

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM ROBOTIZADA TANDEM
GMAW DO AÇO ASTM A572 G50**

Luis Felipe Scalet Rossini

São Carlos-SP

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM ROBOTIZADA TANDEM
GMAW DO AÇO ASTM A572 G50**

Luis Felipe Scalet Rossini

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Prof. José Eduardo Spinelli

São Carlos-SP
2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Rosana Scalet Rossini e João Roberto Rossini pelo esforço e dedicação em nos garantir a melhor educação.

VITAE

Pós graduação Lato Sensu em Engenharia de Produção pela Universidade de São Paulo (2014)

Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (2012)

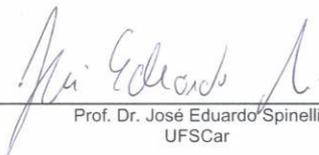


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

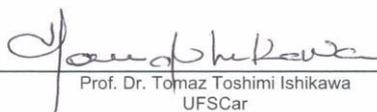
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Luis Felipe Scalet Rossini, realizada em 31/10/2018:



Prof. Dr. José Eduardo Spinelli
UFSCar



Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa
UFSCar



Prof. Dr. José Marcelino da Silva Dias Filho
UNICAMP

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção e saúde.

Minha família pela educação e suporte durante toda minha trajetória.

Minha esposa Tatiani por me suportar e orientar durante toda a realização deste mestrado.

Meus colegas da UFSCar pelo companheirismo e suporte nos experimentos.

Meus amigos de trabalho pelo apoio e ajuda na preparação dos corpos de prova.

Meu orientador Prof. José Eduardo Spinelli pelo suporte, transferência de conhecimento e pela paciência durante toda a orientação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O processo de soldagem tandem utiliza dupla alimentação de arame em uma única tocha, proporcionando aumento da taxa de deposição e consequente redução nos tempos de processo. Entretanto, aumenta-se a complexidade do processo, pois, a correta combinação dos parâmetros é primordial para evitar a ocorrência de interferência entre os arcos elétricos e falhas, como por exemplo, geometria inadequada, fundição acentuada do metal base, resultando consequentemente em falhas de aplicação. O entendimento do processo e a otimização dos tempos de ciclo são as motivações deste trabalho, tendo como proposta analisar a presença de defeitos e as alterações geradas na microestrutura e resistência mecânica através da variação dos modos de transferência metálica, angulação da tocha de soldagem e consequente variação do aporte de calor. Em todas as variações de parâmetros, foram fabricados corpos de prova de aço estrutural ASTM A572 G50 soldados com metal de adição ER70S-6, utilizando estações de solda robotizada de uma Empresa Multinacional. O volume de solda depositado foi o mesmo em todas as variações de parâmetros, permitindo a análise comparativa da qualidade da junta e presença de defeitos. A probabilidade de ocorrência de defeitos foi analisada pela aquisição simultânea dos valores de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame, enquanto que o perfil de penetração e a dimensão da zona afetada pelo calor foram avaliados através de macrografias. Já as análises de microestrutura das zonas fundida e afetada pelo calor foram realizadas através de microscopia óptica, enquanto que para a determinação da resistência mecânica foi realizado ensaio de perfil de microdureza Vickers. Após diferentes condições de ensaio encontrou-se a melhor combinação de parâmetros, onde o arame master foi parametrizado em corrente contínua e o arame slave com transferência pulsada, obtendo-se velocidade de deslocamento do robô 19,3% mais rápida e nenhuma ocorrência de anomalias nos arcos elétricos.

Palavras-chave: Soldagem GMAW; Soldagem tandem; Soldagem robotizada.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF THE TANDEM GMAW ROBOTIC WELDING PROCESS OF A ASTM A572 G50 STEEL

The tandem welding process employs double wire feed in a single torch, providing increased deposition rate and consequent reduction in process times. However, the process complexity increases because the correct combination of parameters is essential to avoid the occurrence of interference between the electric arcs and defects, such as inadequate geometry, accentuated base metal casting, which results in failures under service conditions.

The understanding of the TANDEM process and the optimization of the cycle times are the motivations of this work, having as a proposal to analyze the presence of defects and the changes in the microstructure and the mechanical strength through the variation of the modes of metallic transfer, angulation of the welding torch and consequent heat input variation.

For all parameter variations, ASTM A572 G50 structural steel test pieces welded with ER70S-6 welding wire have been fabricated using robotic welding stations from a Multinational Company. The volume of the weldments has been the same in all variations of parameters, allowing a comparative analysis of the quality of the joint and presence of defects. The probability of occurrence of defects has been analyzed by the high-frequency acquisition of the values of current, voltage and wire feed speed, while the penetration profile and the dimension of the heat affected zone have been examined through macrographs. The analysis of the microstructure of the molten and heat affected areas has been carried out using an optical microscope, while for the determination of the strength, Vickers micro hardness profiles have been obtained. After different test conditions, the best combination of parameters was found, where the master wire was parameterized in continuous current and the slave wire with pulsed metallic transfer, obtaining a 19,3% higher displacement speed of the robot and no occurrence of anomalies in electrical arcs.

Keywords: GMAW welding; Tandem welding; Robotic welding.

PUBLICAÇÕES

ROSSINI, L.F.S.; REYES, R.V.; SPINELLI, J.E. Tandem GMAW Robotic Welding Process of HSLA50 Steel. Artigo submetido ao periódico Welding Journal.

ROSSINI, L.F.S.; SPINELLI, J.E.; REYES, R.V. Otimização do Processo de Soldagem Tandem Robotizada - Variação dos Modos de Transferência e Controle de Qualidade da Junta. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM – XLIII CONSOLDA. Joinville - Sc. Novembro, 2017.

ROSSINI, L.F.S.; SPINELLI, J.E.; REYES, R.V. Otimização do Processo de Soldagem Robotizada: Comparativo entre Alimentações de Arame Simples e Tandem. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM – XLII CONSOLDA. Joinville - Sc. Novembro, 2016.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1 Processo de soldagem GMAW	5
3.2 Processo de soldagem tandem GMAW	10
3.2.1 Configurações de conexão dos eletrodos	11
3.2.2 Configurações de posicionamento dos arames	13
3.2.3 Comportamento dinâmico e interferência entre arcos	14
3.2.4 Efeitos da diferença de fases nos arcos elétricos	16
3.2.5 Efeitos da configuração dos bicos nos arcos elétricos.....	22
3.2.6 Efeitos da composição do gás de proteção nos arcos elétricos	27
3.3 Aços ARBL eletricamente soldados.....	31
3.3.1 Ciclo térmico e curva CCT do aço ASTM A572 G65	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1 Materiais	37
4.1.1 Geometria dos corpos de prova.....	37
4.2 Métodos	38
4.2.1 Procedimento de Soldagem.....	38
4.2.2 Aquisição de dados de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame instantâneos.....	40
4.2.3 Ensaio de microdureza Vickers.....	41
4.2.4 Macrografia e Evolução Microestrutural.....	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43

