICO, D) TOCHA DE SOLDAGEM E DISPOSITIVO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME, E) CORPO DE PROVA, F) GÁS DE PROTEÇÃO, G) SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE, H) DISPOSITIVO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS, I) CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE.</i>	30
FIGURA 17 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIP TIG.....	33
FIGURA 18 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE NO ARAME NO INTERIOR DO CABEÇOTE DO TRACIONADOR DE ARAME.	34

FIGURA 19 - RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE ARAME MÉDIA E VELOCIDADE DE ARAME MÉDIA DE AVANÇO E RECUO DE ARAME.....	35
FIGURA 20 - RELAÇÃO ENTRE POSIÇÃO DO ARAME E TEMPO NA ALIMENTAÇÃO DE ARAME DINÂMICA NO CABEÇOTE DE TRACIONADOR DE ARAME.	35
FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE ARAME INSTANTÂNEA E TEMPO NA ALIMENTAÇÃO DE ARAME DINÂMICA NO CABEÇOTE DE TRACIONADOR DE ARAME.	36
FIGURA 22 - ASPECTO GENÉRICO PARA O COMPORTAMENTO DE ISOTERMAS NO ARCO ELÉTRICO NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG. [14].....	37
FIGURA 23 – DISPOSITIVO DE CORREÇÃO DE ÂNGULO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.....	37
FIGURA 24 - MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA VARIANDO O ÂNGULO DE ADIÇÃO DE ARAME, EVIDENCIANDO A TRANSFERÊNCIA POR PONTE (A), POR DESTACAMENTO (B), E POR DESTACAMENTO GROSSEIRO (C) [15 MODIFICADO].....	38
FIGURA 25 - SISTEMA DE REGULAGEM DE DISTÂNCIA E ALINHAMENTO ENTRE O ELETRODO E ARAME NA TOCHA DE SOLDAGEM AUTOMÁTICA TIP TIG.	39
FIGURA 26 – DIFERENÇA ENTRE OS MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA COM A VARIAÇÃO NA DISTÂNCIA ENTRE O ELETRODO E ARAME, EVIDENCIANDO A TRANSFERÊNCIA POR PONTE (A), POR DESTACAMENTO (B), E POR DESTACAMENTO GROSSEIRO (C).	39
FIGURA 27- RELAÇÃO ENTRE EFEITO DO AQUECIMENTO DO ARAME ATRAVÉS DO PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME HOT WIRE.....	42
FIGURA 28- RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE ARAME E CORRENTE HOT WIRE SOBRE O AQUECIMENTO DO ARAME.....	42
FIGURA 29 – ALIMENTAÇÃO DE ARAME SEM A AÇÃO DO ARCO VOLTAICO, EVIDENCIANDO O ASPECTO INCANDESCENTE RESULTANTE DO PRÉ-AQUECIMENTO.....	43
FIGURA 30 - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS ENTRE O ELETRODO E SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME.	46
FIGURA 31- CONTAMINAÇÃO DO ELETRODO DURANTE O PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (A), DESTAQUE PARA A APROXIMAÇÃO NECESSÁRIA ENTRE O ELETRODO E ARAME (B).	47
FIGURA 32 - CP 01 E 02. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	48
FIGURA 33 - CP 03 E 04. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	48
FIGURA 34 - CP 05 E 06. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	48
FIGURA 35 - CP 07 E 08. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	48
FIGURA 36 - CP 09 E 10. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	48

FIGURA 37 - CP 13 e 14. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	49
FIGURA 38 - CP 17 e 18. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	49
FIGURA 39 - CP 19 e 20. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	49
FIGURA 40 - CP 21 e 22. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	49
FIGURA 41 - CP 23 e 24. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	50
FIGURA 42 - CP 25 e 26. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	50
FIGURA 43 - CP 27 e 28. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	50
FIGURA 44 - CP 29 e 30. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	50
FIGURA 45 - CP 31 e 32. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	50
FIGURA 46 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP01 – SOLDAGEM COM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (HOT WIRE), ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE.....	51
FIGURA 47 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP03 – SOLDAGEM COM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (HOT WIRE), ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR DESTACAMENTO.	52
FIGURA 48 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP05 – SOLDAGEM COM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (HOT WIRE), ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE.....	53
FIGURA 49 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP07 – SOLDAGEM COM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (HOT WIRE), ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR DESTACAMENTO.	53
FIGURA 50 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP25 – SOLDAGEM SEM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (COLD WIRE), ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE.....	54
FIGURA 51 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP27 – SOLDAGEM SEM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (COLD WIRE), ALIMENTAÇÃO DINÂMICA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR DESTACAMENTO.	55

FIGURA 52 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP29 – SOLDAGEM SEM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (COLD WIRE), ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE.....	55
FIGURA 53 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DA AMOSTRA CP31 – SOLDAGEM SEM PRÉ-AQUECIMENTO DE ARAME (COLD WIRE), ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMA DE TRANSFERÊNCIA POR DESTACAMENTO.	56
FIGURA 54 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE E DESTACAMENTO, RESPECTIVAMENTE.....	57
FIGURA 55 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE E DESTACAMENTO, RESPECTIVAMENTE.....	57
FIGURA 56 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE.	58
FIGURA 57 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE.	58
FIGURA 58 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE E DESTACAMENTO, RESPECTIVAMENTE.....	59
FIGURA 59 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE E DESTACAMENTO, RESPECTIVAMENTE.....	59
FIGURA 60 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE E DESTACAMENTO, RESPECTIVAMENTE.....	60
FIGURA 61 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM UTILIZANDO ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E FORMAS DE TRANSFERÊNCIA POR PONTE E DESTACAMENTO, RESPECTIVAMENTE.....	60
FIGURA 62 - AVALIAÇÃO DA REGIÃO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME EM PROCEDIMENTOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO.	61
FIGURA 63 - FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM COM FORMA DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO, EVIDENCIANDO O COMPORTAMENTO DE PERTURBAÇÃO DO ARCO.	61
FIGURA 64 - SETORES DE DIVISÃO PARA PARAMETRIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM ORBITAL. [18]	62

FIGURA 65 - DESENHO ESQUEMÁTICO EVIDENCIANDO O EFEITO DA POSIÇÃO DE TRABALHO SOBRE O PERFIL DE SOLDA, CORRELACIONANDO OS EFEITOS DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS (E), FORÇA DE MARGONI (M) E A FORÇA DA GRAVIDADE (G). [19] ..	62
FIGURA 66- COMPARAÇÃO DE ENSAIOS DE ENSAIOS POR FILMAGEM TÉRMICA.....	64
FIGURA 67 - PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA. A) CHAPA INTEIRA COM O CORDÃO DE 15 CM DE COMPRIMENTO, B) CHAPA CORTADA A 7,5 CM DO INÍCIO DO CORDÃO DE SOLDA E C) PERFIL DA MACROGRAFIA ANALISADA.....	65
FIGURA 68 – CP 01E 02. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	65
FIGURA 69 – CP 03 E 04. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	66
FIGURA 70 - CP 05 E 06. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	66
FIGURA 71 - CP 07 E 08. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	66
FIGURA 72 – CP 09 E 10. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	66
FIGURA 73 – CP 13 E 14. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	66
FIGURA 74 – CP 17 E 18. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	67
FIGURA 75 – CP 19 E 20. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	67
FIGURA 76 – CP 21 E 22. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	67
FIGURA 77 – CP 23 E 24. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, HOT WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	67
FIGURA 78 – CP 25 E 26. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	67
FIGURA 79 – CP 27 E 28. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (18 Hz) E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	68

FIGURA 80 – CP 29 E 30. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PONTE.	68
FIGURA 81 - CP 31 E 32. PROCEDIMENTOS REALIZADOS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO, COLD WIRE, ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR DESTACAMENTO.....	68
FIGURA 82 - TOCHAS DE SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICAS, A) FORNECIDA PELO FABRICANDO TIP TIG USA [17], B) ADAPTADA INTERNAMENTE NO LABSOLDA.....	72
FIGURA 83 - TÉCNICA PARA SOLDAGEM TIP MANUAL CONHECIDA COMO WALKING THE CUP. (FONTE: IMAGENS EXTRAÍDAS DE: WALKING THE CUP IN 3D ANIMATION, RETIRADO DE HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=HOKGYBU15NK).	73
FIGURA 84 – PROCEDIMENTO DE RAIZ REALIZADO COM PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE ARAME.	74
FIGURA 85 – PROCEDIMENTO DE RAIZ REALIZADO COM PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME.	74
FIGURA 86 - MACROGRAFIAS DAS AMOSTRAS DE SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICA REALIZADAS COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA (A) E ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME (B).....	74
FIGURA 87 - AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM TIG SEMIAUTOMÁTICO COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA DE ARAME.	75
FIGURA 88 - CONFIGURAÇÃO DE CHANFRO "V" 30° UTILIZADA.	76
FIGURA 89 - ESQUEMA DA SOLDAGEM PARA AVALIAÇÃO DO CHANFRO NA POSIÇÃO PLANA.	77
FIGURA 90 - MACROGRAFIA DO PROCEDIMENTO DE PREENCHIMENTO DE JUNTA DE CHANFRO "V" COM 30° COM ADIÇÃO DE INCONEL 625.	78
FIGURA 91 - MACROGRAFIA DO PROCEDIMENTO DE PREENCHIMENTO DE JUNTA "V" COM 45° COM ADIÇÃO DE INCONEL 625.	78

Lista de Tabelas

TABELA 1 - METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM AUTOMÁTICA COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME DINÂMICA EM ALTA FREQUÊNCIA, COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME POR TRÁS DO ARCO.	31
TABELA 2 - METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM AUTOMÁTICA COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME DINÂMICA EM ALTA FREQUÊNCIA, COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PELA FRENTE DO ARCO.....	32
TABELA 3- TABELA COMPARATIVA DE PROCESSOS DE SOLDAGEM. [18].....	44
TABELA 4- PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS SOBRE CHAPA.	45
TABELA 5 - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS ENTRE O ELETRODO E O SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME UTILIZADOS NOS ENSAIOS.	46
TABELA 6- RESULTADO DE TEMPERATURA DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM REALIZADOS.....	63
TABELA 7 - RESULTADOS DE REFORÇO, LARGURA E ÂNGULO DE MOLHABILIDADE DAS AMOSTRAS MACROGRÁFICAS OBTIDAS A PARTIR DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	69
TABELA 8 - RESULTADOS DE DILUIÇÃO GEOMÉTRICA, ÁREA DA ZTA E PENETRAÇÃO DAS AMOSTRAS MACROGRÁFICAS OBTIDAS A PARTIR DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	70
TABELA 9 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS DE SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICOS...	73
TABELA 10 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO PROCEDIMENTO DE PREENCHIMENTO DE JUNTA DE CHANFRO "V" COM 30° COM ADIÇÃO DE INCONEL 625.	77
TABELA 11 - RESULTADOS NA DILUIÇÃO GEOMÉTRICA NOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM COM CHANFRO DE 30° E 45°.....	79

Abreviaturas

Símbolos Gerais

Símbolo	Descrição	Unidade
\dot{m}	<i>Fluxo de Massa</i>	kg / s
cp	<i>Calor Sensível</i>	$J / kg * K$
ΔT	<i>Variação de Temperatura</i>	K
R	<i>Resistência</i>	Ω
I	<i>Corrente</i>	A
r	<i>Resistividade</i>	$\Omega * m$
l	<i>Stick Out</i>	mm
S	<i>Área Transversal do Arame</i>	mm^2
d	<i>Diâmetro do Arame</i>	mm
ρ	<i>Densidade do Arame</i>	kg / m^3
\dot{V}	<i>Fluxo de Volume</i>	m^3 / s
Va	<i>Velocidade de Arame</i>	m / s

Abreviaturas

Abreviatura	Descrição
<i>TIG</i>	<i>Tungsten Inert Gas</i>
<i>AWS</i>	<i>American Welding Society</i>
<i>GTAW</i>	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
<i>AVC</i>	<i>Automatic Voltage Control</i>
<i>ZTA</i>	<i>Zona Termicamente Afetada</i>
<i>DEP</i>	<i>Distância Eletrodo Peça</i>
<i>SAP</i>	<i>Sistema de Aquisição Portátil</i>
<i>LABSOLDA</i>	<i>Instituto de Soldagem e Mecatrônica - UFSC</i>
<i>MIG</i>	<i>Metal Inert Gas</i>

Sumário

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVOS	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. SOLDAGEM TIG QUANTO A ALIMENTAÇÃO DE ARAME	21
2.1.1. SOLDAGEM AUTÓGENA	21
2.1.2. SOLDAGEM COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME	22
2.2. GASES DE PROTEÇÃO	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME TIP TIG	33
4.1. MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA	36
4.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS QUANTO AO TIP TIG	43
5. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM AUTOMÁTICA	45
5.1. AQUISIÇÃO DE DADOS DURANTE A SOLDAGEM	51
5.2. ESTUDOS UTILIZANDO A FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE	56
5.3. ESTUDOS REALIZADOS POR FILMAGEM TÉRMICA	62
5.4. ANÁLISE METALOGRÁFICA	65
6. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICO	72
7. APLICAÇÃO DO PROCESSO PARA PREENCHIMENTO DE CHANFRO COM LIGA INCONEL 625	76
8. CONCLUSÕES	80
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem com arco protegido por gás vêm sendo utilizados desde meados do século XIX, podendo citar Humphry Davy's como descobridor do arco elétrico, utilizando inicialmente um eletrodo de carbono. Em 1890 C. L. Coffin seguiu com o constante avanço no cenário da soldagem utilizando o arco elétrico com proteção externa de um gás inerte, encontrando enorme dificuldades em implementar o processo para materiais não ferrosos como alumínio e magnésio, enfrentando obstáculos como a geração de porosidade, diminuindo a qualidade do processo.

Na década de 1940, com todos os olhares científicos voltados à 2ª Guerra Mundial, o processo de soldagem utilizando gás inerte teve suas prometidas qualidades alcançadas e seu mérito reconhecido. O processo que utilizara corrente alternada possibilitou a soldagem de ligas antes tratadas com enormes dificuldades [1].

O processo conhecido atualmente como TIG, também designado por GTAW, trouxe grandes incrementos e aumento de qualidade à indústria, como redução de porosidade, ausência de respingos e escória e podendo ser aplicado em todas as posições e tipos de juntas, sendo largamente aplicado em todos os cenários onde se necessita alcançar uma elevada qualidade metalúrgica, acabamento superficial e regularidade do cordão.

Entretanto, mesmo sendo visto como de alta qualidade metalúrgica, o processo TIG é tido como de baixa produtividade, quando comparado a outros processos de soldagem a arco, principalmente quando se observa a taxa de deposição obtida. Neste cenário, surgem diversas modalidades visando o incremento da produtividade do processo aliado ao seu grande benefício de qualidade.

Já na década de 60 foi desenvolvida a técnica do *Hot Wire*, utilizando do efeito Joule, promovido pela passagem de uma corrente elétrica pelo arame, para o seu pré-aquecimento, objetivando um aumento na taxa de deposição em comparação com o processo convencional [2]. Apesar do avanço, a taxa de deposição continua relativamente baixa.

Da mesma forma, o desenvolvimento em equipamentos e periféricos, como por exemplo, bocais de proteção que permitem uma alimentação tangencial de arame, bem como técnicas de alimentação dinâmica de arame, em baixa e alta frequência tem sido alvo de estudos para

proporcionar diversas vantagens, tanto operacionais quanto incrementais ao cordão de solda. Pode-se citar, por exemplo, para aplicações com alimentação tangencial de arame, são esperados um aumento da taxa de fusão e conseqüentemente aumento na velocidade de soldagem no procedimento, justificado pela alimentação do arame em regiões mais quentes do arco, além da incremento de operacionalidade da tocha de soldagem no alcance a regiões de geometria mais complexas e uma omnidirecionalidade do processo, ou seja, a possibilidade em operar em todas as direções, seja com alimentação de arame lateral, por trás ou pela drente do arco, sem afetar o resultado do processo [3].

O trabalho está inserido em um projeto realizado no Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA UFSC, em parceria com a PETROBRAS, intitulado “Avanços no Processo TIG Aplicado à Soldagem Orbital Automática e Semi-automática de Tubulações”, tendo este como objetivo global a disponibilização e adequada implementação de novas tecnologias de soldagem semi-automática e automática orbital nas operações de soldagem inseridas na construção de montagem de dutos e tubulações, que permitam aumento de produtividade.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é a aquisição de um sólido conhecimento acerca do processo de soldagem TIG com alimentação dinâmica de arame em alta frequência, versão comercialmente chamada TIPTIG, verificando a influência das técnicas diferenciais do processo, avaliando a adequação dos parâmetros para diversas aplicações de procedimentos de soldagem.

Espera-se, assim, gerar um alicerce para que outras vertentes de processo de soldagem que utilizam alimentação dinâmica possam ser mais bem compreendidas e novas modalidades de processos possam ser discutidas e aplicadas na indústria, possibilitando um enorme avanço na ciência e na aplicação da engenharia de soldagem.

Para isto, tem-se como metas:

- Estudo e análise do sistema de alimentação de arame comercial TIP TIG para melhor compreensão das conseqüências eletromecânicas do processo;
- Verificar a influência dos procedimentos TIG com alimentação de arame por trás e pela frente do arco, com alimentação contínua e dinâmica em alta frequência de movimentação

do arame, com e sem pré-aquecimento de arame e pelas formas de transferência metálica por ponte e destacamento;

- Avaliação dos procedimentos ensaiados por meio de filmagem térmica, filmagem em alta velocidade, aquisição de dados, inspeção visual e metalográfica;
- Avaliação da operacionalidade do uso do procedimento com alimentação dinâmica de arame em alta frequência em aplicações semiautomáticas;
- Avaliação da aplicação do processo para preenchimento de chanfros em tubos de aço carbono com liga de Inconel 625.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de soldagem TIG, *Tungsten Inert Gas*, é caracterizado por um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça, sob uma cortina de gás ou mistura ionizável, que tem a função principal de proteger a ponta aquecida do eletrodo, a poça fundida e o metal em solidificação da contaminação pelo ar. Este gás geralmente é inerte, mas também pode consistir de uma mistura não completamente inerte e, por isso, a denominação da AWS para o processo é GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). [4]

Este referido gás, estando ionizado, propicia a condução de corrente elétrica [5]. Os gases geralmente utilizados são Argônio, Hélio, ou uma mistura entre os mesmos. Em alguns casos, misturas de gases com Hidrogênio e Nitrogênio também podem ser utilizadas.

Neste processo, com exceção da soldagem de alumínio e alguns outros materiais, o eletrodo de tungstênio é mantido na polaridade negativa (cátodo), sendo a peça então, mantida na polaridade positiva (ânodo) da fonte de alimentação. Os eletrodos, constituídos de ligas de tungstênio, são normalmente dopados de um elemento de liga, responsável por propiciar propriedades que aumentam a estabilidade, assim como melhoram a ignição do arco elétrico [6]. Podem ser citados o tório (Th), o lantânio (La), o zircônio (Zr) e o cério (Ce) como exemplos de elementos dopantes, em uma faixa normalmente de 2%.

Para o processo de soldagem TIG, utiliza-se como variável de controle a corrente de soldagem. O controle pela corrente deve-se ao comportamento das curvas tensão x corrente do arco, e tensão x comprimento do arco (Figura 1).

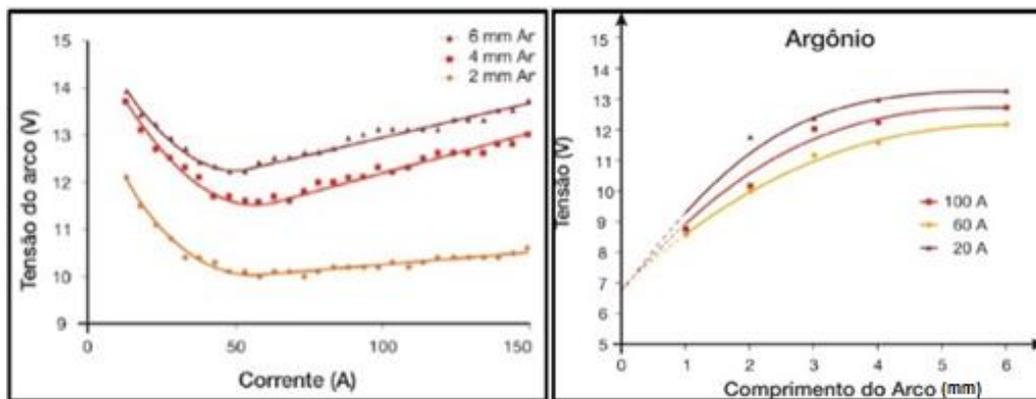


Figura 1 - Curva de tensão x corrente do arco TIG para diferentes distâncias entre o eletrodo e peça; B) Curva tensão x comprimento do arco TIG [5].

Em correntes reativamente baixas, a mancha catódica possui temperatura relativamente baixa, e por isso, a emissão termiônica (fenômeno de emissão de elétrons quando um metal é aquecido) necessita de maior tensão para impulsionar um número suficiente de elétrons à corrente requerida. À medida que a corrente cresce, e temperatura do cátodo aumenta, aumentando a facilidade de emissão termiônica. Com o aumento da corrente, o grau de ionização da região de queda catódica e da coluna do arco é progressivamente aumentado. Assim, além de uma maior superfície emissiva, tem-se um condutor elétrico mais robusto, tornando mais fácil a circulação de corrente. Isto significa uma tendência à diminuição da tensão.

Esta tendência de abaixamento da tensão com o aumento da corrente é equivalente a um efeito de auto alimentação, pois menos potencial é necessário para carregar mais corrente. Diante de uma situação como esta, somente a colocação de um “freio” pode parar o aumento da corrente. Este “freio” é o que determina o uso de fontes de comando de corrente para controle do processo TIG [5].

Ainda na Figura 1 é possível verificar a variação da tensão do arco de acordo com o comprimento do mesmo. Os dois gráficos mostram que o comprimento do arco, para determinado arranjo de corrente, gás de proteção e eletrodo, pode ser controlada a partir da tensão.

Em processos automatizados, o controle da tensão do arco é de fundamental importância para manter o processo estável. O controle é feito a partir de sistemas integrados aos manipuladores de tochas de soldagem que promovem o controle da distância entre o eletrodo e a peça utilizando a variação da tensão como referência. Estes sistemas são denominados AVC, do inglês, *Arc Voltage Control*. A necessidade do AVC dá-se devido a imperfeições da

junta a ser soldada, as quais variam a Distância Eletrodo-Peça (DEP), conseqüentemente a altura do arco. As técnicas de controle do AVC são fundamentais para o bom desempenho do processo de soldagem.

2.1. SOLDAGEM TIG QUANTO A ALIMENTAÇÃO DE ARAME

2.1.1. Soldagem Autógena

Como o processo TIG utiliza um eletrodo permanente, é possível que a soldagem seja realizada de forma autógena, ou seja, sem adição de material. A soldagem autógena alcança, por intermédio da minimização do uso de matérias primas, a redução dos custos envolvidos (Figura 2).

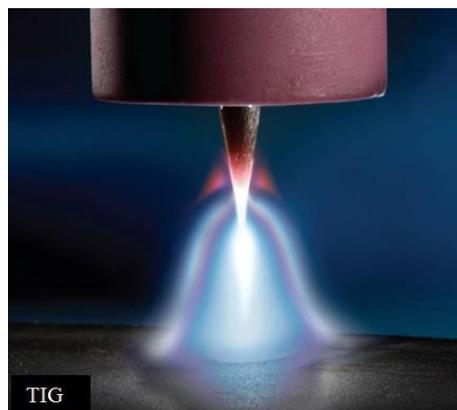


Figura 2 - Soldagem TIG sem alimentação de material. Fonte: disponível em www.ewm-group.com.

Neste caso, o incremento da velocidade de soldagem deve ocorrer em consequência do aumento da corrente. No entanto, em correntes elevadas, o comportamento da poça de fusão muda, e o resultado na maioria das vezes é um cordão descontínuo. Como exemplo pode-se mencionar o “*humping*”, uma descontinuidade caracterizada por regiões de crateras, e regiões de protuberâncias, de maneira alternada, com morfologia semelhante ao mostrado na Figura 3.

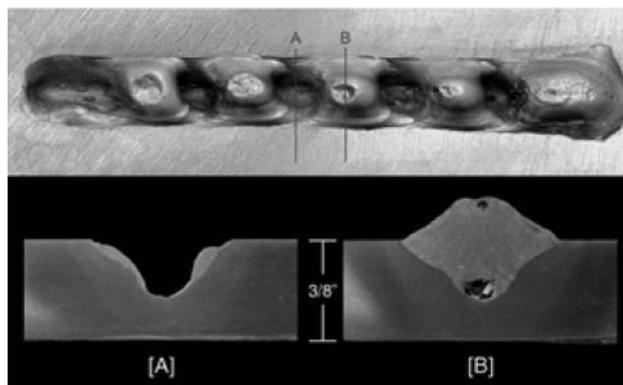


Figura 3- Cordão sobre chapa realizado com o processo TIG com elevada corrente, evidenciando a presença de humping. [7]

Uma das formas de se minimizar o problema citado acima está no uso de arames (metais de adição) com alto teor de desoxidantes [8]. Outro problema que se manifesta na soldagem autógena diz respeito à propagação de trincas. É possível identificar uma maior tendência na formação de trincas de solidificação quando o procedimento é realizado de forma autógena [9].

2.1.2. Soldagem com Alimentação de Arame

A alimentação de material pode ser realizada de forma manual, normalmente utilizando varetas, e automática, utilizando rolos de arame e promovendo uma alimentação contínua, utilizando dispositivos de alimentação acoplados à tocha ou não (Figura 4). Relatos indicam que a produtividade pode ser aumentada na ordem de 800% quando aplicada a alimentação automática comparada à manual, em se tratando dos tempos de soldagem [10].



Figura 4 - Tochas de soldagem TIG realizadas com alimentação de arame automática, com o uso de dispositivos acoplados e não acoplados á tocha de soldagem, respectivamente.

Quando utilizada a alimentação por varetas (Figura 5), a busca por uniformidade do cordão ao longo de toda a sua extensão é dificultada, devido à dificuldade de controle do operador em depositar material de forma constante e uniforme. Além disto, sendo finito e curto o comprimento da vareta utilizada pelo soldador, o processo se faz necessariamente, de forma intermitente, reduzindo a produtividade quando comparado ao processo com alimentação contínua. Somado a estes fatores, deve-se lembrar de que para os procedimentos de soldagem manuais, utilizando alimentação contínua ou não, a habilidade do operador é um fator crucial para o bom resultado da solda; quando realizada a alimentação por vareta, a importância desse fator se torna maior ainda.



Figura 5 - Soldador executando soldagem TIG com a utilização de alimentação de arame de forma manual.

A adição de arame, quando realizada de forma automática, pode também utilizar o artifício do pré-aquecimento de arame (Figura 7). Aplicações onde é necessário se alcançar elevada taxa de deposição, como em procedimentos de revestimento ou preenchimento, é majoritariamente utilizado o arame de forma pré-aquecido (*Hot Wire*). Tal relação de aumento da taxa de deposição é evidenciada por Olivares e Díaz [2] na Figura 6. O pré-aquecimento do arame ocorre por efeito Joule, em decorrência de passagem de corrente no arame logo antes de ser alimentado à poça de fusão. Esse incremento de energia aumenta a quantidade de material depositado e permite a redução do nível de corrente principal no processo (Figura 7). Assim, a técnica *Hot Wire* tem como consequência menor imposição de calor na peça, reduzindo o grau de distorção e diluição.

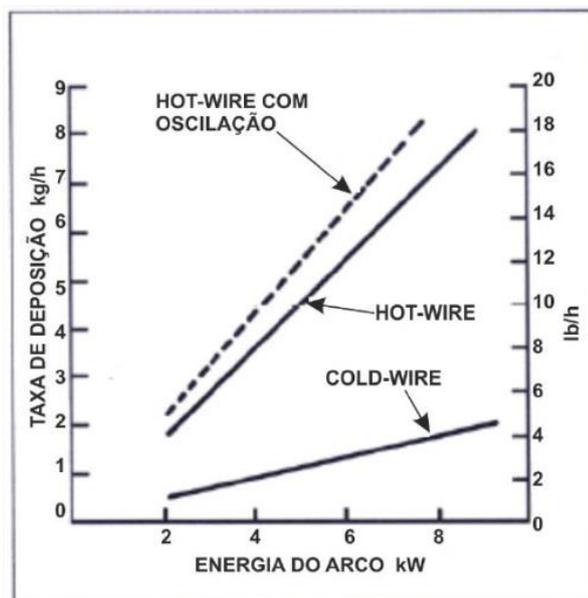


Figura 6 - Taxas de deposição que podem ser alcançadas com o processo TIG Hot-Wire comparada com o TIG Cold-Wire.

A soldagem TIG com adição de arame à temperatura ambiente – *Cold Wire* predomina em aplicações de passe de raiz, para as quais objetiva-se máxima penetração, quando comparado ao processo com arame pré-aquecido.

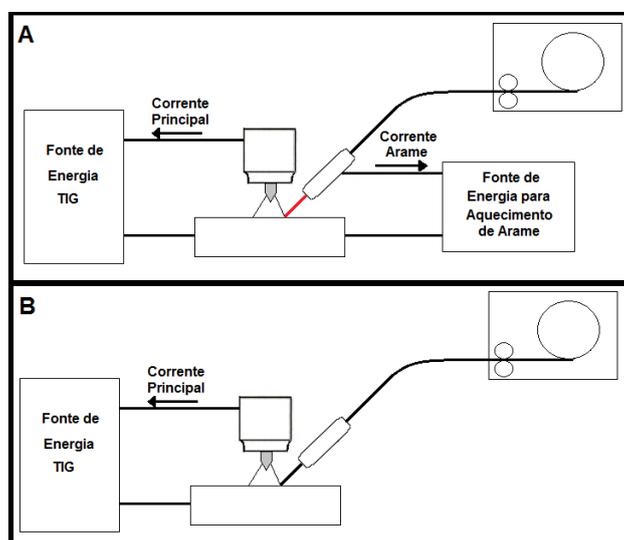


Figura 7 - Modos de alimentação de arame com pré-aquecimento de arame - Hot Wire (A), e sem pré-aquecimento de arame - Cold Wire (B).

A alimentação de arame no processo automático TIG se dá convencionalmente por meio de alimentação contínua de arame. Nesses equipamentos, o arame se movimenta em apenas um sentido e com velocidade instantânea constante igual à velocidade parametrizada pelo sistema. Quando a alimentação se dá de forma dinâmica, o movimento se caracteriza pela

alternância de avanço e recuo do arame, resultando em velocidades instantâneas positivas e negativas, com uma velocidade de avanço média total igual a designada pelo sistema, conforme pode-se observar na Figura 8.

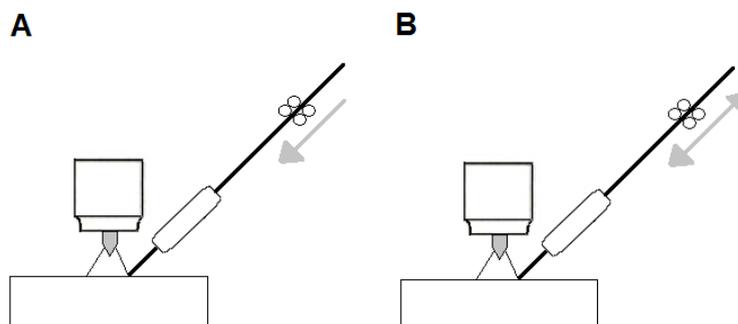


Figura 8 - Alimentação contínua (A) e dinâmica (B) de arame no processo TIG.

O presente trabalho discute a forma de alimentação dinâmica em alta frequência, aplicada no equipamento denominado comercialmente como TIP TIG. Neste processo, o movimento de avanço e recuo do arame é provocado diretamente pela movimentação completa do conjunto de tracionador de arame, conforme observa-se na Figura 9.

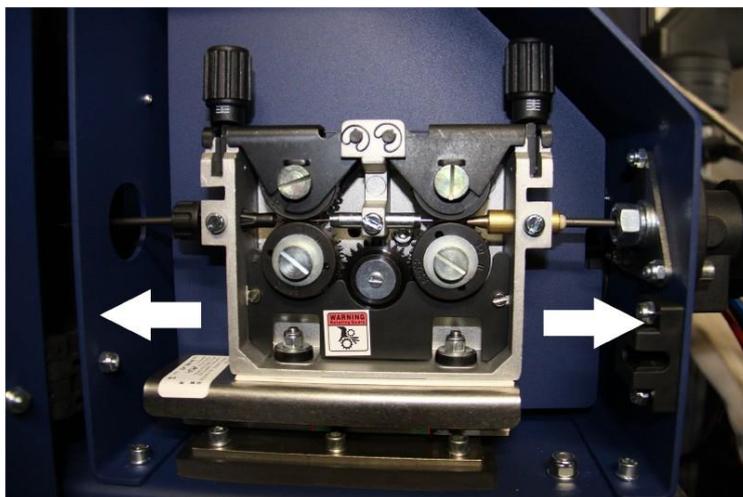


Figura 9 - Sistema de oscilação de arame do processo TIP TIG.

Segundo Wilson [11], a alimentação oscilatória de arame gera uma agitação mecânica na poça de fusão, favorecendo aspectos de produtividade e de qualidade para o processo.

2.2. GASES DE PROTEÇÃO

Nos processos de soldagem a arco, os gases têm a função de proteger a poça de fusão, gotas em transferência, e o eletrodo, além de estabilizar o arco. Além disso, podem influir sobre a geometria, características metalúrgicas e propriedades mecânicas da solda [12].

Devido ao processo TIG utilizar um eletrodo não consumível de tungstênio (elemento que oxida facilmente em altas temperaturas), deve-se utilizar gás inerte ou redutor. A escolha deste deve-se a quesitos econômicos, explicando a escolha de Argônio na maioria dos casos, mas também de fatores que influenciam o resultado da solda, como se podem citar aplicações onde se buscam o aumento de velocidade de soldagem e penetração, com o mesmo nível de corrente. Nestes casos, pode-se, teoricamente, utilizar a adição de até 15% de hidrogênio ao argônio, conforme é ilustrado na Figura 10.

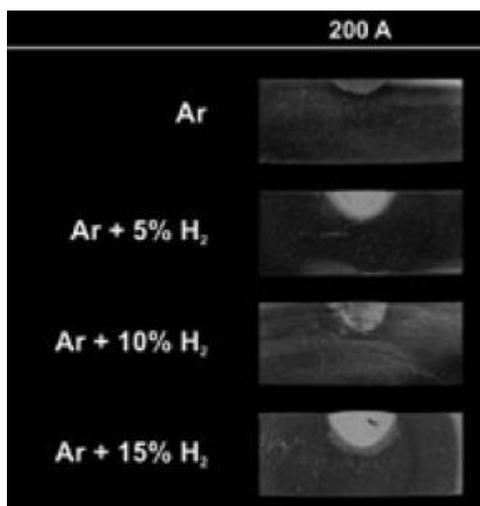


Figura 10 - Variação do perfil de penetração com a alteração do teor de hidrogênio em soldagem de aços [7].

Além dos fatores econômicos e metalúrgicos, na escolha da mistura gasosa deve ser estudada a segurança de operação, fato este que faz com que aplicações com misturas de hidrogênio não sejam comumente encontradas na indústria, por se tratar de um gás inflamável e explosivo, por isso limitado a teores baixos (máximo 5%).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos relacionados ao processo de soldagem descritos neste trabalho foram realizados todos na mesma bancada de ensaios, variando os equipamentos complementares para controle do procedimento.

Para os ensaios de caracterização do processo TIG com alimentação dinâmica de arame, descritos no Capítulo 5, os ensaios foram realizados sobre corpos de prova em chapa do material SAE AISI 1020 de 3/8" (9,5 mm) de espessura e como material de adição o arame ER 70S-6, de 1 mm de diâmetro.

Já para os ensaios realizados em chanfro, foram utilizados como corpos de prova chanfros tipo "V" realizados em chapa do material SAE AISI 1020 de 9,5mm (3/8') de espessura, para caracterização do processo semiautomático conforme descrito no Capítulo 6, e chanfros tipo "V" realizados em chapa do material SAE AISI 1020 de 6,35 mm (1/4'), para a caracterização do processo de preenchimento com Inconel 625 conforme descrito no Capítulo 7.

Para todos os estudos supracitados, foi utilizada a fonte de soldagem WIG 500i DC Pulse, do fabricante Jäckle. A fonte utilizada permite a regulagem de corrente de 5 A até 500 A, utilizando apenas corrente constante para sua aplicação automática. Em aplicações manuais e semiautomáticas, é possível a parametrização em corrente pulsada e alternada (Figura 11).



Figura 11 - Fonte de soldagem WIG 500i DC Pulse, do fabricante Jäckle.

Com o objetivo de melhor observar os aspectos dinâmicos da poça de fusão durante o procedimento, os ensaios foram realizados juntamente com o uso do Sistema de Aquisição Portátil – SAP (Figura 12). O equipamento, fabricado pela empresa IMC Soldagem, permite uma aquisição de corrente, tensão, vazão de gás e velocidade de arame em uma frequência de 5000 Hz. Os dados obtidos são então dispostos em formas de gráficos e histogramas, permitindo um acompanhamento mais detalhado do procedimento realizado.