5.1	Análise macrográfica das juntas soldadas	43
5.2	Análise de dados de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame instantâneos	45
5.3	Perfil de microdureza Vickers.....	59
5.4	Análise microestrutural.....	62
6	CONCLUSÕES	67
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	69
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 - Parâmetros operacionais de acordo com a variação de distância do ponto de contato [31].	27
Tabela 2 - Composições químicas dos aços ASTM A572 - % em peso [20]. ..	35
Tabela 3 - Requisitos de resistência nominal à tração para os aços ASTM A572 G50 e G65 [20]......	35
Tabela 4 - Composição química do metal de base ASTM A572 G50.	37
Tabela 5 - Composição química do metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.....	37
Tabela 6 - Parâmetros utilizados nas condições 1, 2 e 3.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da configuração experimental para o processo de soldagem tandem GMAW.....	1
Figura 2 - Representação esquemática do processo de soldagem GMAW [7]. .	5
Figura 3 - Representação esquemática da pulsação de corrente: I_p – corrente de pico; I_b – corrente de base; t_p – tempo de pico; t_b – tempo de base [8].....	8
Figura 4 - Relação entre amplitude e duração de pulso para garantir a transferência de uma gota por pulso (arame de aço carbono 1,2mm em mistura de gases 95% argônio e 5% CO_2) [6].	9
Figura 5 - Representação esquemática de um sistema com potencial único conectado à uma fonte de soldagem [13].	11
Figura 6 - Representação de um sistema com potencial único conectado à duas fontes de soldagem [13].....	12
Figura 7 - Representação de um sistema com potencial isolado [13].	13
Figura 8 - Representação das configurações em relação ao posicionamento dos arames. a) Longitudinal ou “tandem”; b) Transversal ou “lado a lado”.	13
Figura 9 - Representação do fenômeno de deflexão de arcos no processo de soldagem tandem GMAW [24].	15
Figura 10 - Típica curva de corrente pulsada alternada em 180° [26].....	17
Figura 11 - Típica curva de corrente pulsada sincronizada [26].....	17
Figura 12 - Curvas de corrente e tensão para defasagem alternado 180° [27].	18
Figura 13 - Curvas de corrente e tensão para modo de fase sincronizado [27].	18
Figura 14 - Exemplo de defasagem de pulsos da corrente de pico entre os arames ‘master’ e ‘slave’ [28].....	20
Figura 15 - Quantidade de ocorrências de tensões anormais e interrupções de arco no arame ‘slave’ pela variação da defasagem de pulso [28].	20
Figura 16 - Quantidade de ocorrências de tensões anormais e interrupções de arco no arame ‘master’ pela variação da defasagem de pulso [28].	21
Figura 17 - Análise do comportamento dos arcos elétricos com a aplicação de um atraso de pulso de 0,5 ms no arame ‘slave’ [28].	22

Figura 18 - Esquema de configuração de tocha experimental que permite variação de distância e ângulo entre arames utilizada por Ueyama et al [30].	23
Figura 19 - Efeitos da inclinação dos arames na aparência do cordão e no perfil de penetração, sendo os melhores resultados obtidos com inclinação para posição empurrada do arame 'slave' [30].	24
Figura 20 - Formação da Poça de fusão para a primeira condição, onde ambos os arames estão à 0° e para a segunda condição, onde o arame 'slave' está empurrando com angulação de 9° [30].	25
Figura 21 - a) Tocha Cloos configuração fixa; b) Tocha Esab com configuração variável e as respectivas dimensões utilizadas nos experimentos [31].	26
Figura 22 - Comportamento do arco elétrico com diferentes proporções de gás carbônico na mistura de proteção gasosa [35].	28
Figura 23 - Comportamento do arco elétrico com diferentes proporções de hélio na mistura de proteção gasosa [35].	29
Figura 24 - Ocorrências de tensões anormais e interrupções do arco elétrico em função da variação da proporção de gás carbônico na mistura de proteção gasosa [26].	30
Figura 25 - Comparativo dos comportamentos dos arcos elétricos: a) mistura gasosa de 98% argônio e 2% gás carbônico; b) mistura gasosa de 75% argônio e 25% gás carbônico.	31
Figura 26 - Atlas do aço ASTM A572 grau 65 levantado a partir dos dados experimentais [23].	36
Figura 27 - Corpo de prova para junta em ângulo. Dimensões em mm.	38
Figura 28 - Posicionamento do corpo de prova e tocha de soldagem tandem.	39
Figura 29 - Sistema de aquisição de dados SAP V4 duplo responsável por adquirir 3000 medições por segundo.	41
Figura 30 - Linhas para realização de perfil de microdureza de juntas em ângulo de acordo com norma ISO 9015-2 [34].	42
Figura 31 - Comparativo de perfil de penetração para corpos de prova em aço estrutural ASTM A572 G50 soldados com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Condição 1 destacada em azul, condição 2 destacada em vermelho e condição 3 destacada em verde	44

Figura 32 - Comparativo da zona afetada pelo calor para corpos de prova em aço estrutural ASTM A572 G50 soldados com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Condição 1 destacada em azul, condição 2 destacada em vermelho e condição 3 destacada em verde.	45
Figura 33 – Evolução da variação de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 1 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	47
Figura 34 - Ocorrência de interrupção do arco elétrico para o arame slave no intervalo entre 15,04 e 15,06s durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	48
Figura 35 - Evolução da variação de corrente e tensão de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 2 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	49
Figura 36 - Evolução da variação da velocidade de alimentação de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 2 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	50
Figura 37 - Visualização detalhada da curva de corrente elétrica para a condição 2 durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	51
Figura 38 - Visualização detalhada da curva de tensão para a condição 2 durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	51
Figura 39 - Evolução da variação de corrente e tensão no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 3 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	52
Figura 40 - Evolução da variação da velocidade de alimentação de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 3 de soldagem tandem do aço	

estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	53
Figura 41 - Visualização detalhada das curvas de corrente e tensão para a condição 3 durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.	54
Figura 42 - Visualização detalhada da curva de tensão para a condição 3 evidenciando o pico de tensão no intervalo de 14,76 e 14,765s durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho..	55
Figura 43 - Histograma de valores de tensão para os arames master e slave na condição 1 de soldagem.....	56
Figura 44 - Histograma de valores de tensão para os arames master e slave na condição 2 de soldagem.....	57
Figura 45 - Histograma de valores de tensão para os arames master e slave na condição 3 de soldagem.....	58
Figura 46 - Quantificação de ocorrências de tensões anormais e interrupções de arco para os arames master e slave nas três condições estudadas durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.....	59
Figura 47 - Trechos para medições de microdureza das juntas soldadas nas condições 1, 2 e 3.	60
Figura 48 – Evolução da microdureza Vickers associada com os trechos monitorados 1, 2 e 3 para as três condições de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.	61
Figura 49 - Evolução da microdureza Vickers associada com o trechos monitorado 4 para as três condições de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.	62
Figura 50 - Micrografia óptica do aço estrutural ASTM A572 G50.	62
Figura 51 - Imagens de microscopia ótica com aumentos de 500x e 1000x do metal de solda (MS) para as 3 condições de soldagem de aço ASTM A572 G50 com metal de adição ER70S-6.....	63

Figura 52 - Microscopia ótica das regiões de grãos grosseiros (GG), grãos finos (GF), intercrítica (IC) e subcrítica (SC) da zona afetada pelo calor (ZAC) com aumento de 500x para as 3 condições de soldagem de aço ASTM A572 G50 com metal de adição ER70S-6.....	65
Figura 53 - Microscopia ótica das regiões de grãos grosseiros (GG), grãos finos (GF), intercrítica (IC) e subcrítica (SC) da zona afetada pelo calor (ZAC) com aumento de 1000x para as 3 condições de soldagem de aço ASTM A572 G50 com metal de adição ER70S-6.....	66

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ARBL	Alta resistência baixa liga
ASM E	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Standard for Testing of Materials
AWS	American Welding Society
CCT	Continuous cooling transformation
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
ZAC	Zona afetada pelo calor

1 INTRODUÇÃO

O tradicional processo de soldagem por arco elétrico com gás de proteção (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*) é extremamente difundido, estudado e utilizado em diversas aplicações, pois além de apresentar uma boa relação custo-benefício, é possível ser realizado com alto grau de automação. A necessidade do aumento de produtividade na indústria impulsionou o desenvolvimento de diferentes processos, com o intuito de aumentar a taxa de deposição do material de adição. Dentre os novos processos, destaca-se a variação com dupla alimentação de arame na posição longitudinal, conhecida como tandem (T-GMAW), sendo possível obter taxas de deposição até duas vezes maiores quando comparadas ao processo tradicional com alimentação simples.

Neste processo, representado esquematicamente pela figura 1, dois arames alimentam uma única tocha de soldagem, sendo os parâmetros de operação de cada arame controlados por uma única ou duas máquinas de solda, dependendo do modo de operação selecionado. O entendimento da interação entre os dois arcos de soldagem possibilita melhor estabilidade do processo e aumento das taxas de deposição e velocidade de deslocamento visto que ambos os arcos operam em uma mesma poça de fusão [1].

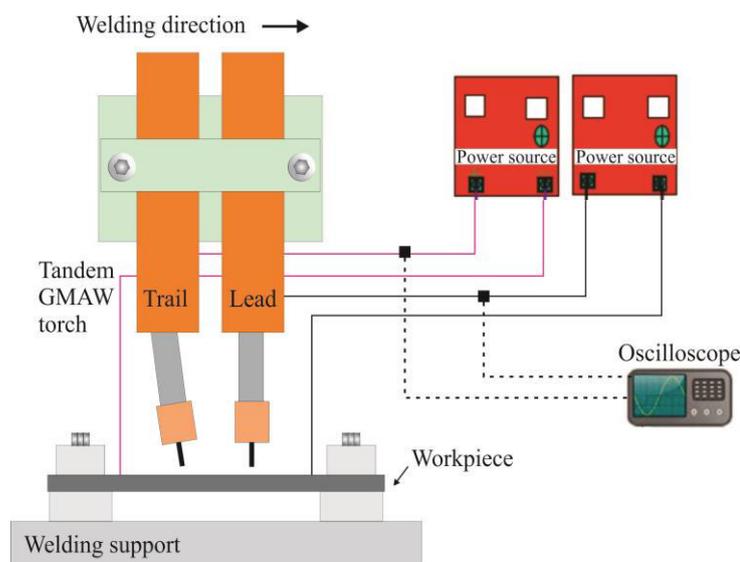


Figura 1 - Representação esquemática da configuração experimental para o processo de soldagem tandem GMAW.

Conhecer os efeitos dos parâmetros de processo, como por exemplo, corrente, tensão e velocidade de deslocamento na geometria da poça de fusão e do cordão de solda é de extrema importância em aplicações automáticas e semiautomáticas, onde a escolha correta dos parâmetros é necessária para se obter elevada produtividade, repetibilidade e otimização dos custos de processo [2]. Kiran et al. [3] reforçam que a interação entre os arcos de solda influencia suas estabilidades, podendo inclusive afetar a distribuição de energia na poça de fusão e conseqüentemente a qualidade final da solda. Sholokhov et al. [4] complementam que os parâmetros de processo influenciam no desempenho das propriedades mecânicas, características físico-químicas, além de determinarem a microestrutura na zona afetada pelo calor (ZAC) e do metal de adição.

O entendimento mais aprofundado do processo e a otimização dos tempos de ciclo são as motivações deste trabalho, tendo como proposta analisar as alterações geradas na microestrutura e nas propriedades mecânicas ao variar-se a combinação de parâmetros como, tensão, valor de corrente, velocidade de deslocamento e angulação da tocha.

Foram fabricados corpos de prova de aço estrutural ASTM A572 G50 soldados com metal de adição ER70S-6, utilizando a estação de soldagem tandem robotizada de uma empresa multinacional. As análises de microestrutura do metal de adição e das zonas fundida e afetada pelo calor, bem como o perfil de penetração foram realizadas através de técnicas de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, enquanto que para a determinação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de perfil de micro dureza Vickers utilizando equipamentos dos laboratórios do DEMa-UFSCar.

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo otimizar os tempos de ciclo do processo de soldagem robotizada TANDEM GMAW do aço ASTM A572 G50 através da correta seleção de parâmetros e do aumento da taxa de deposição. Isso sem comprometer a qualidade final do produto em termos de defeitos superficiais, microestrutura e propriedades mecânicas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura será dividida em dois tópicos principais: processo de soldagem por arco elétrico sob proteção gasosa e características de aços alta resistência baixa liga (ARBL).

3.1 Processo de soldagem GMAW

O processo de soldagem por arco elétrico sob proteção gasosa, em inglês, Gas Metal Arc Welding (GMAW) também é conhecido como processo MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas / MAG – Metal Active Gas) uma vez que este processo inicialmente foi desenvolvido com a utilização de gás de proteção inerte para soldagem de ligas de alumínio. O termo GMAW passou a ser utilizado após desenvolvimentos de processos com ampla gama de corrente elétrica, diferentes materiais e uso de gases de proteções reativos [5].

Neste processo de soldagem, representado pela figura 2, um arco elétrico, em um gás de proteção ionizado, é estabelecido entre a peça e um eletrodo consumível (metal de adição), fundindo o eletrodo consumível continuamente à medida que este é alimentado à poça de fusão [5], [6].

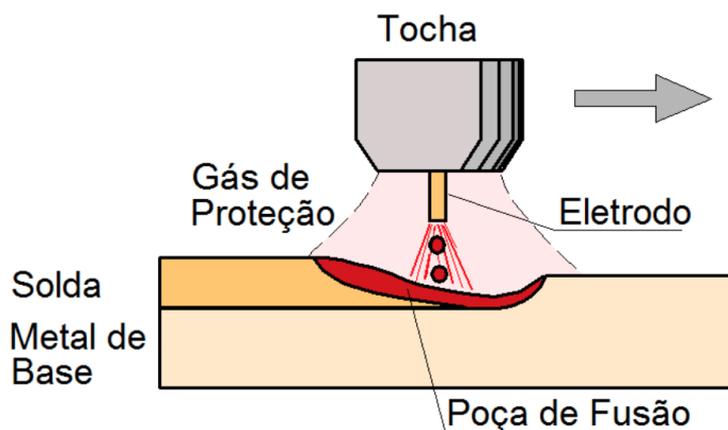


Figura 2 - Representação esquemática do processo de soldagem GMAW [7].

Os gases de proteção atuam para expulsar o ar atmosférico da região de soldagem com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapores d'água (H_2O), reduzindo-se a probabilidade de variações nas propriedades mecânicas, porosidades e possíveis fissurações. Para evitar esta contaminação, os principais gases utilizados são argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO_2), podendo ser empregados puros ou em combinações com outros gases [7].

A escolha do tipo de gás influencia as características e estabilidade do arco, o modo de transferência do metal, perfil de penetração, largura e formato do cordão de solda, velocidade máxima do processo, além dos custos da operação. Os gases inertes são utilizados principalmente para soldagem de metais não ferrosos, enquanto que a adição de pequenas quantidades de gases ativos melhora sensivelmente a estabilidade do arco e a transferência de metal, uma vez que a presença de óxidos facilita a emissão de elétrons [7].

Na soldagem com eletrodo consumível, como é o caso da GMAW, o metal fundido na ponta do eletrodo tem que se transferir para a poça de fusão. Esta transferência metálica pode ser descrita como o transporte de gotas fundidas da ponta de um eletrodo consumível para a poça de fusão. O tamanho da gota e o modo de transferência podem variar de acordo com o ajuste das variáveis operacionais, como corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do metal de adição, gás de proteção, entre outros [8],[9].

O modo de ocorrência da transferência é de extrema importância, pois afeta muitas características do processo, como estabilidade do arco, quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, aplicabilidade do processo em determinadas posições e nível de respingos gerado. De forma simplificada, considera-se quatro principais modos de transferência: curto-circuito, globular, spray ou aerosol e controlada [7].

O modo de transferência por curto-circuito ocorre quando baixos valores de corrente e tensão são utilizados e é normalmente aplicado para soldagem fora de posição ou na união de peças de pequena espessura. Uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e aumenta de diâmetro até que toque a poça de fusão, sendo atraída como consequência da tensão superficial. Caracterizam este modo de transferência uma grande instabilidade do arco e elevada formação de respingos, fatores estes, que podem ser otimizados pelo ajuste da indutância da fonte de energia e pela adequada seleção de parâmetros [7].