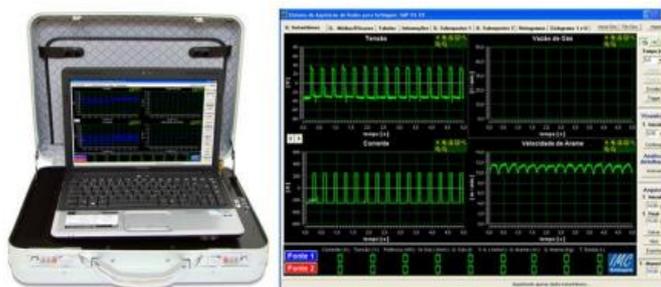


Figura 12 - Sistema de Aquisição Portátil (SAP). Fonte: disponível em www.imcsoldagem.com.br.

Utilizando filmagens em alta velocidade, é possível observar detalhes do comportamento do arco, do eletrodo, do arame e da poça de fusão, fatores de profunda importância para o entendimento do comportamento estático do procedimento adotado. Com o objetivo de aumentar a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no processo, foi utilizada a monitoração com a câmera de alta velocidade IDT MotionPro Y4-S2, juntamente com o módulo de aquisição de dados IDT (Figura 13).



Figura 13 - Câmera de alta velocidade. Fonte: disponível em idtvision.com/imaging/yseries.php.

Para a mediação do comportamento térmico da poça de fusão, foi utilizado o equipamento de Câmera Infravermelha SC7200 F/3, fabricado pela empresa FLIR, permitindo uma medição de temperatura em três faixas distintas, 5 a 300 °C, 300 a 1500 °C e 1500 a 3000 °C, com uma tolerância de medição de aproximadamente 1 °C quando analisadas temperaturas entre - 20 °C e 100 °C, e aproximadamente 1% do valor quando analisadas temperaturas acima de 100 °C (Figura 14).



Figura 14 - Câmera infravermelha SC7200 F/3, fabricada pela empresa FLIR.

Portanto, os ensaios para caracterização dos processos foram divididos em duas etapas, ora com a utilização do sistema de aquisição SAP a câmera infravermelha, evidenciados na Figura 15, ora com a utilização da câmera de alta velocidade, evidenciados na Figura 16.



Figura 15 - Bancada de ensaios utilizada para os ensaios com alimentação dinâmica e contínua com aquisição de dados e filmagem térmica. A) Fonte de Soldagem, B) Tracionador de Arame, C) Manipulador robótico, D) Tocha de soldagem e dispositivo de alimentação de arame, E) Corpo de prova, F) Gás de proteção, G) Sistema de aquisição de dados SAP, H) Software para aquisição de filmagem térmica, I) Câmera Infravermelha.



Figura 16- Bancada de ensaios utilizada para os ensaios com alimentação dinâmica e contínua com aquisição de dados e filmagem em alta velocidade. A) Fonte de Soldagem, B) Tracionador de Arame, C) Manipulador robótico, D) Tocha de soldagem e dispositivo de alimentação de arame, E) Corpo de prova, F) Gás de proteção, G) Software para aquisição de filmagem em alta velocidade, H) Dispositivo para aquisição de dados, I) Câmera de alta velocidade.

Os ensaios foram realizados modificando as vertentes de posição de alimentação de arame, ora sendo alimentado por trás do arco, ora sendo alimentado pela frente do arco, possibilidade de pré-aquecimento de arame (*Hot Wire* ou *Cold Wire*), além das formas de alimentação dinâmica, com uma frequência de oscilação de 18 Hz, e contínua, e formas de transferência metálica por ponte e destacamento.

Para cada vertente final de parâmetros foram realizados dois ensaios, com o intuito de se comprovar a repetitividade dos resultados. Estes foram realizados e relatados no presente trabalho seguindo a legenda abordada nas Tabelas 1 e 2, para facilitar a leitura.

Tabela 1 - Metodologia de ensaios para caracterização do processo de soldagem automática com alimentação de arame dinâmica em alta frequência, com alimentação de arame por trás do arco.

Posição de Alimentação de Arame	Pré-Aquecimento do Arame	Forma de Alimentação	Forma de Transferência Metálica	Amostra
Por Trás do Arco	<i>Hot Wire</i>	Dinâmico (18 Hz)	Ponte	1
			Ponte	2
			Destacado	3
			Destacado	4
		Contínuo	Ponte	5
			Ponte	6
			Destacado	7
			Destacado	8
	<i>Cold Wire</i>	Dinâmico (18 Hz)	Ponte	9
			Ponte	10
			Destacado	11
			Destacado	12
		Contínuo	Ponte	13
			Ponte	14
			Destacado	15
			Destacado	16

Tabela 2 - Metodologia de ensaios para caracterização do processo de soldagem automática com alimentação de arame dinâmica em alta frequência, com alimentação de arame pela frente do arco.

Posição de Alimentação de Arame	Pré-Aquecimento do Arame	Forma de Alimentação	Forma de Transferência Metálica	Amostra
Pela Frente do Arco	<i>Hot Wire</i>	Dinâmico (18 Hz)	Ponte	17
			Ponte	18
			Destacado	19
			Destacado	20
		Contínuo	Ponte	21
			Ponte	22
			Destacado	23
			Destacado	24
	<i>Cold Wire</i>	Dinâmico (18 Hz)	Ponte	25
			Ponte	26
			Destacado	27
			Destacado	28
		Contínuo	Ponte	29
			Ponte	30
			Destacado	31
			Destacado	32

4. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME TIP TIG

Dada a importância do entendimento da real influência da alimentação de arame em alta frequência, é necessária uma abordagem mais detalhada sobre o equipamento utilizado para os ensaios, com o objetivo de melhor correlacionar as causas com as consequências que serão encontradas.

O TIP TIG é caracterizado pela utilização da alimentação dinâmica e pré-aquecimento de arame *Hot Wire*. Conforme já citado, o esperado de um sistema de alimentação dinâmica de arame consiste na alternância entre os movimentos de avanço e recuo do mesmo. Buscando-se avaliar este comportamento, foram realizadas filmagens em alta velocidade durante o processo de soldagem, para observar se de fato o arame se movimenta na ponta da tocha (Figura 17).

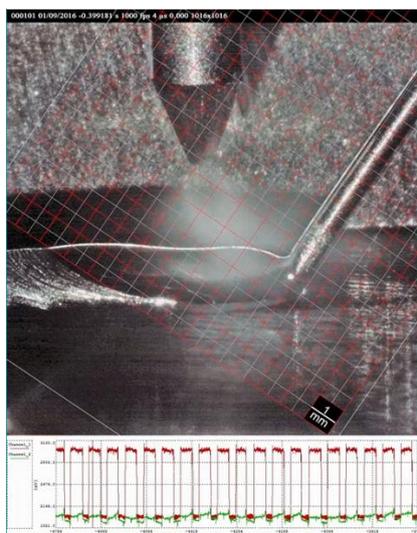


Figura 17 - Filmagem em alta velocidade do processo de soldagem TIP TIG.

A partir de sua análise, foi possível a comprovação da inexistência do movimento de recuo de arame durante sua alimentação para as condições aplicadas. Tal comportamento, no entanto, depende da disposição do mangote e peso da bobina de arame, assim como também deve sofrer influência das propriedades de atrito do conduíte [13]. Utilizando-se da filmagem de alta velocidade constatou-se que a média das velocidades de avanço de arame no dispositivo de alimentação de arame foi de 10,7 m/min. Este valor de velocidade média medida deve-se ao curto período em que o arame permanece em movimento de avanço, quando comparado ao período que este permanece em repouso. Enquanto o arame se encontra em repouso por 44 ms a cada período de oscilação, este se encontra em movimento de avanço

por apenas 7 ms. Esta diferença justifica e valida a velocidade de arame resultante programada pelo operador, de 1,5 m/min. O fato de não ocorrer o movimento de recuo de arame no dispositivo de alimentação de arame provavelmente pode ser explicado devido à presença de folga entre o arame e o conduíte da tocha de soldagem, acarretando em movimentos de avanço e recuo do arame com velocidades díspares das ajustadas, ou até mesmo velocidades nulas, pois o cabeçote alimentador realiza movimento nos dois sentidos, puxando e empurrando o arame.

Para a comprovação desta hipótese, foram, também, realizadas filmagens em alta velocidade no cabeçote tracionador de arame durante a aplicação com alimentação dinâmica (Figura 18).

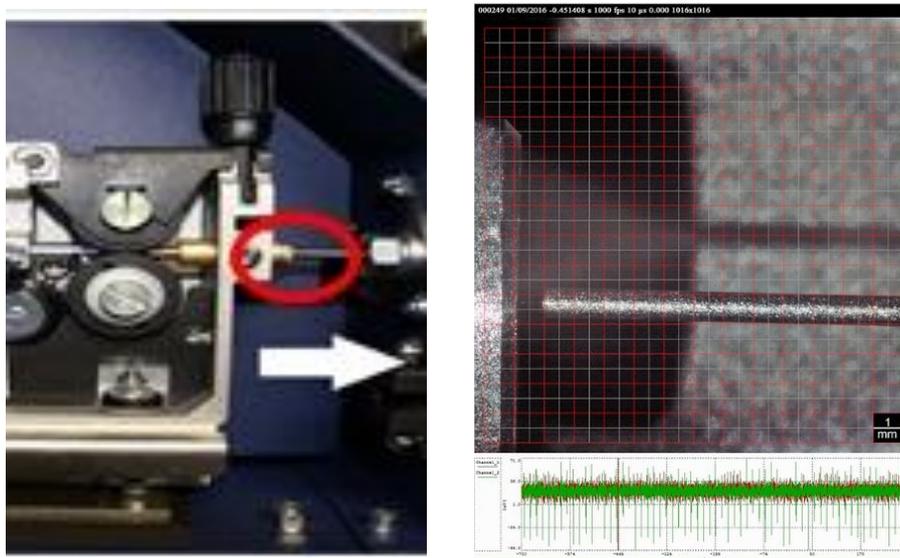


Figura 18 - Filmagem em alta velocidade no arame no interior do cabeçote do tracionador de arame.

Analisando a filmagem, foi possível medir as velocidades médias de avanço e recuo de arame no interior do cabeçote de tracionador de arame.

Calculou-se a velocidade média de avanço de arame em 14,82 m/min e a velocidade média de recuo de arame em 12,0 m/min (Figura 19). Cabe ainda ressaltar que para a realização dos testes a velocidade de arame parametrizada no processo, e devidamente medida por meio de ensaios, foi de 1,5 m/min.

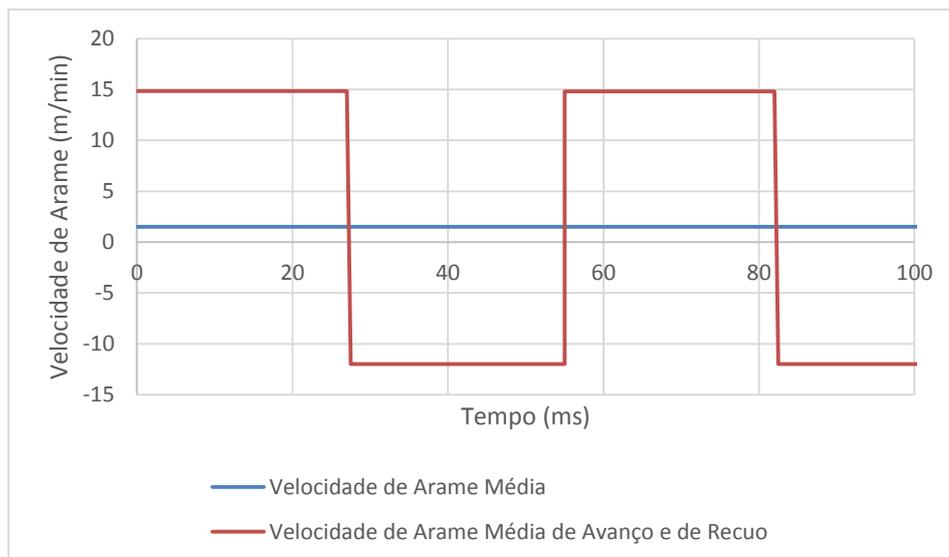


Figura 19 - Relação entre velocidade de arame média e velocidade de arame média de avanço e recuo de arame.

Assim, puderam-se determinar perfis idealizados de comportamento da velocidade instantânea e da posição do arame no tracionador de arame em função do tempo (Figuras 20 e 21).

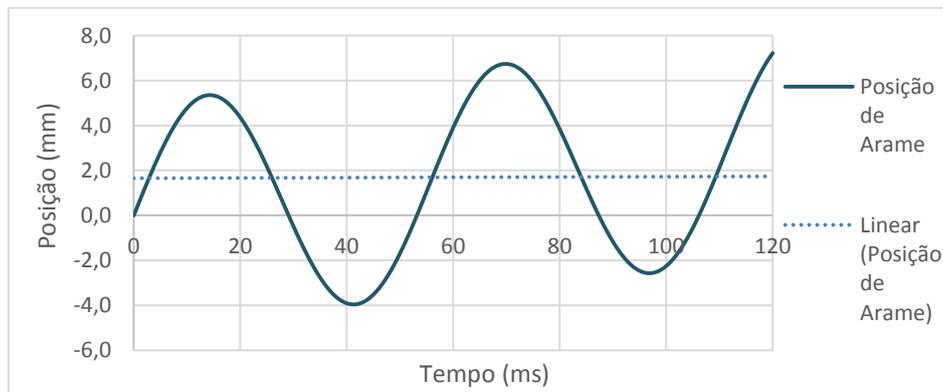


Figura 20 - Relação entre posição do arame e tempo na alimentação de arame dinâmica no cabeçote de tracionador de arame.

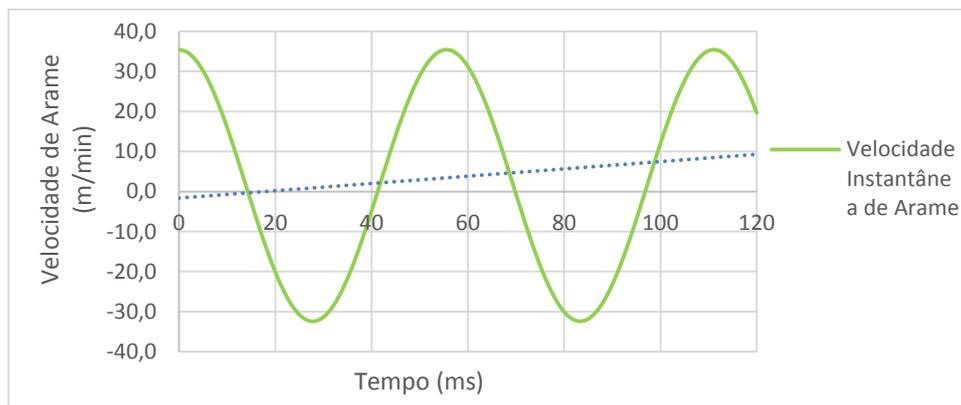


Figura 21 - Relação entre velocidade de arame instantânea e tempo na alimentação de arame dinâmica no cabeçote de tracionador de arame.

A partir da análise dos gráficos acima, pode-se ainda determinar a velocidade aproximada máxima de avanço e de recuo para quando utilizada a velocidade média resultante de 1,5 m/min. De forma análoga à utilizada para determinação das velocidades máximas, determinou-se também a posição do arame em função do tempo.

Portanto, para todas as considerações feitas pelo presente trabalho, deve-se ter em mente o comportamento distinto de alimentação dinâmico de arame discutido neste capítulo.

4.1. MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Existem algumas formas de variar os parâmetros elétricos e geométricos do procedimento de soldagem com o objetivo de alcançar as diferentes formas de transferência metálica. Como o intuito do presente trabalho segue em manter os parâmetros elétricos para obter uma melhor comparação entre todos os cenários, buscou-se modificar somente os parâmetros geométricos, com o objetivo de alcançar o modo transferência metálica desejado. Uma dessas formas está na modificação do ângulo entre o eletrodo e arame, buscando com que o arame percorra isoterma de maior temperatura no interior do arco para promover a transferência metálica por destacamento, ou percorra isoterma de menor temperatura para promover a transferência por ponte (Figura 22).

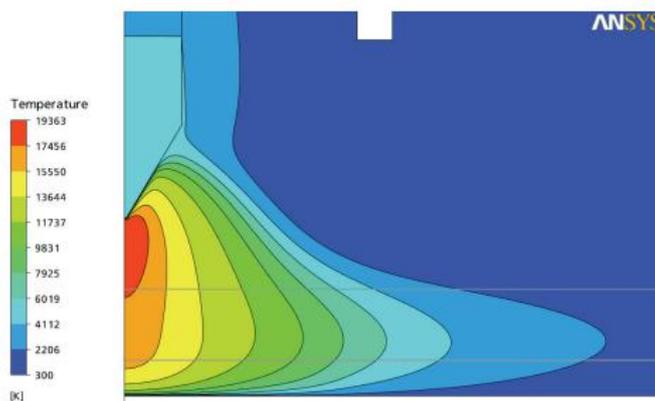


Figura 22 - Aspecto genérico para o comportamento de isotermas no arco elétrico no processo de soldagem TIG. [14]

Utilizando o processo TIG com ajuste de ângulo na alimentação de arame (Figura 23), Pigozzo [15] comprovou o discutido acima, conforme apresentado na Figura 24.

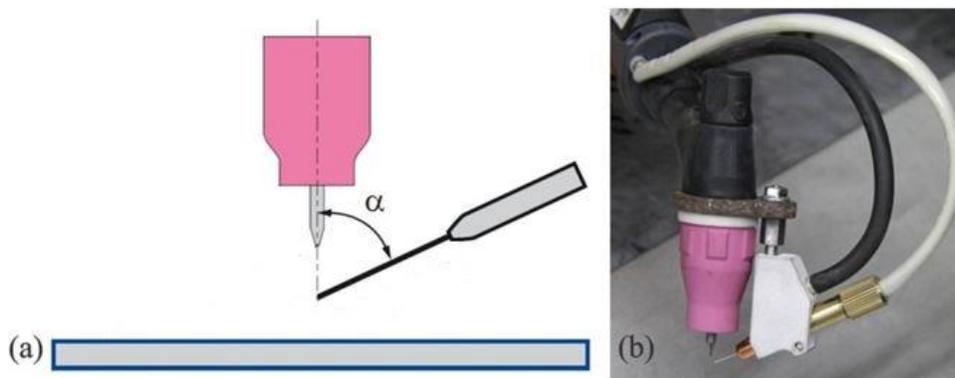


Figura 23 – Dispositivo de correção de ângulo de alimentação de arame para o processo de soldagem TIG.

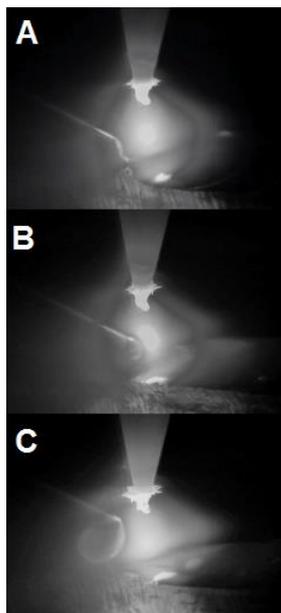


Figura 24 - Modos de transferência metálica variando o ângulo de adição de arame, evidenciando a transferência por ponte (A), por destacamento (B), e por destacamento grosseiro (C) [15 modificado].