A transferência globular ocorre com valores intermediários de corrente e tensão, resultando em um arco mais estável quando comparado ao curto-circuito, porém, a transferência é mais caótica e imprevisível. Geralmente, o diâmetro da gota é maior que o diâmetro do eletrodo, tendendo a diminuir com o aumento da corrente e a transferência ocorre principalmente por ação da gravidade. Este modo de transferência deve ser evitado pois, além de ser limitado à posição plana, gera elevado nível de respingos e possui um caráter casuístico [7].

Observa-se que quando a mistura de proteção é rica em argônio e o eletrodo está ligado ao polo positivo, o diâmetro das gotas transferidas reduz-se com o aumento da corrente. Ao ultrapassar o nível de corrente conhecido como corrente de transição, o diâmetro das gotas rapidamente diminui ao mesmo tempo em que o arco que anteriormente cobria apenas a parte inferior da gota na ponta do eletrodo, passa a envolvê-la completamente. Nesta situação, conhecida como transferência por spray ou aerossol, as forças de origem eletromagnética se sobrepõem à ação da força gravitacional, garantindo com que as gotas sejam lançadas para a poça de fusão independente da posição de soldagem. A transferência é caracterizada por elevada estabilidade, mínimas perturbações no arco e baixo nível de respingos. Devido a necessidade de correntes mais altas, a soldagem de chapas finas ou fora de posição limita a aplicabilidade deste modo de transferência [7].

Com o desenvolvimento de fontes de soldagem eletrônicas, outros modos de transferência tornaram-se possíveis através da introdução de perturbações controladas na corrente de soldagem e/ou na alimentação de arame. O objetivo destas perturbações é obter uma transferência controlada do metal de adição com as características desejáveis, como por exemplo, a transferência por spray com níveis mais baixos de corrente média. Dentre as transferências controladas, a pulsada é a que mais se destaca. A transferência pulsada é aproximadamente globular, porém mais estável e uniforme, sendo conseguida pela pulsação da corrente em dois patamares, um inferior à corrente de transição e outro superior a esta, de modo que durante o período de tempo em que a corrente é baixa, ocorre formação e crescimento da gota na ponta do arame e posterior transferência ao elevar-se a corrente. A figura 3 ilustra a corrente pulsada e os parâmetros que a definem [7], [8].

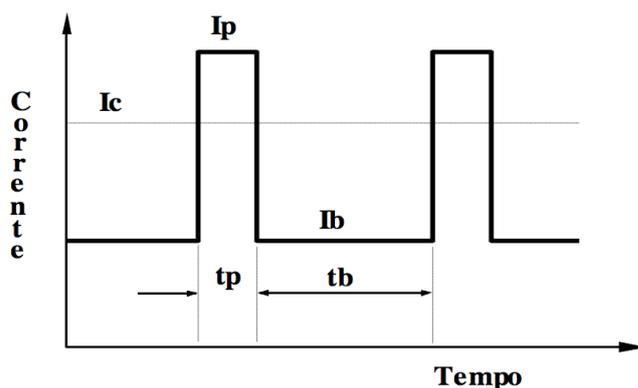


Figura 3 - Representação esquemática da pulsação de corrente: I_p – corrente de pico; I_b – corrente de base; t_p – tempo de pico; t_b – tempo de base [8].

Os fatores mais importantes para garantir a qualidade da transferência pulsada são amplitude e tempo de duração da corrente de pulso, sendo que condições que resultem na transferência de uma gota em cada pulso são as mais indicadas para garantir estabilidade ao processo. A figura 4 mostra um exemplo da gama de seleção dos parâmetros para garantir destacamento de uma gota por pulso [7], [10], [11].

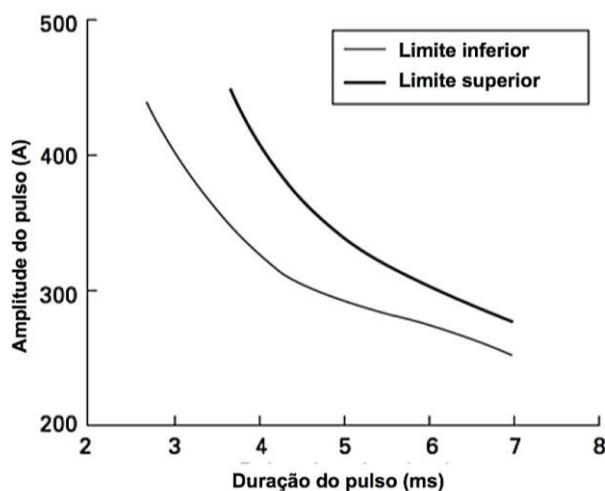


Figura 4 - Relação entre amplitude e duração de pulso para garantir a transferência de uma gota por pulso (arame de aço carbono 1,2mm em mistura de gases 95% argônio e 5% CO₂) [6].

Outro fator de grande importância metalúrgica é a energia de soldagem ou aporte de calor, uma vez que é determinante para os ciclos térmicos impostos ao material, influenciando nas transformações microestruturais e no comportamento da junta soldada. A energia de soldagem pode ser definida como a quantidade de calor adicionada a um material por unidade de comprimento e é influenciada pelos parâmetros de tensão, corrente, velocidade de deslocamento linear e eficiência de transferência do processo [12]. A correlação destes fatores é mostrada na equação 1.

$$E = \eta \cdot \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

Onde: E = energia de soldagem; η – eficiência de transferência; V – tensão (V); I – corrente (A); v = velocidade linear de soldagem (mm/s) [12].

A energia de soldagem não depende apenas dos parâmetros elétricos, mas também do processo e técnica operatória utilizada. Os gases de proteção e o modo de transferência selecionado podem causar efeitos similares ao aumento da energia de soldagem, resultando em variações nos ciclos térmicos impostos à junta de soldagem [12].

3.2 Processo de soldagem tandem GMAW

A soldagem tandem GMAW é uma variação do processo convencional, caracterizando-se pela dupla alimentação de eletrodos consumíveis e abertura de um par de arcos elétricos entre uma única poça de fusão. Os arcos e a poça de fusão são protegidos por um gás que, em conjunto com os eletrodos, é definido pelo tipo de metal base. Tentativas de utilização deste processo iniciaram-se na década de 50, porém, somente nas últimas décadas do século XX, após o desenvolvimento de fontes de soldagem controladas eletronicamente, este processo ganhou atenção, passando a ser melhor estudado e utilizado [13].

Comparado ao processo GMAW convencional, o processo com duplo arame proporciona maior produtividade, aumento na taxa de deposição e velocidade de soldagem e baixo aporte térmico, uma vez que a velocidade de deslocamento é mais alta [13].

Norrish [14], ressalta que a utilização de corrente pulsada é geralmente utilizada e para evitar interferência magnética. As fontes de soldagem e os formatos de onda devem ser sincronizados para produzir pulso em um dos arames enquanto o outro se encontra na etapa de corrente de base.

Classificações do processo tandem GMAW quanto a conexão dos eletrodos com a fonte de soldagem e posicionamento do arame em relação ao sentido de deslocamento da tocha, assim como as características dinâmicas e seus efeitos no processo de soldagem serão descritas nas seções subsequentes.

3.2.1 Configurações de conexão dos eletrodos

Esta classificação permite separar o processo de acordo com a configuração de conexão dos eletrodos à fonte de soldagem, podendo ser de potencial único ou potencial isolado.

Em geral, no sistema de potencial único, os eletrodos são fornecidos por alimentadores de arame independentes e estão em contato elétrico no bico da tocha, ou seja, estão submetidos ao mesmo potencial elétrico. Na outra extremidade, podem estar conectados à uma ou duas fontes de soldagem. Inicialmente, os sistemas desenvolvidos empregavam apenas uma fonte de soldagem, reduzindo o custo operacional e quantidade de equipamentos. No entanto, além de ter que fornecer corrente de soldagem com intensidade suficiente para fundir ambos os eletrodos, o processo apresentava instabilidades em soldagem com transferência por curto-circuito, pois quando um dos arames tocava a poça de fusão, toda a corrente passava por este, causando rompimento de forma abrupta. A transferência por spray também apresentava problemas devido ao maior comprimento e interação entre os arcos, causando sopro magnético e reduzindo a eficiência do processo. A figura 5 ilustra a montagem deste sistema [13], [15].

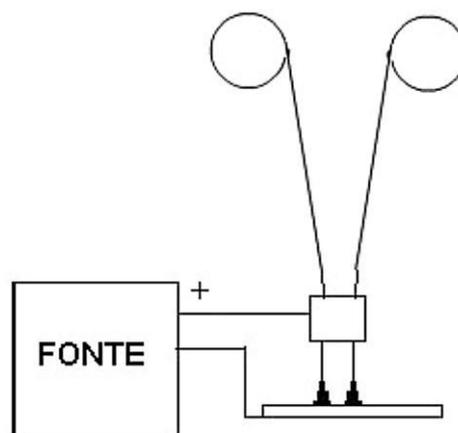


Figura 5 - Representação esquemática de um sistema com potencial único conectado à uma fonte de soldagem [13].

As ineficiências do processo com potencial único conectado à uma única fonte de soldagem levaram ao desenvolvimento do processo com corrente pulsada e utilização de duas fontes de soldagem. Nesta condição, mostrada na figura 6, as fontes devem estar sincronizadas de tal forma que os pulsos de ambas ocorram simultaneamente, possibilitando maior controle da transferência de ambos os eletrodos e maior produtividade [13].

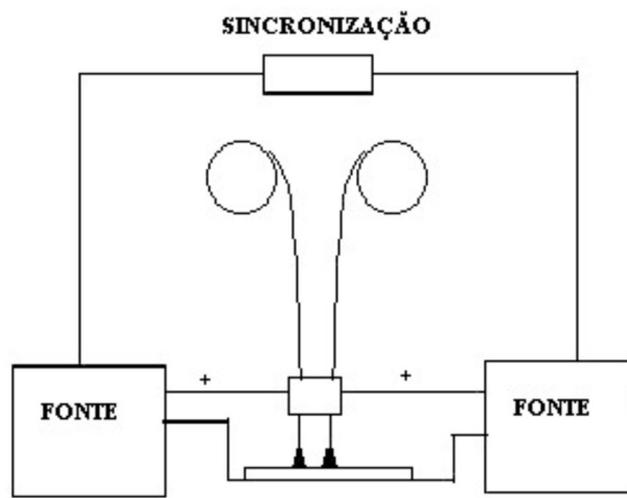


Figura 6 - Representação de um sistema com potencial único conectado à duas fontes de soldagem [13].

Entretanto, os sistemas com potencial único, continuavam suscetíveis às interferências eletromagnéticas entre os arcos, requisitando o desenvolvimento de sistemas com potenciais isolados. Semelhante ao sistema de potencial único, os arames são alimentados separadamente, porém ocorre o isolamento elétrico entre os eletrodos e os arcos são mantidos por fontes de soldagem separadas. Nesta configuração, é possível selecionar parâmetros diferentes para cada arco, bem como defasar os pulsos de corrente, minimizando os problemas de sopro magnético [13]. A configuração com potencial elétrico isolado é mostrada na figura 7.

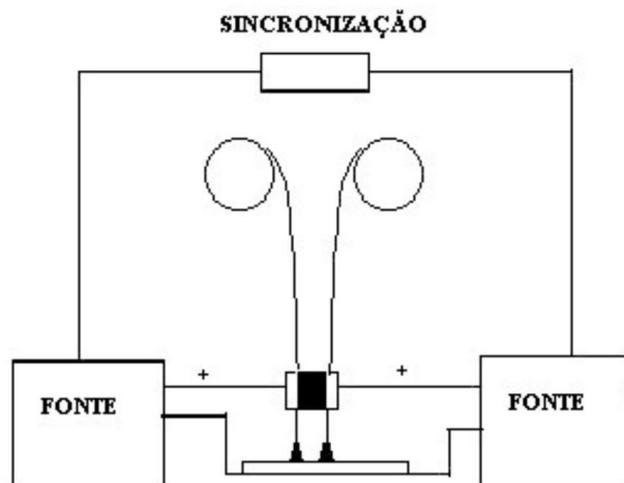


Figura 7 - Representação de um sistema com potencial isolado [13].

3.2.2 Configurações de posicionamento dos arames

Os sistemas disponíveis e a aplicação requerida pelo processo permitem que o posicionamento do eletrodo em relação à direção de deslocamento da tocha varie entre longitudinal ou transversal. No sistema longitudinal, conhecido como tandem, os arames são dispostos um em frente ao outro, enquanto que no sistema transversal os arames estão dispostos lado a lado [13]. Ambos os sistemas estão representados na figura 8.

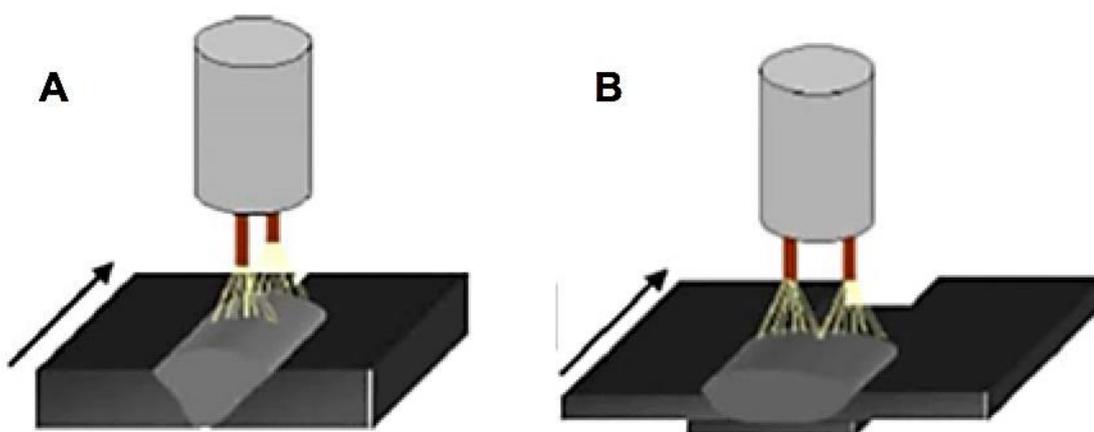


Figura 8 - Representação das configurações em relação ao posicionamento dos arames. a) Longitudinal ou “tandem”; b) Transversal ou “lado a lado”.

Na configuração tandem geralmente ajusta-se maior potência no arco da frente com o objetivo de formar a cratera no metal de base e de elevar a penetração e uma menor potência no segundo arco, garantindo o preenchimento da cratera, melhor geometria do cordão e redução da incidência de defeitos [13], [16].

Já a configuração transversal geralmente possui o mesmo parâmetro em ambos os arcos, uma vez que é mais utilizada para preenchimento de juntas de topo com grandes aberturas ou grandes chanfros. O direcionamento de cada eletrodo para uma das faces da junta permite maior fusão entre elas, reduzindo a possibilidade de falta de fusão, porém reduz a penetração central [11], [16].