Na Figura 24, com o ângulo α ajustado em 65° , a alimentação se deu direta à poça, observando-se o modo de transferência por ponte. Ao aumentar o ângulo em apenas $1,5^\circ$, o modo de transferência é alterado, fato verificado na imagem central. Observa-se a formação e o destacamento de uma gota antes de atingir a poça. Por fim, com $68,5^\circ$, tem-se uma transferência destacada grosseira, exibido na imagem inferior.

No processo de soldagem TIP TIG, quando realizado de forma automatizada, o ângulo de adição de arame não é ajustável, permanecendo sempre em 45° entre o eletrodo e o arame, sendo possível apenas a regulação da distância e alinhamento entre o eletrodo e arame nos eixos x , y e z , conforme se pode observar na Figura 25.

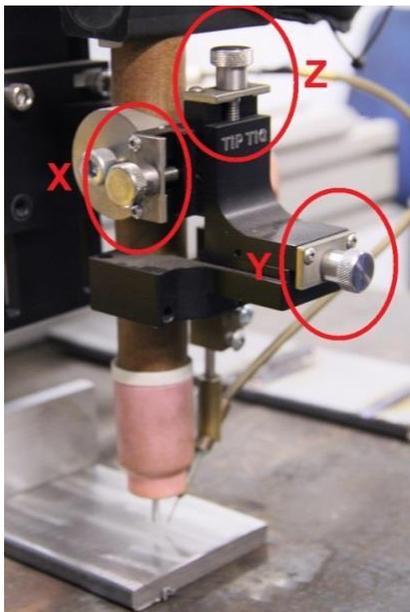


Figura 25 - Sistema de regulagem de distância e alinhamento entre o eletrodo e arame na tocha de soldagem automática TIP TIG.

Assim, para se alcançar os diferentes modos de transferência metálica, optou-se por se modificar somente a distância longitudinal à solda (direção x) entre o eletrodo e arame (Figura 26), forçando o arame a percorrer isotermas de diferentes temperaturas, como Pigozzo, [15], o fez.

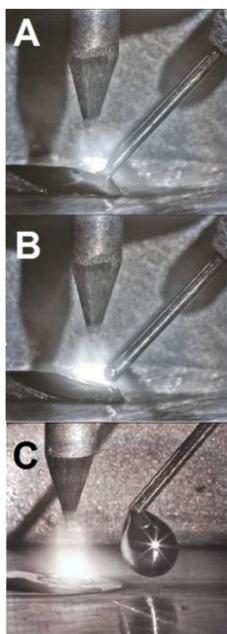


Figura 26 – Diferença entre os modos de transferência metálica com a variação na distância entre o eletrodo e arame, evidenciando a transferência por ponte (A), por destacamento (B), e por destacamento grosseiro (C).

Outra questão relevante nos estudos de caracterização do processo é a temperatura que o arame entra em contato com a poça de fusão. Esta influencia diretamente o comportamento da temperatura interna da poça, devido ao calor necessário para gerar a fusão ser menor quando o arame é pré-aquecido (*Hot Wire*).

O calor absorvido pelo arame tem origem pelo efeito Joule resultante do pré-aquecimento e pela condução e convecção transmitida ao arame pelo arco. Isolando o calor originado pelo pré-aquecimento, é possível obter uma exata correlação entre a corrente *Hot Wire* utilizada e a temperatura média final do arame. Para o estudo, foi observado o calor sensível do arame, ou seja, a quantidade de calor que tem como efeito apenas a alteração da temperatura do material. [16]

Para tanto, utilizou-se a equação (1) para obter a relação acima mencionada. Nesta, \dot{m} representa o fluxo de massa do arame, cp representa o calor sensível do material, ΔT a variação da temperatura final e inicial do arame, R representa a resistência do sistema e I representa a corrente *Hot Wire* utilizada no procedimento. [16]

$$\dot{m} \cdot cp \cdot \Delta T = R \cdot I^2 \quad (1)$$

Para a resolução da equação (1), deve-se correlacionar os fatores com as respectivas equações (2), (3) e (4). Nestas, r representa a resistividade do arame, l representa o *stick out* do procedimento, S representa a área transversal do arame alimentado, d representa o diâmetro do arame alimentado, ρ representa a densidade do arame, \dot{V} representa o fluxo de volume de arame e Va representa a velocidade de arame utilizada no procedimento.

$$R = \frac{r \cdot l}{A} \quad (2)$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot Va \quad (4)$$

Seguem os valores das constantes do aço SAE AISI 1020 para resolução das equações. Cabe ressaltar que se assumiu como valores constantes o calor sensível (cp) e resistividade (r) do arame, porém estes valores são dependentes da temperatura do sistema.

$$c_p = 486 \text{ J / Kg} \cdot \text{K}$$

$$r = 1,59 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg / m}^3$$

$$T_i = 298 \text{ K (25 } ^\circ\text{C)}$$

Buscando facilitar o cálculo, foi utilizado como exemplo o procedimento CP01 / CP02, o qual utilizou alimentação de arame por trás do arco, pré-aquecimento *Hot Wire*, alimentação dinâmica e transferência por ponte, no qual o valor de L (*stick out*) foi medido em 46 mm. Em todos os ensaios, conforme mencionado anteriormente, foi utilizada uma velocidade de arame (V_a) de 1,5 m/min, um arame com diâmetro de 1,0 mm e uma corrente de *Hot Wire* de 75 A. O comprimento do *stick out* foi medido entre o ponto de contato da corrente *Hot Wire* com o arame e o ponto em que este entrou em contato com a poça de fusão.

Através da resolução da equação (1), conclui-se que para o procedimento analisado o valor da temperatura média final de arame, devido somente ao pré-aquecimento é de 361 °C .

Posteriormente, para melhor ilustrar a influência da corrente *Hot Wire* utilizada sobre a temperatura média final do arame, foi traçado um gráfico para o procedimento acima, modificando apenas a corrente utilizada para o pré-aquecimento (Figura 27). Cabe ressaltar que esta relação é válida para este procedimento específico, pois alterando a distância entre o eletrodo e o arame, o valor do *stick out* também é alterado.

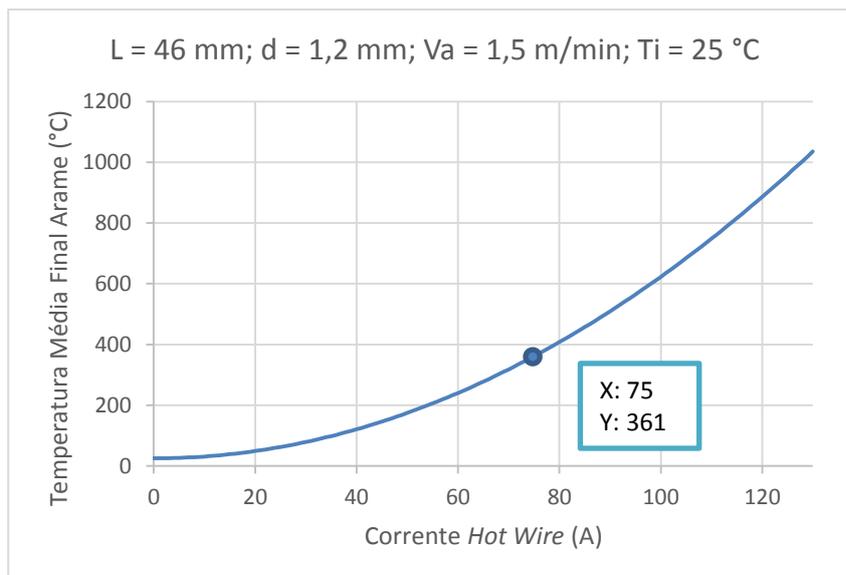


Figura 27- Relação entre efeito do aquecimento do arame através do pré-aquecimento de arame Hot Wire.

Ainda, outro parâmetro que influencia diretamente esta correlação é a velocidade de arame utilizada. Mesmo com o presente trabalho utilizando esse parâmetro como constante, jugou-se necessário o estudo e observação da temperatura média final do arame sobre a alteração da velocidade de arame, conforme se pode observar na Figura 28.

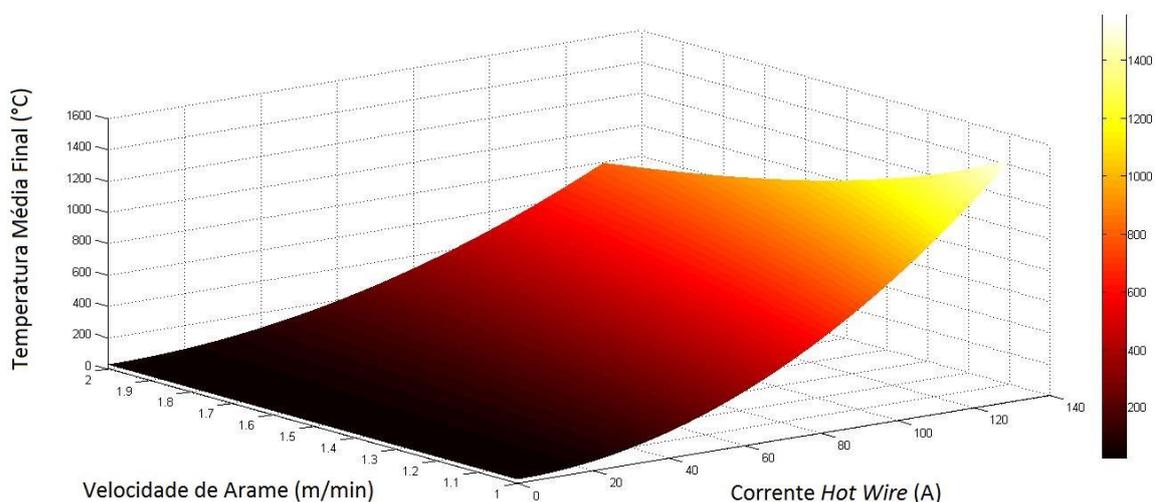


Figura 28- Relação entre a velocidade de arame e corrente Hot Wire sobre o aquecimento do arame.

Ainda, para ilustrar a influência do pré-aquecimento do arame mencionado, foi realizado um ensaio utilizando a alimentação de arame pré-aquecido sem a existência do arco contribuindo com o calor. Pode-se observar na Figura 29 o aspecto incandescente do material ao ser aquecido por efeito Joule.



Figura 29 – Alimentação de arame sem a ação do arco voltaico, evidenciando o aspecto incandescente resultante do pré-aquecimento.

4.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS QUANTO AO TIP TIG

De acordo com o fabricante do equipamento TIP TIG [17], o uso do processo abordado de forma automatizada possibilita diversos aspectos benéficos para o procedimento de soldagem, sendo alguns deles:

- Incremento nas taxas de deposição quando comparado aos outros processos TIG disponíveis no mercado;
- Menor energia inserida na poça de fusão, resultando em uma menor Zona Termicamente Afetada (ZTA) e reduzindo significativamente a tensão e consequente distorção residual na peça de trabalho;
- Aumento da propriedade de resistência à corrosão em todas as ligas dotadas desta propriedade;
- Aumento na qualidade, tanto metalúrgica quanto mecânica, em todas as ligas, ressaltando ainda a facilidade de uso no processo.
- Incremento do refino de grão e quebra de dendritas;

- Alteração / perturbação da direção de solidificação;
- Diminuição da porosidade devido ao agitação da poça de fusão.

Cabe ainda ressaltar os benefícios da ação mecânica de pulsação do arame durante a soldagem. Este movimento cria uma perturbação na poça de fusão, que conseqüentemente, modifica as características da tensão superficial, conforme indica o fabricante. A combinação destes fatores gera o aumento da fluidez da poça de fusão, uma maior tolerância quanto à variações geométricas da junta a ser soldada, isenção de porosidade, controle térmico da poça de fusão e maior molhabilidade do cordão de solda.

A Tabela 3 apresenta uma classificação comparativa de cinco processos quanto a 14 diferentes aspectos, sendo o processo *Robo-TiPTiG* o de melhor desempenho global. Em uma análise crítica desta tabela, a qual é de autoria do fabricante, pode-se dizer relativamente injusta a comparação entre um processo executado de forma automatizada (TIP TIG) e processos executados de forma manual (todos os outros). Deste modo, parte dos benefícios seria provinda da automatização e não somente da inovação caracterizada pela tecnologia TIP TIG. Com isso, os resultados são de fato mais impactantes.

Tabela 3- Tabela comparativa de processos de soldagem. [18]

Comparison of Weld Processes - On a scale from 0 to 10, with 10 being the best					
Weld Characteristics	Traditional TIG (GTAW)	Stick (SMAW)	Gas Shielded Flux (FCAW)	Pulsed MIG (GMAW)	Robo-TiPTiG
Deposition Rate	3	7	8	8	8
Weld Speed	3	6	8	8	8
Heat Input	3	5	7	6	10
Weld Distortion	4	6	6	6	10
Skill Level Requirement	2	4	5	9	9
Fusion Capability	8	6	6	8	10
Consumable Costs	6	5	3	9	7
Fusion Quality	9	6	6	8	10
Inclusions Porosity/Particulate	9	3	4	7	10
Start-Stops Requirements	9	3	3	7	9
Weld Fume	9	3	3	7	9
Spatter Generation	9	3	6	6	10
Position	8	6	7	6	10
Joint Fit-Up Tolerance	4	6	7	8	7
Overall Performance %	63%	48%	54%	71%	89%

5. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM AUTOMÁTICA

Durante a operação, tanto automática quanto manual, no procedimento de soldagem, parâmetros como posição de alimentação de arame, pré-aquecimento de arame, assim como sua forma de alimentação e a forma como este se transfere à poça de fusão têm um elevado índice de interferência no resultado geométrico da solda, em resultados metalúrgicos e operacionais. Assim, a influência direta destes deve ser discriminada qualitativamente e quantitativamente com o objetivo de aprimorar o conhecimento sobre o processo e possibilitar a melhor escolha de parâmetros para cada aplicação.

Para tanto, foram realizados ensaios de soldagem sobre chapa com os diversos parâmetros citados, conforme Tabela 4, mantendo-se os mesmos parâmetros de soldagem, e seus resultados foram discutidos.

Tabela 4- Parâmetros de soldagem utilizados para os ensaios sobre chapa.

Corrente do Arco (A)	150
Corrente do Arame (A)*	75
Velocidade de Soldagem (cm/min)	20
Velocidade de Arame (m/min)	1,5
Frequência Alimentação de Arame - Dinâmico (Hz)**	18
Composição Eletrodo	98% W 2% Ce
Diâmetro Eletrodo (mm)	3,2
Ângulo Eletrodo (°)	45
Material Arame	ER 70S6
Diâmetro Arame (mm)	1,0
Material Chapa	SAE AISI 1020
Espessura Chapa (mm)	9,5
Gás de Proteção	Ar
Vazão Gás de Proteção (l/min)	12
DEP (mm)	4,0
* Somente válido para procedimentos que utilizaram <i>Hot Wire</i> .	
** Somente válido para procedimentos que utilizaram a forma dinâmica de alimentação de arame.	

Como os ensaios destinam-se também ao estudo das formas de transferência de arame e procurou-se manter os parâmetros de soldagem para se melhor observar a influência destes, optou-se por modificar somente a distância entre o arame e o eletrodo para alcançar ora a transferência por ponte, ora por destacamento, conforme se pode observar na Figura 30 e na Tabela 5.

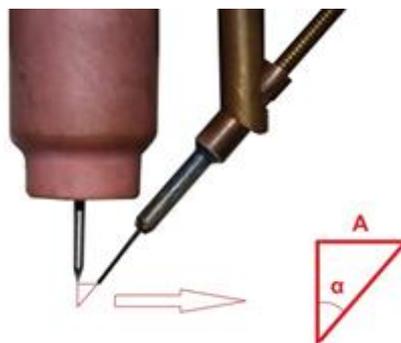


Figura 30 - Parâmetros geométricos entre o eletrodo e sistema de alimentação de arame.

Tabela 5 - Parâmetros geométricos entre o eletrodo e o sistema de alimentação de arame utilizados nos ensaios.

Amostra	Ângulo α ($^{\circ}$)	Distância A (mm)
CP 01 02	45	4,8
CP 03 04	45	4,1
CP 05 06	45	3,9
CP 07 08	45	2,7
CP 09 10	45	2,1
CP 13 14	45	2,1
CP 17 18	45	5,5
CP 19 20	45	3,2
CP 21 22	45	5,5
CP 23 24	45	3,2
CP 25 26	45	3,6
CP 27 28	45	1,8
CP 29 30	45	2,3
CP 31 32	45	1,8

De forma individual, os ensaios sem pré-aquecimento de arame e com modo de transferência por destacamento e com a alimentação de arame por trás do arco, não foram realizados pela inviabilidade do equipamento em manter um processo estável com os parâmetros adotados, tanto para alimentação dinâmica como para alimentação contínua de arame (CP11, CP12, CP45 e CP16).

Tal ocorrência deve-se ao fato que para alcançar o destacamento de arame quando este não está pré-aquecido, deve-se aproximar muito o arame do eletrodo. Quando feito com alimentação de arame por trás do arco, a distância entre o cordão de solda, o arame e o eletrodo são ainda menores, aumentando a probabilidade de contaminação do eletrodo, conforme se pode observar na Figura 31.

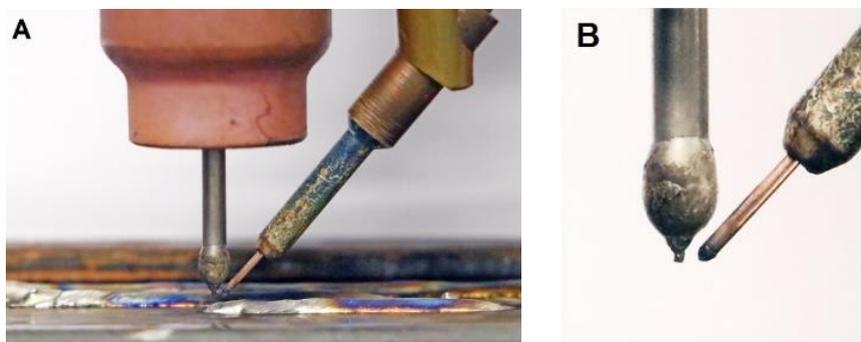


Figura 31- Contaminação do eletrodo durante o procedimento de soldagem (A), destaque para a aproximação necessária entre o eletrodo e arame (B).

Com a análise do aspecto superficial dos cordões de solda, é possível constatar importantes resultados para validação do procedimento quanto ao tipo de aplicação e as características morfológicas do cordão, como molhabilidade, bem como isenção de defeitos visuais.

Para uma maior correlação entre os aspectos superficiais e as consequências destes, recomenda-se uma leitura comparativa deste tópico com a análise de valores de largura e reforço de cordão de solda, discriminados no subcapítulo 5.4.

De forma geral, pode-se observar uma maior molhabilidade nos procedimentos adotados com modo de transferência por destacamento quando utilizada alimentação de arame por trás do arco, e nos procedimentos adotados com modo de transferência por ponte quando utilizada alimentação de arame pela frente do arco.