3.2.3 Comportamento dinâmico e interferência entre arcos

A alimentação de dois eletrodos consumíveis na mesma poça de fusão otimiza a transferência de calor e altera sua distribuição. Desta forma, geralmente se obtém cordões mais uniformes e sem a presença de mordeduras, resultando em elevada qualidade. Entretanto, como os dois arcos elétricos são consumidos na mesma poça de fusão e com correntes transmitidas na mesma direção, ocorre atração eletromagnética entre os arcos. Este fenômeno pode ocasionar redirecionamento dos eixos dos arcos elétricos, deflexão de um arco sobre o outro e como consequência, têm-se interferência entre os arcos e na transferência metálica, interrupções de arco, instabilidades no processo e redução da qualidade [24], [25].

A deflexão e interferência entre os arcos é uma das desvantagens do processo tandem GMAW. O campo magnético de arcos adjacentes produz forças de Lorentz que levam à formação de sopros magnéticos, demonstrados na figura 9 [24].

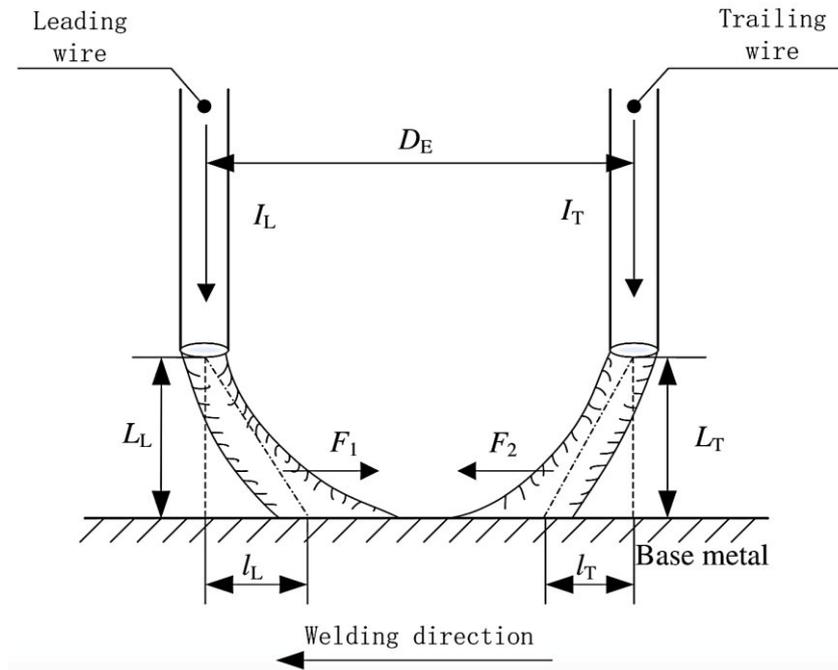


Figura 9 - Representação do fenômeno de deflexão de arcos no processo de soldagem tandem GMAW [24].

É possível calcular a dimensão da deflexão entre os arcos. Ueyama et al [26] apresentam as seguintes equações para realização deste cálculo.

$$l_L = \frac{I_T * L_L^2}{2I_L * D_E} \quad (2)$$

$$l_T = \frac{I_L * L_T^2}{2I_T * D_E} \quad (3)$$

Onde D_E é a distância entre os arcos, I_L e L_L são respectivamente a corrente e comprimento de arco do arame da frente (*leading* ou *master*), I_T e L_T são respectivamente a corrente e comprimento de arco do arame traseiro (*trailing* ou *slave*) e l_L e l_T representam os deslocamentos horizontais dos arcos frontal e traseiro [26].

É difícil atribuir a interação entre arcos no processo tandem GMAW a uma única causa, uma vez que diferentes variáveis e possíveis causas ocorrem simultaneamente e são relacionadas. Quando o modo pulsado é utilizado, os campos magnéticos gerados pelos arcos 'master' e 'slave' periodicamente se alternam e conseqüentemente seus respectivos comprimentos e rigidez. Neste

caso, cada arco é influenciado pela magnitude de sua corrente e pelo campo magnético do arco vizinho [28].

Com o objetivo de analisar somente o efeito do campo magnético de um arco sobre a interrupção do arco vizinho, Reis et al [29] propuseram um estudo utilizando um arco simples GTAW operado em corrente constante e sujeito à campos magnéticos externos repentinos. Além de simular os efeitos do campo magnético de um arco sobre outro, este procedimento eliminou variáveis como magnitude de corrente, direção de deflexão, comprimento do arco e ângulo do eletrodo. Os autores concluíram que os arcos elétricos em soldagem tandem GMAW podem ser interrompidos repentinamente quando a densidade do fluxo magnético aumenta. Entretanto, também foi observado que o aumento da corrente de soldagem aumenta a resistência à interrupção dos arcos e que esta técnica deve ser utilizada principalmente para evitar a interrupção do arco 'slave' devido ao aumento do campo magnético gerado pelo arame 'master', resultando em arcos quase sincronizados durante os ciclos de pulso de corrente. Além disso, foi observado que os valores de tensão no momento da interrupção do arco não eram dependentes da força do campo magnético externo aplicado e nem do nível de corrente utilizado, porém as interrupções tendiam a ocorrer sempre em uma determinada faixa de tensões, sendo fortemente influenciado pelas características dinâmicas da fonte de soldagem.

3.2.4 Efeitos da diferença de fases nos arcos elétricos

A interferência elétrica entre os arcos próximos resulta na oscilação da poça de fusão, deflexão dos arcos e instabilidade no processo de soldagem. Para minimizar e até eliminar este problema, uma das opções é a variação no sincronismo entre os modos de fase dos dois arcos. A seguir serão exemplificados os modos de fase sincronizado e alternado para soldagem tandem pulsada, além de resultados obtidos no estudo de diferentes autores.

A figura 10 mostra uma típica curva de corrente do modo de fase alternado, onde enquanto o arame master está na corrente de pico, o arame slave está na corrente de base, ou seja, as fases estão alternadas em 180° .

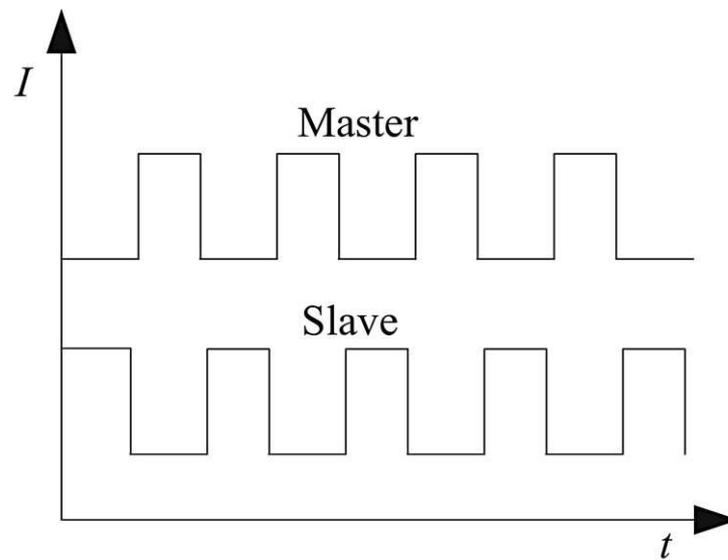


Figura 10 - Típica curva de corrente pulsada alternada em 180° [26].

Diferentemente do modo de fase alternado, no modo de fase sincronizado, ambos os arames entram simultaneamente na corrente de pico ou corrente de base, sendo exemplificado na figura 11.