Os procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco apresentaram relativa facilidade na execução e repetitividade dos aspectos superficiais, fato este reforçando e justificando ao proposto pelo fabricante que, para aplicações automáticas, devem ser realizadas com alimentação de arame por trás do arco (Figuras 32, 33, 34, 35, 36 e 37).

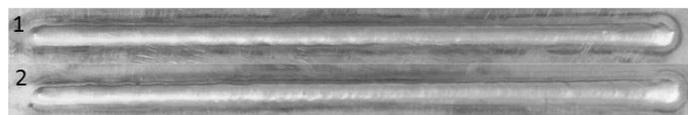


Figura 32 - CP 01 e 02. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.



Figura 33 - CP 03 e 04. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por destacamento.

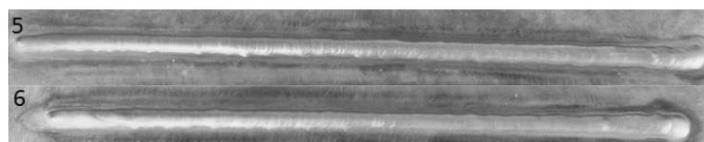


Figura 34 - CP 05 e 06. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.



Figura 35 - CP 07 e 08. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por destacamento.

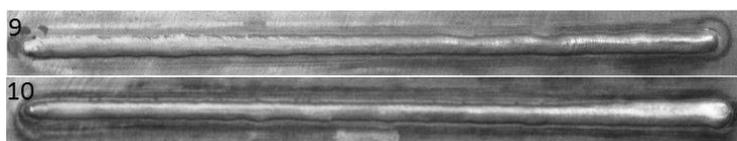


Figura 36 - CP 09 e 10. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.

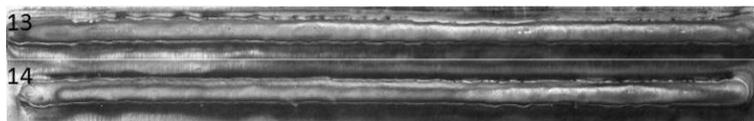


Figura 37 - CP 13 e 14. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Cold Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.

Já para os procedimentos nos quais foi adotada a alimentação pela frente do arco observou-se a dificuldade na repetibilidade dos ensaios, apresentando falta de continuidade de material depositado e descontinuidades no cordão. Para os ensaios utilizando pré-aquecimento de arame (*Hot Wire*), foram alcançados resultados com boa repetibilidade, mas com maior dificuldade do que os realizados com alimentação de arame por trás do arco (Figuras 38, 39, 40 e 41).

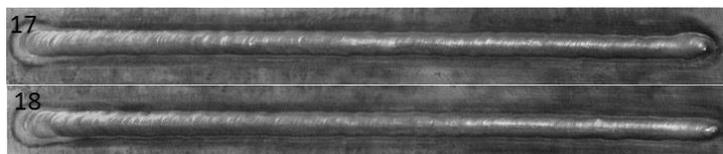


Figura 38 - CP 17 e 18. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.



Figura 39 - CP 19 e 20. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por destacamento.



Figura 40 - CP 21 e 22. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.



Figura 41 - CP 23 e 24. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por destacamento.

Os procedimentos com alimentação de arame pela frente do arco sem pré-aquecimento (*Cold Wire*) apresentaram muita dificuldade de execução, gerando cordões de solda com aspecto superficial aquém do desejado formando ondulações e descontinuidades superficiais, como se pode observar nas Figuras 42, 43, 44 e 45.

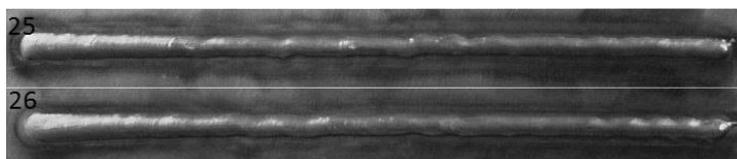


Figura 42 - CP 25 e 26. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.

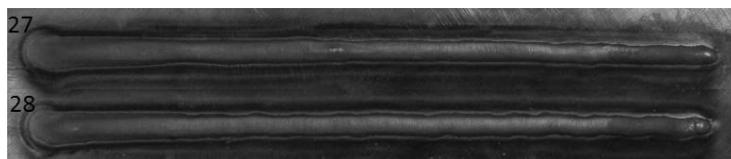


Figura 43 - CP 27 e 28. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por destacamento.



Figura 44 - CP 29 e 30. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.



Figura 45 - CP 31 e 32. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação contínua e transferência metálica por destacamento.

5.1. AQUISIÇÃO DE DADOS DURANTE A SOLDAGEM

Durante os ensaios de soldagem, a aquisição de dados via SAP torna-se necessário, conforme já citado, para uma mais profunda análise e compreensão dos fenômenos físicos que estão ocorrendo no arco e na poça de fusão.

Assim, fatores como período de destacamento e o comportamento dinâmico do arco elétrico, podem ser avaliados.

Nos ensaios realizados com o arame pré-aquecido (*Hot Wire*) e de alimentação dinâmica, pode-se facilmente notar o perfil uniforme e constante quando ocorre o destacamento de arame, assim como a perturbação que esta transferência por destacamento causa ao arco, podendo-se observar nas Figuras 46 e 47.

Os canais de medição de tensão foram instalados entre o eletrodo e o corpo de prova (denominado no trabalho como Tensão Arco), e entre o eletrodo e o arame (denominado no trabalho como Tensão Arame).

Cabe ressaltar que para estes ensaios, a distância entre o eletrodo e o arame foi de 4,8 mm.

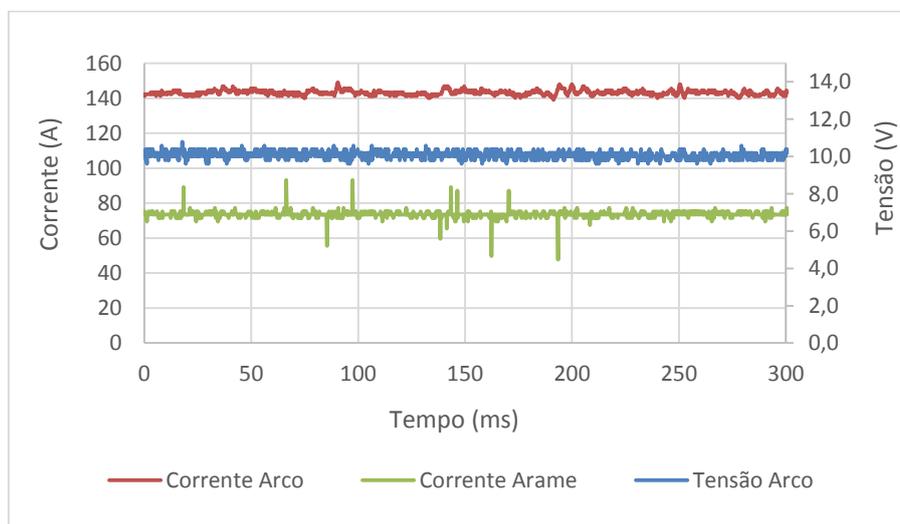


Figura 46 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP01 – Soldagem com pré-aquecimento de arame (Hot Wire), alimentação dinâmica e forma de transferência por ponte.

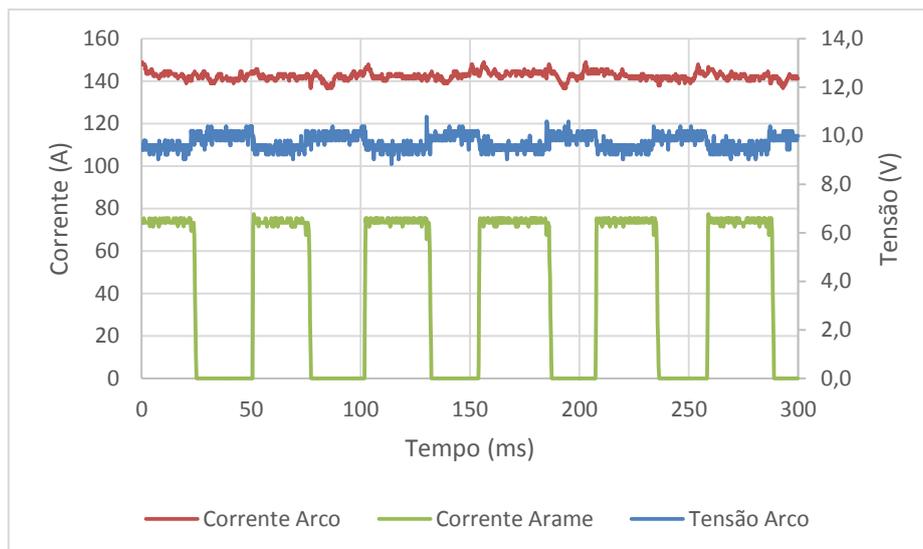


Figura 47 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP03 – Soldagem com pré-aquecimento de arame (Hot Wire), alimentação dinâmica e forma de transferência por destacamento.

Para os mesmos ensaios discutidos anteriormente, porém com alimentação de arame contínua, observa-se o mesmo comportamento uniforme e constante de destacamento de gotas, assim como o comportamento de perturbação ao arco (Figuras 48 e 49).

Porém, diferentemente do procedimento adotando para alimentação dinâmica de arame, destaca-se o curto período de permanência de arame dentro da poça de fusão. Enquanto na alimentação dinâmica o arame permanece em curto circuito com a poça de fusão por aproximadamente 60 ms a cada período, este permanece aproximadamente apenas 25 ms a cada período na alimentação contínua.

Dada as diferenças entre as velocidades médias de avanço, o arame, quando alimentado de forma dinâmica, sofre o aquecimento gradual causado pelo arco por um menor período de tempo, permanecendo menos tempo nas isotermais de maior temperatura antes de atingir a poça de fusão. Dessa forma, o arame adentra a poça de fusão com uma menor temperatura, sendo necessário um maior período para que este possa se aquecer e se destacar da poça de fusão.

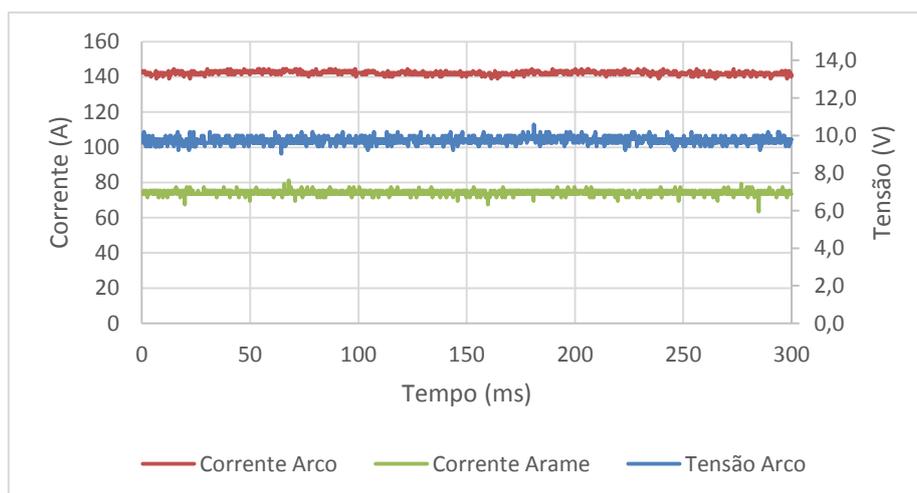


Figura 48 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP05 – Soldagem com pré-aquecimento de arame (*Hot Wire*), alimentação contínua e forma de transferência por ponte

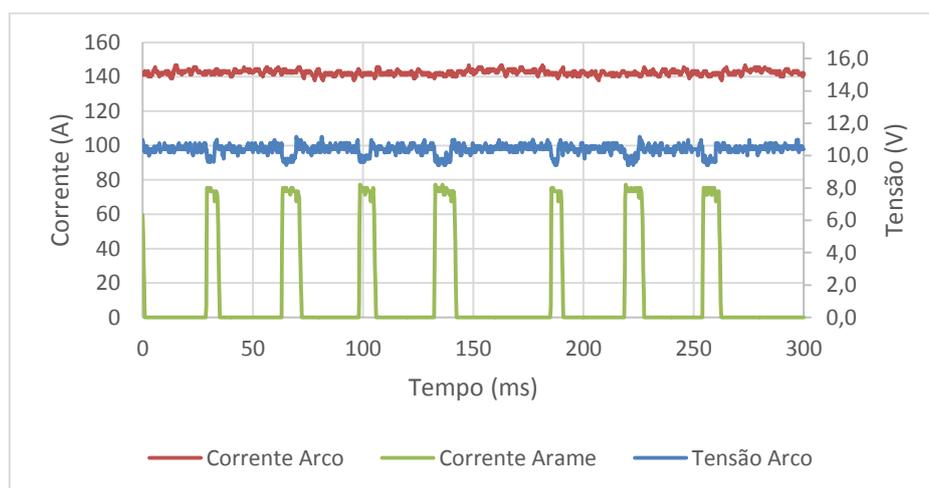


Figura 49 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP07 – Soldagem com pré-aquecimento de arame (*Hot Wire*), alimentação contínua e forma de transferência por destacamento.

De forma análoga à apresentada para os ensaios utilizando o pré-aquecimento de arame, é necessária uma profunda análise dos comportamentos do arame e do arco não somente para o melhor entendimento quando utilizado a técnica *Cold Wire*, mas também para uma global compreensão das consequências da alimentação de arame em alta frequência.

Nos ensaios utilizando alimentação de arame sem pré-aquecimento (*Cold Wire*) e alimentação dinâmica de arame, pode-se observar os mesmos comportamentos de período de permanência do arame na poça de fusão discutidos nos procedimentos com *Hot Wire*. O curto

período de permanência de arame de na poça de fusão não deve ser erroneamente justificado por uma maior facilidade do arame em se destacar que no caso anterior, já que para os ensaios com *Cold Wire* utilizou-se uma distância entre o eletrodo e o arame de 3,9 mm. Tal mudança justifica-se pelo fato que se adotada a mesma distância para os dois procedimentos, o arame, se alimentado de forma fria, não poderia ser estudado em sua forma de transferência metálica por destacamento (Figuras 50 e 51).

Ainda, no caso da alimentação de arame sem pré-aquecimento, cita-se novamente que os ensaios utilizando a alimentação por trás do arco com transferência metálica por destacamento não foram realizados devido ao alto índice de contaminação do eletrodo, conforme discutido anteriormente.

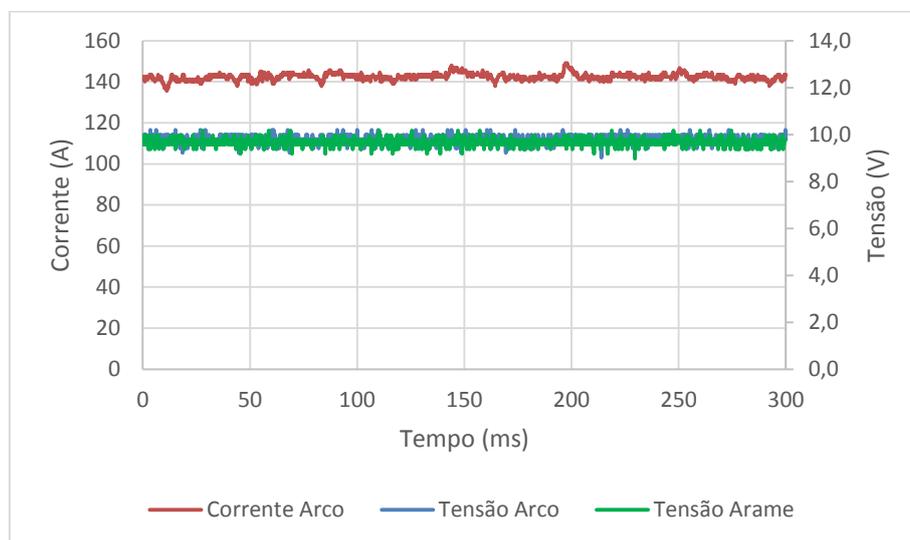


Figura 50 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP25 – Soldagem sem pré-aquecimento de arame (Cold Wire), alimentação dinâmica e forma de transferência por ponte.

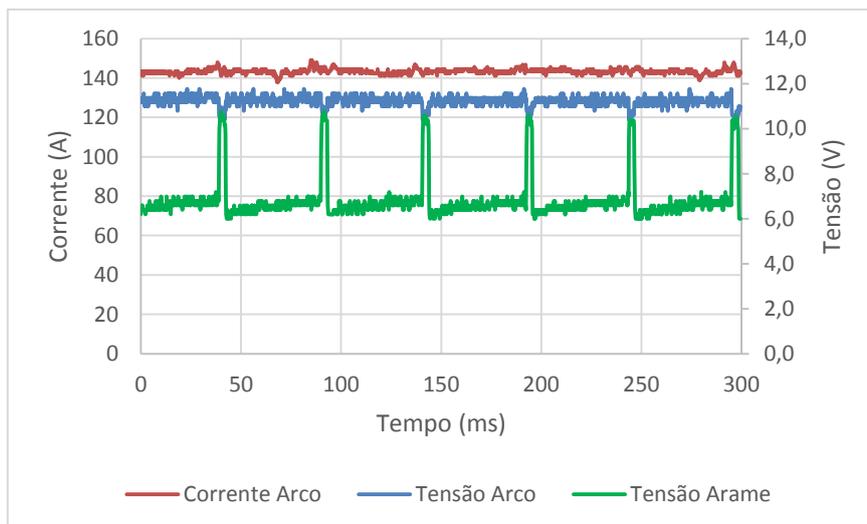


Figura 51 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP27 – Soldagem sem pré-aquecimento de arame (Cold Wire), alimentação dinâmica e forma de transferência por destacamento.

Quando realizada a alimentação de arame contínua para o procedimento da Figura 53 (CP31), o arco não apresentou a mesma uniformidade observada com a alimentação dinâmica de arame, mostrou um comportamento desordenado e caótico para o período de permanência de arame em curto circuito com a poça de fusão e para o período que esse contato se repetia, conforme se pôde também ser observado pela qualidade superficial dos cordões ensaiados (Figuras 52 e 53).