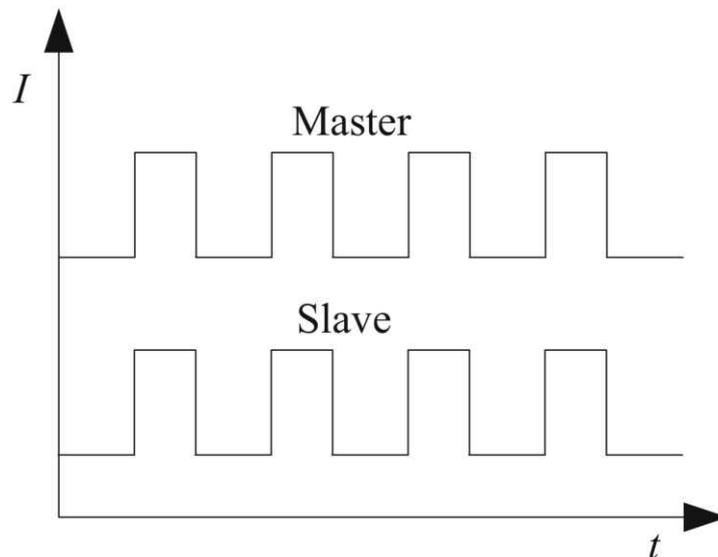


Figura 11 - Típica curva de corrente pulsada sincronizada [26].

O estudo de Wu et al. [27] comparou os modos de fase sincronizado e alternado em 180° utilizando um sistema onde os arames eram alimentados

por duas fontes distintas de soldagem com potenciais elétricos isolados e correntes de pico próximas à 750 A para ambos os arcos. Através das curvas gravadas com o auxílio do osciloscópio Tektronix DPO2024B e mostradas nas figuras 12 e 13, os autores concluíram que a interrupção de arco foi eliminada em ambas as condições.

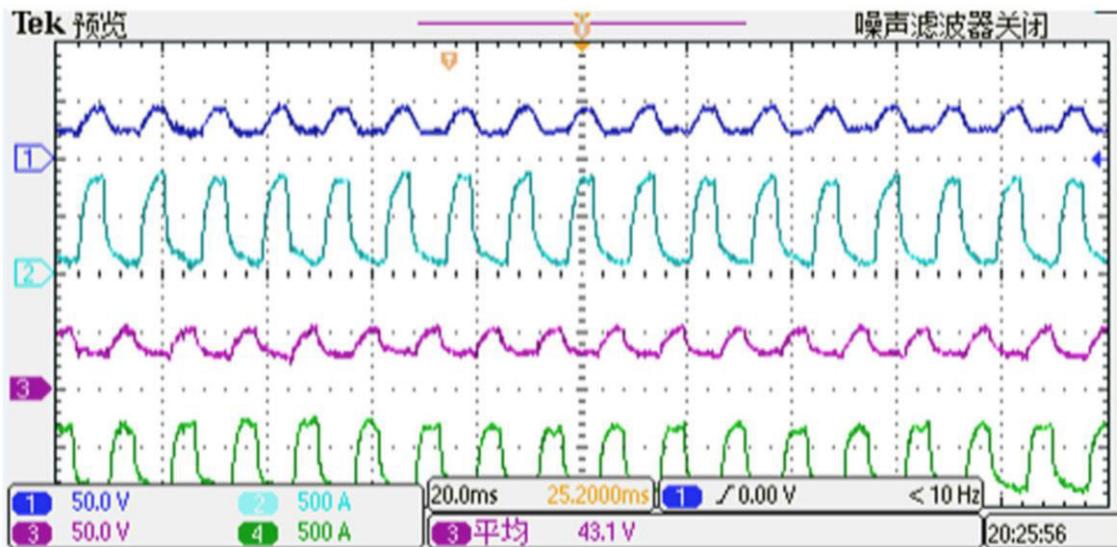


Figura 12 - Curvas de corrente e tensão para defasagem alternado 180° [27].

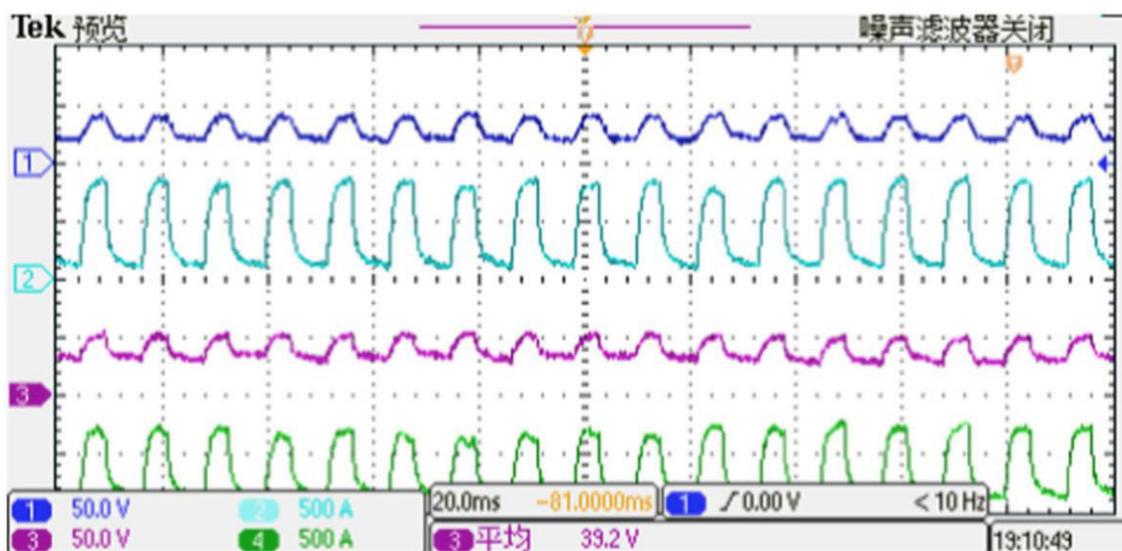


Figura 13 - Curvas de corrente e tensão para modo de fase sincronizado [27].

Wu et al. [27] enaltecem que a utilização do modo de fase alternado em 180° mantém a eficiência do processo e reduz a força eletromagnética entre os

arcos, uma vez que um dos arcos sempre terá menor energia quando estiver na corrente de base. Entretanto, os autores reforçam que a rigidez do arco, que é a habilidade em resistir às forças eletromagnéticas, também deve ser considerada. A rigidez do arco aumenta com o aumento de corrente e neste caso, ao utilizar o modo de fase sincronizado, garante-se que ambos os arcos sempre estarão com elevada rigidez e conseqüente elevada capacidade em resistir às forças eletromagnéticas e à deflexão.

Para concluir, Wu et al. [27] analisaram as curvas de tensão para ambos os modos e identificaram que o modo de fase alternado em 180° apresentou maiores valores de tensão e presença de instabilidades no arame 'slave', indicando a ocorrência do fenômeno de deflexão. Como estes fenômenos não ocorreram no modo de fase sincronizado, os autores concluíram que para soldagem em corrente elevadas, este é o modo capaz de propiciar maior estabilidade ao processo.

Ueyama et al. [28] avaliaram métodos que previnem a ocorrência de interrupções de arco e tensões anormais, destacando-se os efeitos da defasagem de pulso entre os arcos elétricos dos arames 'master' e 'slave'. O estudo, realizado utilizando chapas de aço e arame de solda sólido com diâmetro de 1,2mm e correntes de pico de 450 A, corrobora com os resultados encontrados por Wu et al. [27], onde o modo de fase alternado em 180° apresentou maior índice de instabilidades e interrupções de arco, porém também identificou anormalidades no modo de falha sincronizado, principalmente no arame 'slave'. Na tentativa de identificar situações com menor incidência de instabilidades, realizaram-se testes com diferentes defasagens de pulsos, exemplificados na figura 14.