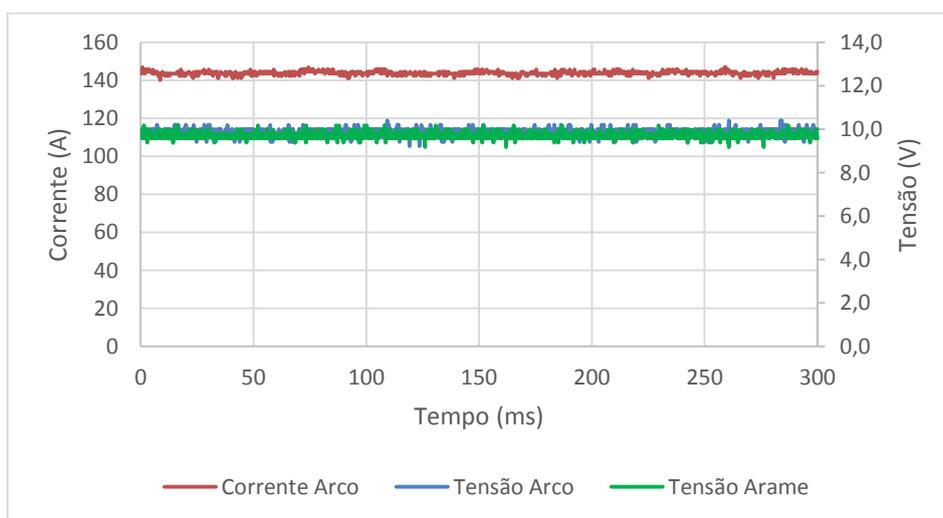


Figura 52 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP29 – Soldagem sem pré-aquecimento de arame (Cold Wire), alimentação contínua e forma de transferência por ponte.

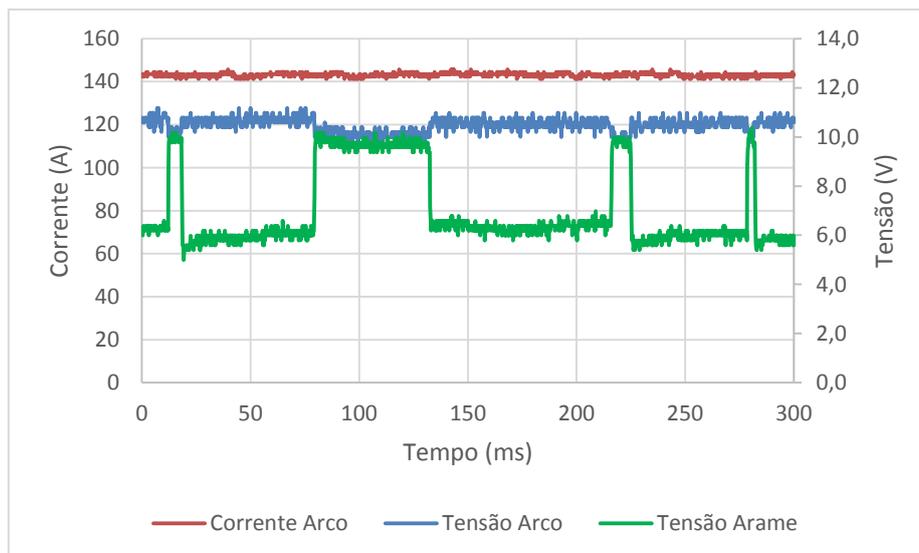


Figura 53 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem da amostra CP31 – Soldagem sem pré-aquecimento de arame (Cold Wire), alimentação contínua e forma de transferência por destacamento.

5.2. ESTUDOS UTILIZANDO A FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE

Alguns aspectos relevantes e importantes à condição de validação do procedimento de soldagem podem ser melhor ou somente evidenciados a partir da filmagem em alta velocidade do arco e da poça de fusão durante a sua execução, devido à alta frequência do dinamismo de alimentação de arame, imperceptíveis ao olho humano.

Portanto, para este fim foram realizadas filmagens em alta velocidade em todos os procedimentos analisados, com destaque para o comportamento do arame ao adentrar a poça de fusão e o comportamento do arco de soldagem.

Durante a execução dos procedimentos de soldagem com alimentação por trás do arco, *Hot Wire* e alimentação dinâmica (Figuras 54 e 55), fica evidenciado o comportamento de enterramento do arame quando utilizada a transferência metálica por ponte, justificado pela necessidade de maior distância entre o arame e eletrodo e conseqüentemente a influência de isothermas de menores temperaturas sobre o arame.

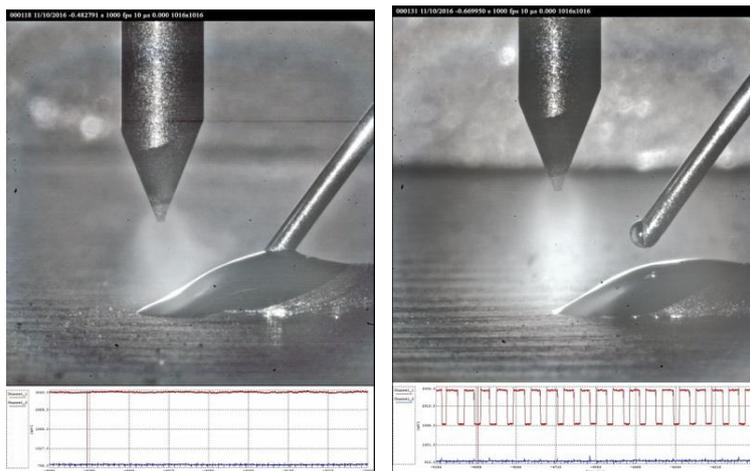


Figura 54 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e formas de transferência por ponte e destacamento, respectivamente.

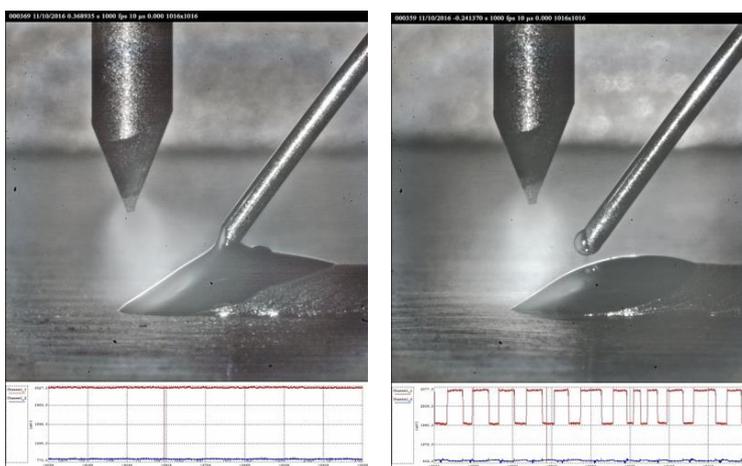


Figura 55 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação contínua e formas de transferência por ponte e destacamento, respectivamente.

Nas Figuras 54 e 55, pode-se observar que a curva vermelha (corrente do arame *Hot Wire*) apresenta um comportamento pulsado. O patamar de puzo representa quando o arame entra em contato com a poça de fusão, enquanto que o patamar de base representa o período quando este está destacado, interrompendo o circuito da corrente *Hot Wire* pela fonte, impedindo a abertura de um segundo arco elétrico, este entre o arame e a peça.

Outro fator que pode ser evidenciado é o perfil do arame na proximidade de contato com a poça de fusão, permanecendo com maior estricção quando a alimentação se dá de forma dinâmica (Figuras 56 e 57). Esse fato por ser justificado pela constante alimentação de arame

na alimentação contínua, uma maior quantidade de material a ser fundida junto a poça, diferentemente da alimentação dinâmica, que no momento de repouso de arame o material apresenta maior tendência a se destacar. Esse fato também pode ser evidenciado nas Figuras 54 e 55 (acima), analisando os períodos de permanência do arame em contato com a poça de fusão.



Figura 56 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame por trás do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e formas de transferência por ponte.



Figura 57 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame por trás do arco, Cold Wire, alimentação contínua e formas de transferência por ponte.

Para os procedimentos com alimentação de arame pela frente do arco, fica evidenciado o difícil posicionamento de arame para se alcançar os diferentes modos de transferência metálica analisados neste trabalho, ressaltando novamente a recomendação da literatura de

que procedimentos automáticos de soldagem TIG devem ser realizados com alimentação de arame por trás do arco. (Figuras 58, 59, 60 e 61).

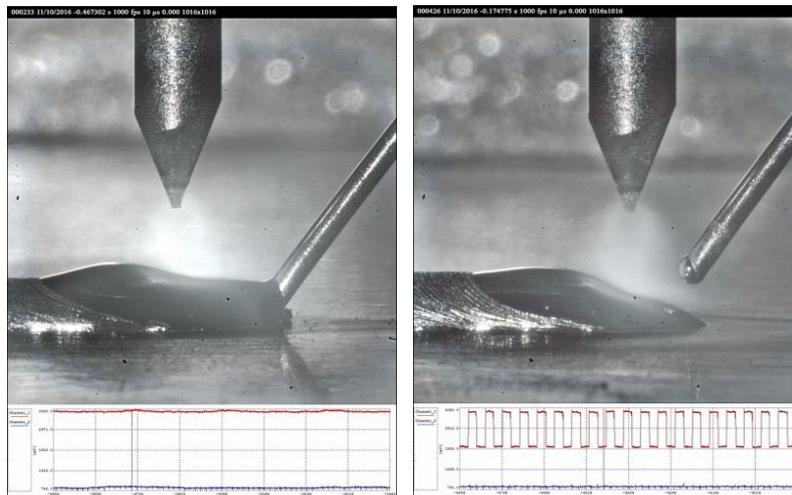


Figura 58 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e formas de transferência por ponte e destacamento, respectivamente.

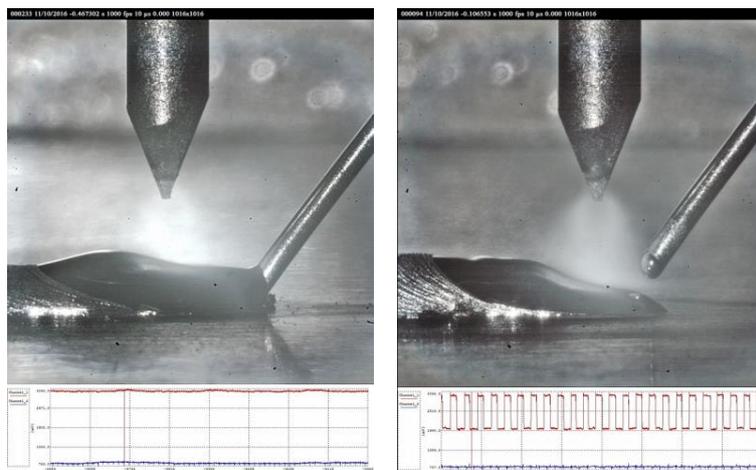


Figura 59 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação contínua e formas de transferência por ponte e destacamento, respectivamente.

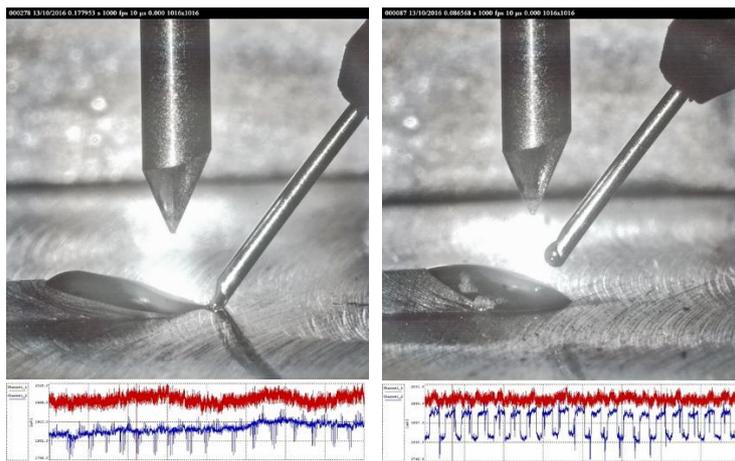


Figura 60 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e formas de transferência por ponte e destacamento, respectivamente.

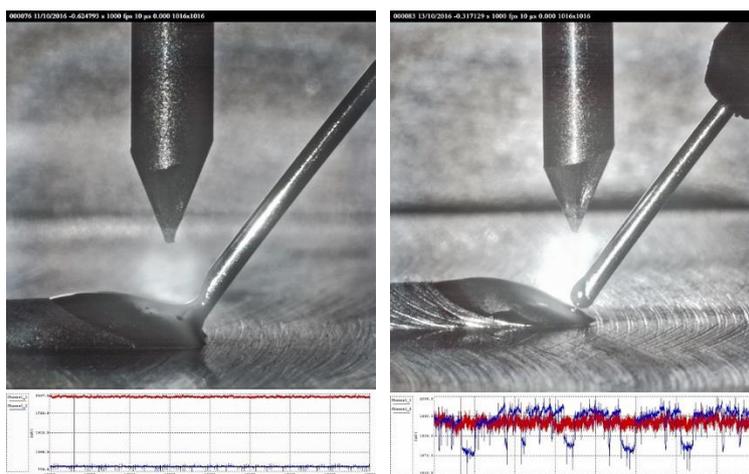


Figura 61 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação contínua e formas de transferência por ponte e destacamento, respectivamente.

Analisando as imagens da filmagem em alta velocidade, é possível inferir sobre a posição de entrada do arame na poça de fusão. Quando alimentado pela frente do arco, o arame está mais suscetível, devido a variações da DEP no decorrer do procedimento, a entrar em choque com a peça ainda sólida do material base. Essa suscetibilidade é devidamente menor quando o arame é alimentado por trás do arco. Esse fenômeno pode ser quantificado pelo tamanho da poça líquida anterior e posteriormente ao eletrodo, conforme pode ser observado na Figura 62. Este comportamento reforça o já mencionado ideal de se utilizar a adição de arame por trás do arco em aplicações automatizadas.

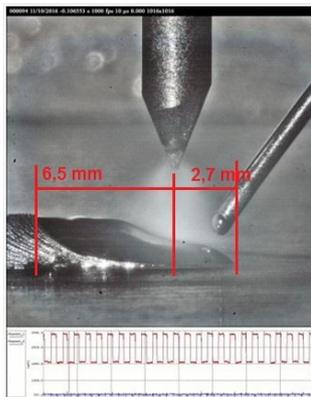


Figura 62 - Avaliação da região de alimentação de arame em procedimentos com alimentação de arame por trás do arco.

Cabe ressaltar que os procedimentos utilizando alimentação de arame pela frente do arco, *Cold Wire*, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte apresentaram uma posição atípica para proporcionar este tipo de transferência, fazendo com que o arame entrasse em choque ainda sólido contra a peça.

Ainda, um importante comportamento a ser destacado é a perturbação do arco causada pelo destacamento de arame. É facilmente percebido o deslocamento do arco quando o arame está em contato com a poça fusão, como mostra a Figura 63. O deslocamento de arco evidenciado é justificado pela formação de uma menor distância mais curta entre os eletrodos do sistema quando o arame se encontra em ponte com a poça de fusão. A mudança da resistência causada pelo destacamento gera uma variação de tensão e consequentemente da potência do sistema.

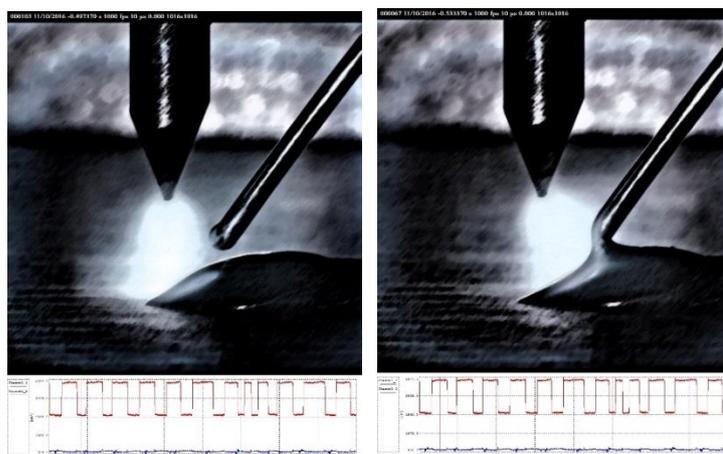


Figura 63 - Filmagem em alta velocidade do procedimento de soldagem com forma de transferência metálica por destacamento, evidenciando o comportamento de perturbação do arco.

5.3. ESTUDOS REALIZADOS POR FILMAGEM TÉRMICA

Em procedimentos de soldagem para aplicação orbital, bem como em outras aplicações que exigem uma soldagem fora de posição, um dos principais fatores a ser avaliado é o comportamento de fluidez na poça de fusão, ao passo que em posições consideradas de difícil soldagem, como a vertical e sobre cabeça, representados na Figura 64, é necessário utilizar parâmetros que controlem este fator, com objetivo de evitar o escorrimento da poça de fusão.

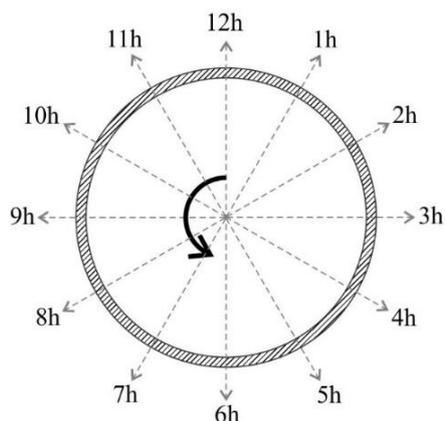


Figura 64 - Setores de divisão para parametrização de procedimentos de soldagem orbital.

[18]

A tomada de temperatura da poça de fusão pode ser utilizada para mensurar o comportamento de fluidez da poça. Shiralli [19] descreve utilizando a Figura 65 como as forças internas à poça de fusão se correlacionam nas diferentes posições de soldagem.

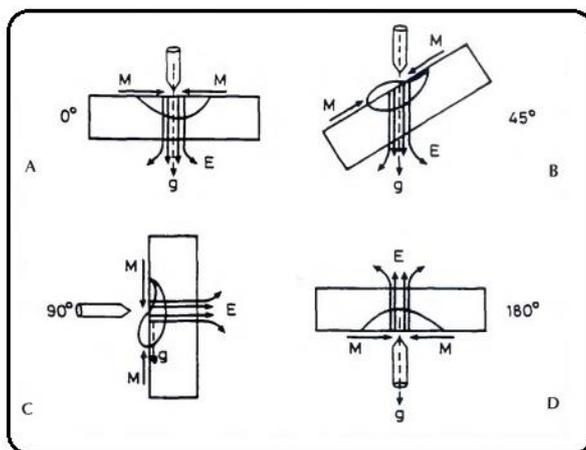


Figura 65 - Desenho esquemático evidenciando o efeito da posição de trabalho sobre o perfil de solda, correlacionando os efeitos das forças eletromagnéticas (E), força de Margoni (M) e a força da gravidade (g). [19]

Para uma avaliação deste fator foram realizados ensaios utilizando a termografia. As filmagens foram realizadas na parte posterior dos corpos de prova e os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Resultado de temperatura dos ensaios de soldagem realizados.

Amostra	Temperatura Máxima (°C)	Média Temperatura Máxima (°C)	Amostra	Temperatura Máxima (°C)	Média Temperatura Máxima (°C)
CP01	346,97	346,89	CP19	364,89	362,05
CP02	346,80		CP20	359,21	
CP03	346,10	340,61	CP21	358,76	362,80
CP04	335,11		CP22	366,83	
CP05	316,45	312,82	CP23	370,13	368,24
CP06	309,18		CP24	366,35	
CP07	340,34	346,04	CP25	342,48	344,32
CP08	351,73		CP26	346,16	
CP09	330,86	335,89	CP27	346,22	348,76
CP10	340,91		CP28	351,3	
CP13	319,92	318,43	CP29	355,31	354,53
CP14	316,93		CP30	353,74	
CP17	362,92	363,16	CP31	349,73	349,03
CP18	363,39		CP32	348,33	

Pode-se observar através da análise das temperaturas dos cordões ensaiados que a temperatura é maior para todos os procedimentos quando a alimentação de arame é realizada pela frente do arco.

Ainda, de forma geral, é evidenciado que temperatura dos cordões ensaiados utilizando o pré-aquecimento de arame é maior do que quando o arame é alimentado à temperatura ambiente. Este entendimento não deve ser erroneamente visto como uma contraposição ao fato anteriormente apresentado que a técnica *Hot Wire* apresenta menor imposição de calor na peça. Tal melhora térmica poderia ser evidenciada somente com o aumento na velocidade de material depositado, promovido pelo uso do pré-aquecimento. No entanto, no presente

trabalho optou-se por se utilizar procedimentos mantendo sempre a mesma velocidade de arame.

Devido aos ensaios terem sido realizados sobre chapa de elevada espessura, não se pôde observar uma grande diferença entre os valores de temperatura adquiridos quanto aos parâmetros de alimentação dinâmica e contínua, entretanto não foi possível repetir os testes em tempo hábil até a finalização deste trabalho.

Mesmo sabendo da limitação do procedimento adotado, cabe ressaltar os valores medidos para os procedimentos com adição de arame pela frente do arco, sem pré-aquecimento de arame (*Cold Wire*), com a alimentação em modo dinâmico e contínuo, com transferência metálica por ponte, CP25 e CP 26, e CP29 e CP30.

Para a forma de alimentação dinâmica (CP25 E CP26), foram adquiridas temperaturas máximas de 342,48 °C e 346,16 °C, enquanto quando utilizada forma de alimentação contínua (CP29 e CP30), foram adquiridas temperaturas máximas de 355,31 °C e 353,74 °C (Figura 66).

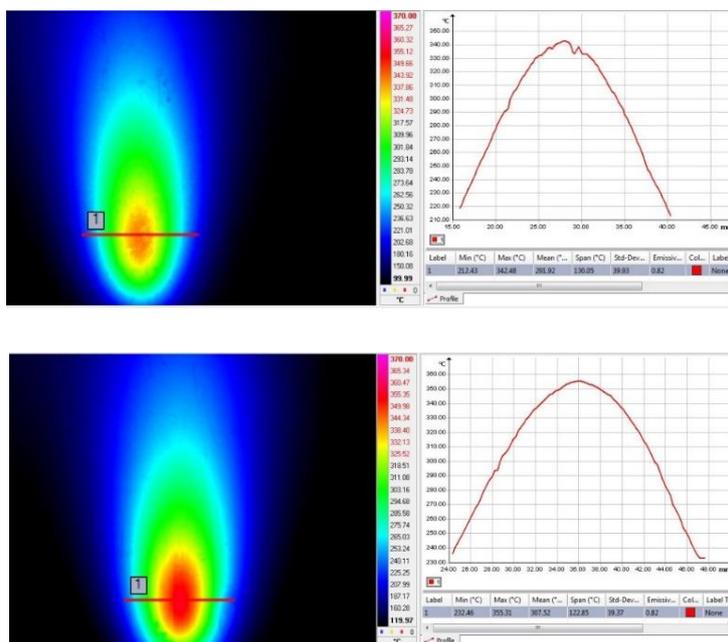


Figura 66- Comparação de ensaios de ensaios por filmagem térmica.

5.4. ANÁLISE METALOGRÁFICA

Após os ensaios de soldagem, as amostras foram preparadas para análise metalográfica. Cabe indicar que para esta etapa, todas as amostras foram analisadas em seu perfil transversal após 7,5 cm no início do cordão desconsiderando-se o início e final do cordão de solda (Figura 67), buscando uma avaliação dos aspectos metalúrgicos dos procedimentos adotados.

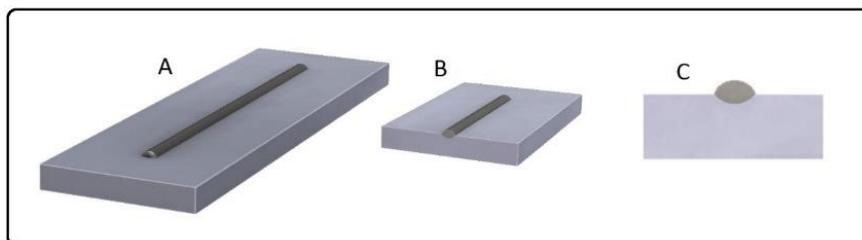


Figura 67 - Preparação da amostra para análise metalográfica. A) Chapa inteira com o cordão de 15 cm de comprimento, B) Chapa cortada a 7,5 cm do início do cordão de solda e C) Perfil da macrografia analisada.

As amostras foram lixadas utilizando-se a sequência de lixas 80, 120, 200, 400 e 1200 mesh e posteriormente procedeu-se com o polimento utilizando como abrasivo a alumina 0,2 μm . Para o ataque químico utilizou-se o procedimento por imersão em reagente Nital 2% por aproximadamente 10 s. As macrografias seguem nas Figuras 68 a 81.

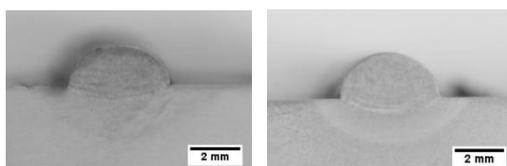


Figura 68 – CP 01e 02. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.

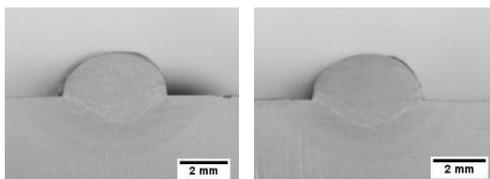


Figura 69 – CP 03 e 04. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por destacamento.

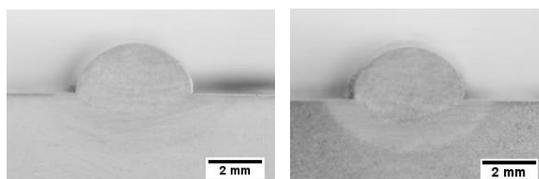


Figura 70 - CP 05 e 06. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.

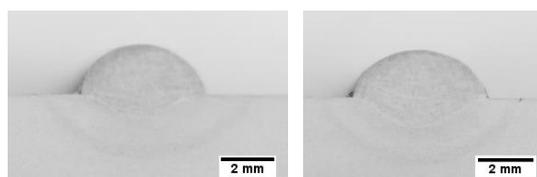


Figura 71 - CP 07 e 08. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por destacamento.

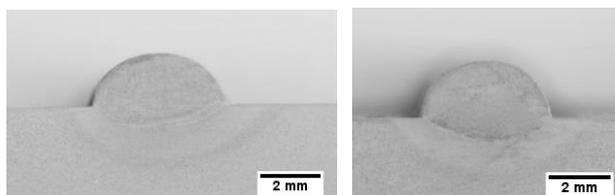


Figura 72 – CP 09 e 10. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.

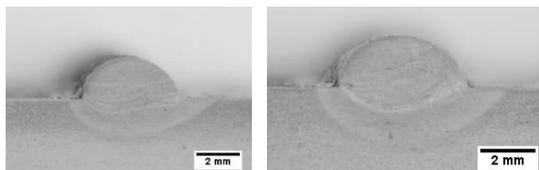


Figura 73 – CP 13 e 14. Procedimentos realizados com alimentação de arame por trás do arco, Cold Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.

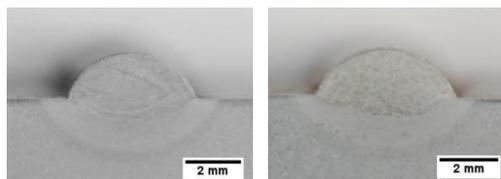


Figura 74 – CP 17 e 18. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.

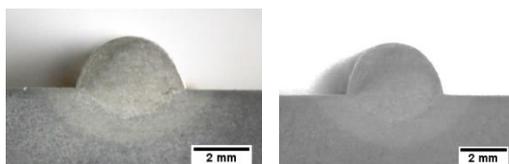


Figura 75 – CP 19 e 20. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por destacamento.

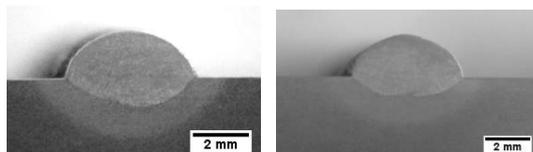


Figura 76 – CP 21 e 22. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.

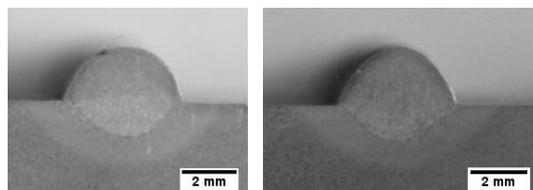


Figura 77 – CP 23 e 24. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Hot Wire, alimentação contínua e transferência metálica por destacamento.

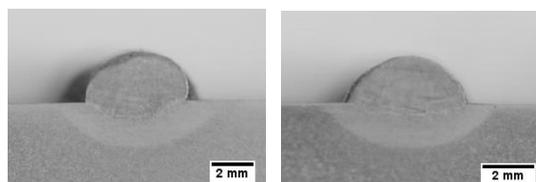


Figura 78 – CP 25 e 26. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por ponte.

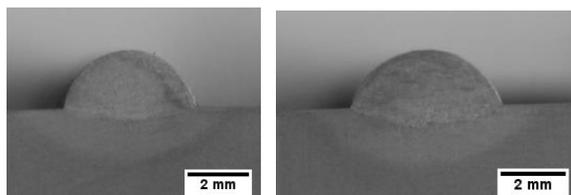


Figura 79 – CP 27 e 28. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação dinâmica (18 Hz) e transferência metálica por destacamento.

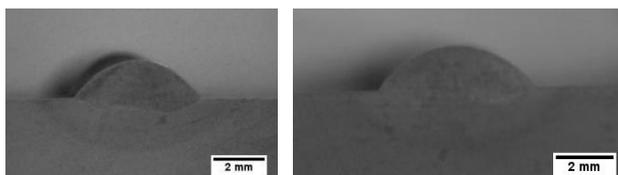


Figura 80 – CP 29 e 30. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação contínua e transferência metálica por ponte.

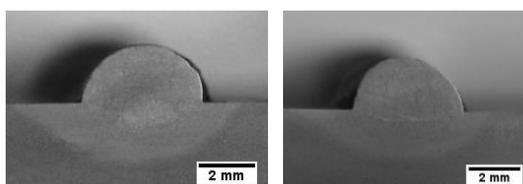


Figura 81 - CP 31 e 32. Procedimentos realizados com alimentação de arame pela frente do arco, Cold Wire, alimentação contínua e transferência metálica por destacamento.

Com a análise metalográfica das amostras soldadas foram avaliadas as relações entre reforço, largura e ângulo de molhabilidade das amostras. Os resultados seguem na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de reforço, largura e ângulo de molhabilidade das amostras macrográficas obtidas a partir dos ensaios realizados.

Amostra	Reforço (mm)	Média Reforço (mm)	Largura (mm)	Média Largura (mm)	Ângulo Molhabilidade (°)	Média Ângulo de Molhabilidade (°)
CP01	1,86	1,85	4,07	4,05	81,2	81,95
CP02	1,83		4,02		82,7	
CP03	1,71	1,69	4,30	4,24	84	85,3
CP04	1,66		4,17		86,6	
CP05	1,74	1,70	4,33	4,24	96,9	98,05
CP06	1,66		4,15		99,2	
CP07	1,61	1,59	4,58	4,70	84	82,7
CP08	1,57		4,81		81,4	
CP09	2,00	1,89	4,48	4,34	81,8	81,95
CP10	1,77		4,20		82,1	
CP13	1,73	1,79	4,40	4,56	82	82,1
CP14	1,85		4,72		82,2	
CP17	1,62	1,63	4,61	4,68	76	71,75
CP18	1,63		4,74		67,5	
CP19	1,81	2,03	3,90	4,01	74	75,9
CP20	2,24		4,11		77,8	
CP21	1,62	1,75	4,62	4,75	73,1	76,75
CP22	1,87		4,88		80,4	
CP23	1,92	2,00	4,23	4,18	76,4	75,95
CP24	2,08		4,13		75,5	
CP25	1,88	1,79	4,90	4,79	82,4	81,6
CP26	1,69		4,67		80,8	
CP27	1,86	1,80	4,35	4,47	78,1	77,25
CP28	1,73		4,58		76,4	
CP29	1,48	1,48	4,90	5,19	49,2	50,8
CP30	1,48		5,47		52,4	
CP31	2,03	2,01	4,27	4,24	83,2	81,6
CP32	1,99		4,20		80	

Quando realizada a alimentação por trás do arco, os depósitos tiveram maior molhabilidade quando o arame foi transferido de forma destacada. Já quando a alimentação foi realizada pela frente do arco, os procedimentos tiveram maior molhabilidade quando o arame foi transferido de forma por ponte.

De forma análoga, com o uso do *Software Image J*, foram realizadas medições de cálculo de diluição geométrica e cálculo na área da Zonta Termicamente Afetada (ZTA). Os resultados seguem na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de diluição geométrica, área da ZTA e penetração das amostras macrográficas obtidas a partir dos ensaios realizados.

Amostra	Diluição (%)	Média Diluição (%)	Área ZTA (mm ²)	Média Área ZTA (mm ²)	Penetração (mm)	Média Penetração (mm)
CP01	22,56	22,46	10,54	9,22	0,58	0,575
CP02	22,36		7,89		0,57	
CP03	33,31	31,49	13,77	12,35	1,11	1,07
CP04	29,67		10,92		1,03	
CP05	27,49	26,36	9,75	9,32	0,68	0,745
CP06	25,22		8,89		0,81	
CP07	29,67	28,90	12,27	11,70	0,79	0,96
CP08	28,13		11,12		1,13	
CP09	28,69	27,73	9,09	8,31	0,79	0,79
CP10	26,76		7,52		0,79	
CP13	24,55	25,68	7,97	8,68	0,68	0,78
CP14	26,81		9,38		0,88	
CP17	30,25	29,82	9,25	8,54	0,84	0,785
CP18	29,38		7,83		0,73	
CP19	31,00	29,30	8,19	9,28	1,07	1,115
CP20	27,6		10,37		1,16	
CP21	33,78	31,72	9,77	10,15	1,05	0,97
CP22	29,66		10,53		0,89	
CP23	34,27	33,92	11,65	10,87	1,25	1,25
CP24	33,56		10,08		1,25	
CP25	16,91	17,43	12,03	10,82	0,90	0,84
CP26	17,95		9,60		0,78	
CP27	18,12	21,01	7,89	8,11	0,42	0,51
CP28	23,89		8,33		0,60	
CP29	24,85	24,50	11,48	11,64	0,56	0,575
CP30	24,14		11,79		0,59	
CP31	28,83	30,05	11,38	10,34	0,83	0,76
CP32	31,27		9,30		0,69	

A maior molhabilidade é evidenciada por uma maior largura do cordão, juntamente a um menor reforço.

Quando aplicados em passes de raiz e preenchimento, o parâmetro de penetração torna-se vital para a aprovação do procedimento e do resultado da solda, a fim de evitar o aparecimento de defeitos de continuidade tais como falta de fusão e falta de penetração. Para este, evidenciou-se a diminuição da penetração nos procedimentos com pré-aquecimento quando o arame foi transferido por ponte. Conforme já discutido anteriormente, o aumento da penetração destes se deu devido à escolha de se manter constante a velocidade de arame, impossibilitando a observação da diminuição da penetração. A maior penetração, normalmente evidencia também um aumento na diluição do perfil da solda. Enquanto para procedimentos de passes de raiz e preenchimento a alta penetração é desejada, seu alto valor torna-se um obstáculo para aplicações de revestimento.

As análises das áreas da ZTA não se mostraram conclusivas, devido provavelmente ao material de base utilizado.

6. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICO

Devido a necessidade de muitas vezes o procedimento de soldagem TIG ser realizado de forma manual, foram realizados ensaios buscando avaliar os benefícios trazidos pelo processo TIP TIG quando executado de forma semiautomática. Foram realizados ensaios manuais de soldagem, utilizando a tocha de soldagem TIP TIG semiautomática adaptada internamente no LABSOLDA (Figura 82). O objetivo no ensaio consistiu na observação da influência de fatores como posição de alimentação de arame nas vertentes de alimentação contínua e dinâmica de arame no procedimento manual.

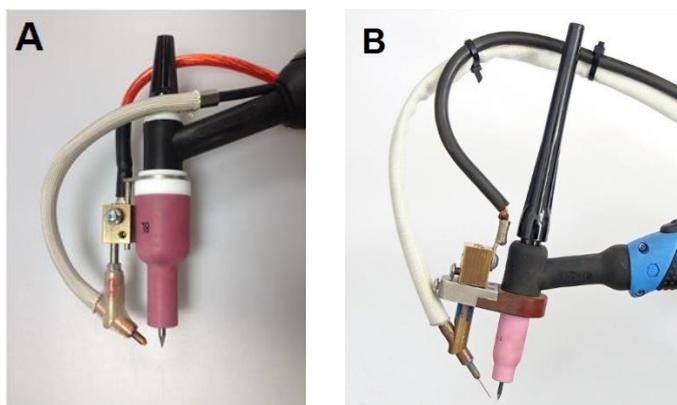


Figura 82 - Tochas de soldagem semiautomáticas, A) fornecida pelo fabricante TIP TIG USA [17], B) adaptada internamente no LABSOLDA.

Além destes, jugou-se importante determinar a dificuldade das operações semiautomáticas. Para tanto, um operador com pouca experiência prática manual realizou os ensaios.

A técnica utilizada pelo operador, comumente abordada na literatura como *Walking the Cup* (Figura 83), utiliza o chanfro como um suporte físico para o bocal de gás de proteção. Assim, utilizando desse suporte para garantir que a distância entre o eletrodo e a peça (DEP) seja mantida, e garantindo a fusão nos dois lados do chanfro.

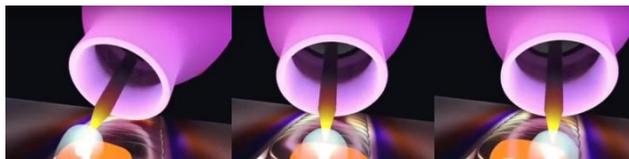


Figura 83 - Técnica para soldagem TIP manual conhecida como Walking the Cup. (Fonte: Imagens extraídas de: Walking the cup in 3D animation, retirado de <https://www.youtube.com/watch?v=HOkGYbu15nk>).

Foram realizados dois ensaios de soldagem, um com alimentação contínua de arame (amostra A), e um com alimentação dinâmica (amostra B) de arame. Os dois ensaios foram realizados com adição de arame pela frente do arco. A adição de arame por trás de arco se mostrou insatisfatória, devido ao alto índice de ocorrência de contaminação do eletrodo.

Os parâmetros utilizados para os ensaios seguem discriminados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados para os ensaios de soldagem semiautomáticos.

Amostra	A	B
Posição de Alimentação de Arame	Pela frente do arco	Pela frente do arco
Forma de Alimentação de Arame	Contínuo	Dinâmico (18 Hz)
Corrente do Arco (A)	130	130
Corrente do Arame (A)	75	75
Velocidade de Arame (m/min)	0,7	0,7
Material Base	SAE AISI 1020	SAE AISI 1020
Espessura Chapa (mm)	9,5	9,5
Tipo Chanfro	V	V
Ângulo Chanfro (°)	45	45
GAP (mm)	2	2
Nariz (mm)	0	0
Arame de Adição	ER 70S-6	ER 70S-6
Diâmetro Arame de Adição	1,00	1,00

Seguem imagens dos reforços e das raízes dos ensaios realizados (Figuras 84 e 85).



Figura 84 – Procedimento de raiz realizado com processo TIG com alimentação contínua de arame.

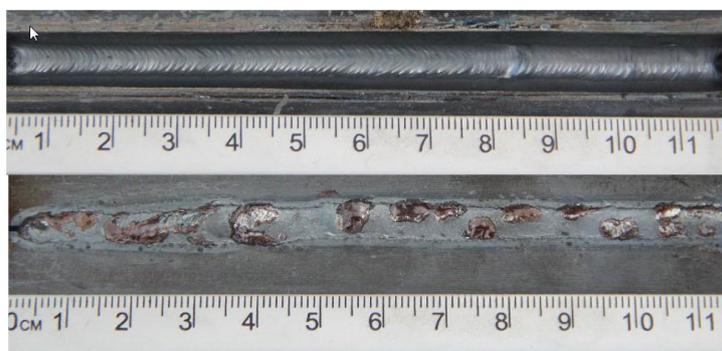


Figura 85 – Procedimento de raiz realizado com processo TIG com alimentação dinâmica de arame.

Os corpos de prova foram ainda preparados metalograficamente, e ambos validados conforme a ausência de defeitos e descontinuidades metalúrgicas, evidenciados na Figura 86.

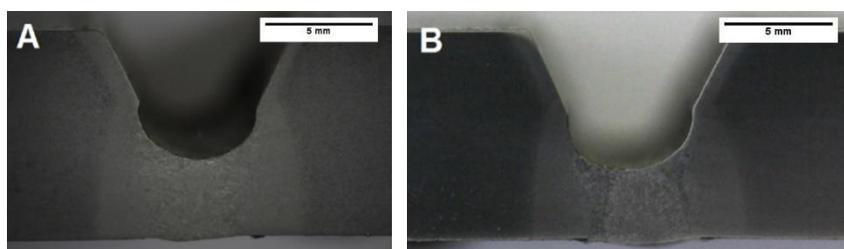


Figura 86 - Macrografias das amostras de soldagem semiautomática realizadas com alimentação contínua (A) e alimentação dinâmica de arame (B).

Cabe ressaltar, que devido à dificuldade de controle de transferência metálica durante o processo comparado ao processo automático, a forma de transferência estabelecida foi de destacamento, não se encontrando uma uniformidade nos destacamentos devido ao movimento do operador, o que pode ser observado por meio da Figura 87.

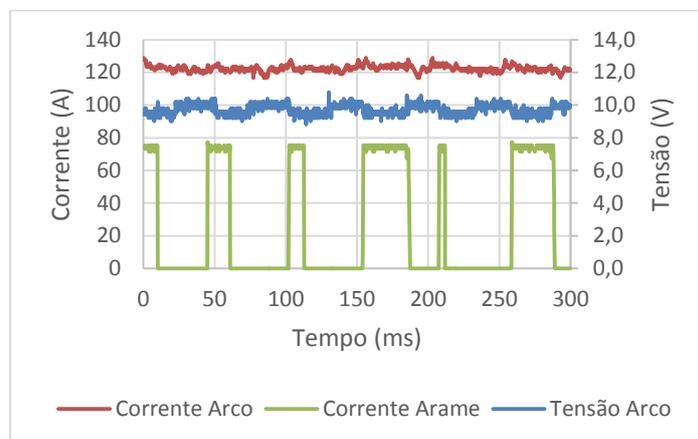


Figura 87 - Aquisição de dados do procedimento de soldagem TIG semiautomático com alimentação dinâmica de arame.

7. APLICAÇÃO DO PROCESSO PARA PREENCHIMENTO DE CHANFRO COM LIGA INCONEL 625

Paralelamente à caracterização geral da alimentação dinâmica de arame no processo de soldagem TIG, o trabalho tratou do estudo e aplicação em um procedimento de preenchimento de chanfro para soldagem destinada a produção de tubos de extração de petróleo, conhecidos como *Raisers*.

Com o objetivo de analisar a viabilidade de se utilizar o equipamento abordado no presente trabalho na aplicação de soldagem interna de tubos de aço cladeados com liga 625, foram realizados ensaios de soldagem com a primeira intenção de escolha avaliação da geometria do chanfro.

Por se tratar de um procedimento de soldagem dissimilar, existem alguns obstáculos que tornam a sua execução uma tarefa de maior complexibilidade, como a molhabilidade do metal de adição Inconel 625 na junta, fazendo com a geometria do chanfro seja de elevada importância para a execução do procedimento.

Para avaliar a molhabilidade do metal de adição escolheu-se inicialmente a posição plana, em soldagem em chapas de aço carbono de modo a simular as diferentes situações e posições de soldagem.

Os testes foram inicialmente realizados sobre chanfro tipo “V” com 30° (60° no bisel), conforme ilustra a Figura 88. Esse chanfro foi escolhido devido sua relativa simplicidade na usinagem e preparação da mesma. Simulando uma aplicação em uma junta de peças reais.

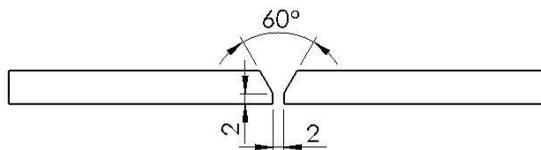


Figura 88 - Configuração de chanfro "V" 30° utilizada.

O passe de raiz foi realizado com o processo MIG com metal de adição ER 70S-6 pelo lado oposto ao chanfro que posteriormente receberá, por meio do processo TIG, o preenchimento com material de adição Inconel 625, conforme pode-se observar na Figura 89.

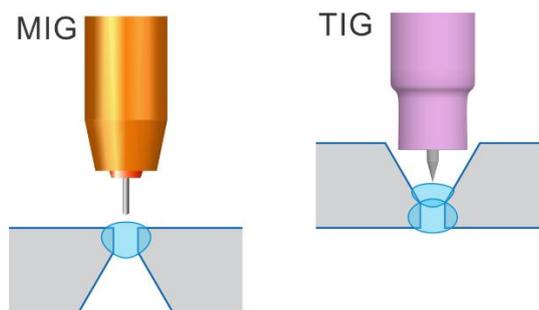


Figura 89 - Esquema da soldagem para avaliação do chanfro na posição plana.

Os ensaios foram realizados com os parâmetros de soldagem da Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados no procedimento de preenchimento de junta de chanfro "V" com 30° com adição de Inconel 625.

Diâmetro do Eletrodo (mm)	3,2
DEP (mm)	4
Corrente Principal (A)	170
Corrente Arame (A)	75
Velocidade de Soldagem (cm/min)	10
Velocidade de Arame (m/min)	1,5
Vazão Gás de Proteção (l/min)	12
Amplitude de Tecimento (mm)	3
Velocidade de Tecimento (mm/s)	10

Após a solda realizada com o chanfro "V" com 30°, o corpo de prova foi preparado e analisado metalograficamente. O mesmo foi considerado reprovado, sendo muito estreito para a aplicação com um material de adição com tais características de fluidez. O resultado apresentou em falta de fusão entre o passe de raiz e o passe de preenchimento com Inconel 625, conforme pode-se observar na Figura 90.

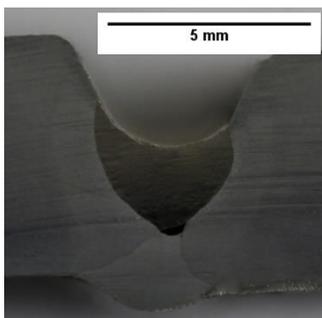


Figura 90 - Macrografia do procedimento de preenchimento de junta de chanfro "V" com 30° com adição de Inconel 625.

Assim, foi buscado se modificar a configuração do chanfro adotado, para possibilitar o melhor preenchimento do chanfro com o material de adição, mantendo-se os mesmos parâmetros de soldagem adotados no primeiro teste. Ainda visando a facilidade na usinagem e preparação do chanfro, optou-se em utilizar um chanfro “V” com 45°. Este foi novamente ensaiado e o corpo de prova preparado e analisado metalograficamente, conforme se observa na Figura 91.

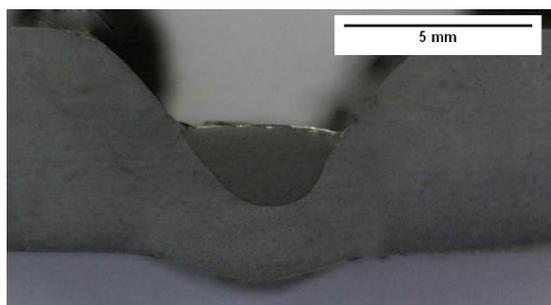


Figura 91 - Macrografia do procedimento de preenchimento de junta "V" com 45° com adição de Inconel 625.

Segundo análise metalográfica, o procedimento de soldagem foi considerado aprovado, evidenciando a ausência de defeitos internos e externos ao cordão.

Para uma maior avaliação de um procedimento onde são utilizados materiais dissimilares, a diluição torna-se um dos principais parâmetros a ser analisado, ao ponto que uma maior diluição cause uma maior troca de material entre o adicionado e a base, resultando na diminuição das propriedades mecânica e químicas do material adicionado. Neste caso, o problema envolve em diluir o mínimo teor de ferro na liga de níquel, fazendo com o material adicionado mantenha sua propriedade de resistência à corrosão.

Para tanto se avaliou a diluição do material de adição no metal de base. Os resultados seguem na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados na diluição geométrica nos procedimentos de soldagem com chanfro de 30° e 45°.

Ângulo (°)	Cordão	Diluição (%)	Média (%)	Desv. Pad.
30	1	41,6	43,8	2
	2	45,4		
	3	44,5		
45	1	10,9	10,3	0,6
	2	10,3		
	3	9,6		

Cabe ressaltar que para estes procedimentos não foi, nestas etapas, utilizada a alimentação dinâmica de arame. Esta técnica deve ser testada em trabalhos futuros.

Os ensaios realizados sobre o chanfro com abertura de 45° se mostraram mais satisfatórios do que os realizados sobre o chanfro com abertura de 30°. A maior abertura do chanfro proporcionou o melhor posicionamento da tocha devido a uma maior facilidade de acesso à zona a ser fundida. Estes podendo ser evidenciados pela ausência de defeitos como falta de fusão no chanfro mais aberto, além da evidente diminuição da diluição entre os passes.

8. CONCLUSÕES

Como o trabalho tratou de ampla gama de ensaios com o objetivo de uma completa caracterização do processo de soldagem TIG com alimentação de arame dinâmica em alta frequência, as conclusões serão discutidas em tópicos, para um melhor entendimento.

Durante ensaios de soldagem, foi evidenciado que a movimentação de arame do sistema de soldagem comercial TIP TIG não apresenta o movimento de recuo de arame, assim, todas as conclusões discutidas, devem ter tal fato considerado. Este fato provavelmente pode ser explicado por uma possível folga entre o conduíte e o mangote e/ou entre o conduíte e o arame no mangote da tocha de soldagem.

- A forma de alimentação dinâmica de arame, por ser dividida entre movimento de avanço e recuo, apresenta uma velocidade média de avanço maior do que quando o arame é alimentado de forma contínua. Dessa forma o arame percorre por um menor tempo as isoterms do arco até entrar em contato com a poça de fusão. Assim, o arame quando alimentado de forma contínua apresenta uma maior tendência ao destacamento e à formação de gotas grandes que aumentam a probabilidade de contaminação do eletrodo.
- Com a análise da velocidade de arame e a corrente *Hot Wire*, é possível a mensuração da influência do pré-aquecimento do arame com a temperatura média final deste. Pode-se perceber a relação indireta da velocidade de arame com o pré-aquecimento de arame e a relação direta com a corrente *Hot Wire* utilizada no procedimento.
- Com os parâmetros adotados para a caracterização do processo, foi descartado o procedimento utilizando alimentação de arame por trás do arco, *Cold Wire*, transferência metálica por destacamento, para as alimentações dinâmica e contínua. Esta determinação justificada pela grande tendência de contaminação do eletrodo.
- Procedimentos de soldagem TIG automatizados são mais suscetíveis a grandes variações no cordão de solda devido às variações na DEP quando o arame é alimentado pela frente do arco, este justificado pela menor região de poça líquida na frente do eletrodo para a alimentação de arame.
- Quando utilizada a forma de transferência metálica por destacamento, foi evidenciado que o arame permanece em contato com a poça de fusão por um maior tempo quando realizada a alimentação contínua. Esse fato deve-se pela alimentação contínua, como o

próprio nome supõe estar alimentando arame em todos os intervalos do período. Diferentemente do que acontece na alimentação dinâmica, quando durante o período de repouso do arame, este apresenta maior estrição e maior tendência ao comportamento de destacamento.

- Quando realizada a alimentação de arame pela frente, é evidenciada uma maior temperatura de cordão de solda para todos os procedimentos ensaiados.
- Devido à escolha do autor em utilizar a mesma velocidade de arame e corrente para todos os procedimentos, é evidente a maior temperatura dos cordões de solda para os procedimentos realizados com pré-aquecimento de arame.
- Evidenciou-se a diminuição da penetração nos procedimentos com pré-aquecimento quando o arame foi transferido por ponte;
- Não foi possível uma correlação entre a área da ZTA com os parâmetros de alimentação de arame. Este fato deve-se as características metalúrgicas da liga do metal de base.
- Para as aplicações manuais analisadas pelo trabalho, os processos com alimentação dinâmica e contínua de arame não se mostraram díspares quanto à sua facilidade de operação, tendo que sua fácil operabilidade se deveu também à utilização da técnica conhecida como *Walking the Cup*.

O conhecimento desses parâmetros representa um alicerce para que outras vertentes de processos de soldagem que utilizam alimentação dinâmica possam ser mais bem compreendidas e novas modalidades de processos possam ser discutidas e aplicadas na indústria, possibilitando um avanço na ciência e na aplicação da engenharia de soldagem.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de ensaios de soldagem com o uso de filmagem térmica sobre chapas de menor espessura com as vertentes analisadas na caracterização do processo automático, buscando melhor evidenciar o comportamento térmico da poça de fusão com a alimentação dinâmica e contínua de arame.
- Realização de ensaios de soldagem com as vertentes analisadas na caracterização do processo automático fora de posição, buscando analisar o comportamento de operacionalidade no procedimento em aplicações orbitais, evidenciando fatores como fluidez da poça de fusão e tendência a contaminação do eletrodo.
- Realização de ensaios de soldagem em ligas metálicas que sofram maior influência dos aquecimentos da soldagem sobre suas características metalúrgicas, buscando determinar a influência da alimentação dinâmica de arame em suas propriedades mecânicas.
- Realização de filmagem térmica de arame pré-aquecido sem a presença do arco voltaico.
- Realização de análise microscópica, analisando o refino de grão com a alimentação dinâmica de arame, com a avaliação de porosidades e microporosidades.
- Realização de ensaios, avaliando a angulação na alimentação de arame.

REFERÊNCIAS

- [1] **História do Processo de Soldagem TIG** – Retirado de: <http://guias.oxigenio.com/historia-do-processo-de-soldagem-tig>, acesso em 05 de outubro de 2016.
- [2] OLIVARES, E. A. G, DÍAZ V. M. V., **Estudo do processo TIG Hot-Wire com material de adição AISI-316L analisando o efeito do sopro magnético do arco sobre a diluição do cordão de solda**. Soldagem & Inspeção, 2016, p. 330 – 341
- [3] GODINHO, C. **Estudo comparativo entre a injeção tangencial e transversal de arame no processo TIG**. XLII CONSOLDA, 2016, Belo Horizonte.
- [4] Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem, **Módulo 4 – Processos de Soldagem**, 16ª Edição, 2009
- [5] CIRINO, L. M. **Estudos dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG**. Florianópolis, Brasil : UFSC, 2009.
- [6] CAMPBELL, R.D. e LaCOURSIERE, E. J. **A Guide to the Use of Tungsten Electrodes for GTA Welding**. Welding Journal. Janeiro de 1995, Vol. 74, pp. 39-45.
- [7] SCHWEDERSKY, M.B.; DUTRA, J.C.; OKUYAMA, M.P.; SILVA, R.H.G. **Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos**. Soldagem e Inspeção, 2011. v. 16, p 333-340.
- [8] REIS, R.P.; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem plasma**. São Paulo: Artiliber Editora Ltda, 2007, 147p.
- [9] KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002, 461p.
- [10] RICHARDSON, M. **Semiautomatic Cold Wire Feeder Systems Increase GTA Productivity**. Welding Journal. Janeiro de 1995, Vol. 74, pp. 51-54.
- [11] WILSON, M. **TIP TIG: new technology for welding**. **Industrial Robot: An International Journal**, 2007, v. 34. P. 462-466.

- [12] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 2ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2014, 288p.
- [13] PAES, L. E. S; **Uma solução para determinação da velocidade de arame no processo TIG com alimentação dinâmica**. XLII CONSOLDA, 2016, Belo Horizonte.
- [14] SPILLE-KOHOFF, A., **Arc welding: From process simulation to structural mechanics. Part I: Process simulation with ANSYS CFX**. CFX Berlin Software GmbH, EASC, Munich, Germany, 2009.
- [15] PIGOZZO, I. O., **Soldagem TIG orbital: Otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- [16] CALLEN, H. B., **Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics** - John Willey & Sons - University of Pensilvania
- [17] **TIP TIG USA Data Sheet Final**. Retirado de: <http://www.tiptigusa.com/wp-content/uploads/2015/04/Robo-TiPTiG-Data-Sheet-Final.pdf>, acesso em 05 de julho de 2016.
- [18] KINDERMANN, R. M.; **Soldagem orbital do passe de raiz – Algoritmos para controle adaptativo por meio de sensoriamente laser**. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de mestrado, 2016.
- [19] SHIRALI, A. A.; MILLS, K. C.; **The effect of welding parameters on penetration in GTA welds – Base metal sulfur content plays a role in how welding variable affect penetration**. Welding Research Supplemente, p.347 – 353, New York, 1991.