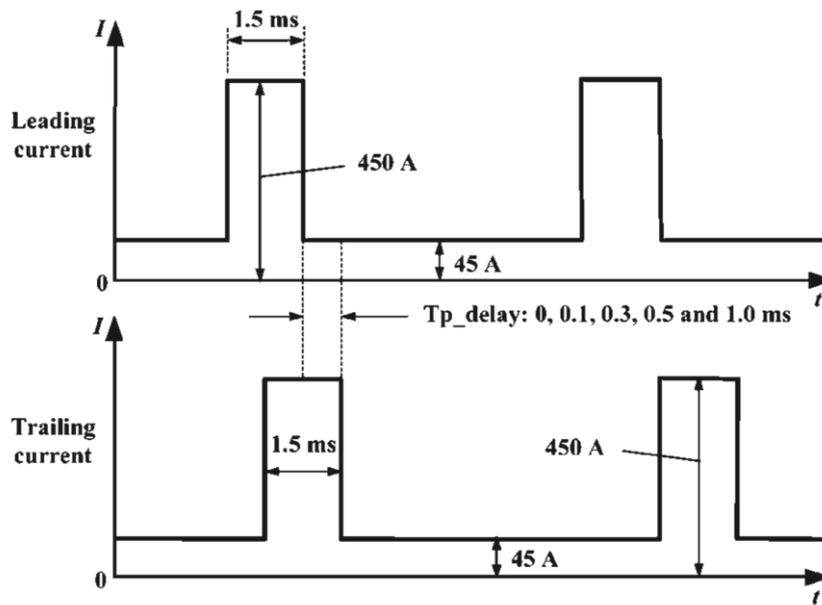


Figura 14 - Exemplo de defasagem de pulsos da corrente de pico entre os arames 'master' e 'slave' [28].

Ueyama et al [28] testaram defasagens de 0 ms; 0,1 ms; 0,3 ms; 0,5 ms e 1ms e avaliaram a presença de tensões anormais e interrupções de arco para ambos os arames. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 15 e 16.

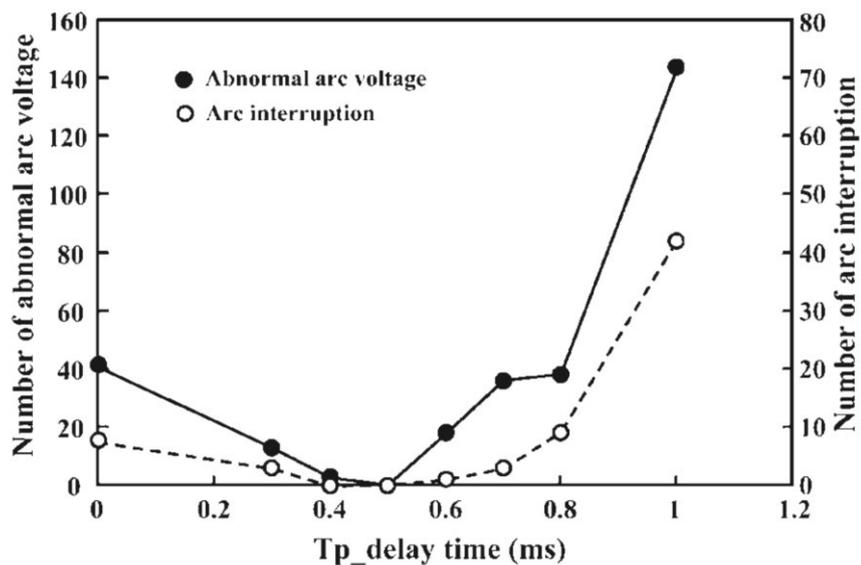


Figura 15 - Quantidade de ocorrências de tensões anormais e interrupções de arco no arame 'slave' pela variação da defasagem de pulso [28].

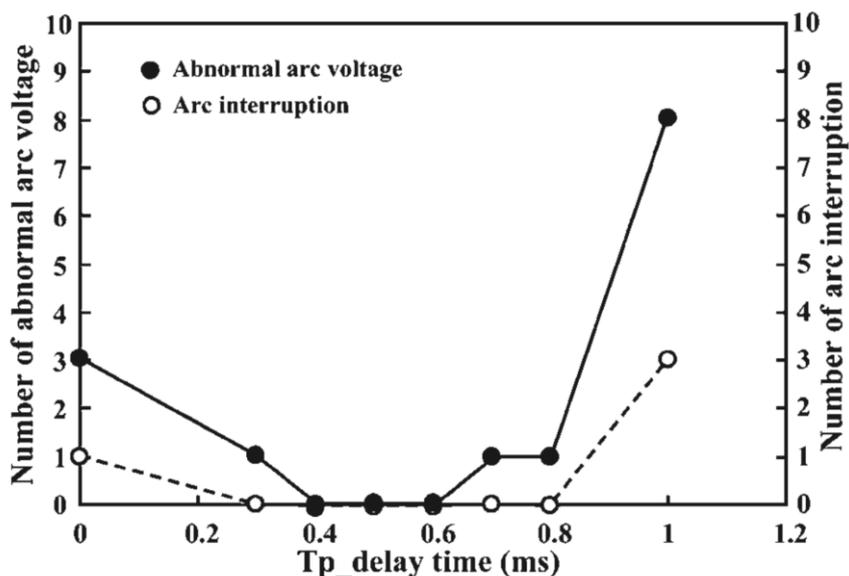


Figura 16 - Quantidade de ocorrências de tensões anormais e interrupções de arco no arame 'master' pela variação da defasagem de pulso [28].

Embora o arame 'slave' apresente maiores instabilidades, ambos os arames apresentam tendência no aumento da estabilidade para defasagens entre 0,4 ms a 0,5 ms. Na figura 17, observa-se o comportamento de ambos os arcos e justifica-se o aumento de estabilidade. Os quadros a) e b) da figura 16 mostram o pulso da corrente de pico no arame 'master' e uma leve deflexão do arame 'slave' por estar em corrente de base. Entretanto, devido à defasagem de 0,5 ms, observa-se no quadro c) que o arame 'slave' retorna ao seu eixo ao receber o pulso da corrente de pico. Mesmo quando o arame 'master' entra na corrente de base, não ocorre deflexão do arame 'slave' devido à sua própria rigidez, sendo este fenômeno mostrado nos quadros d) e e). Já os quadros f) e g) mostram ambos os arames em corrente de base, onde os arcos estão estabilizados acima da poça de fusão [28].

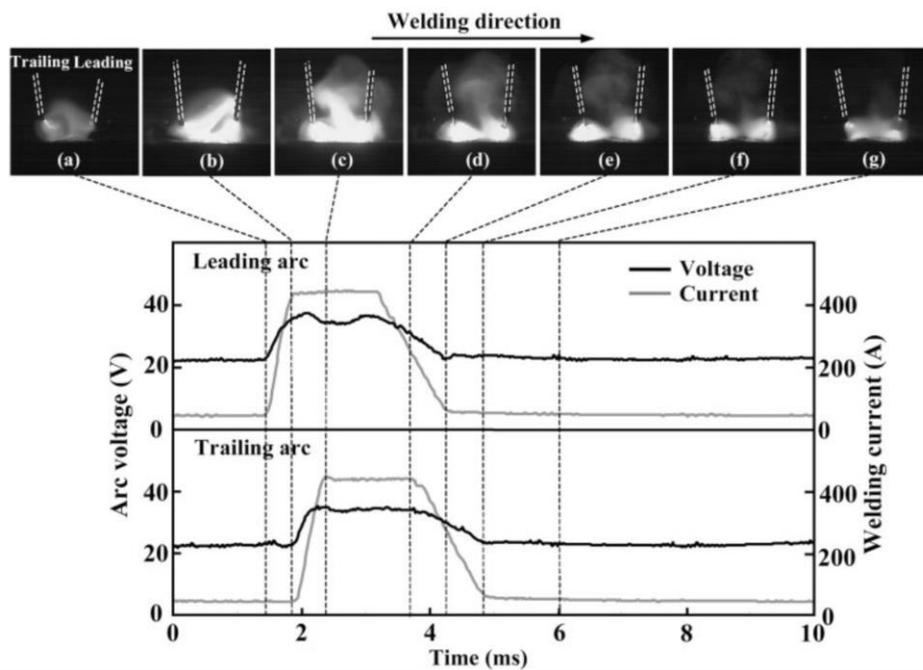


Figura 17 - Análise do comportamento dos arcos elétricos com a aplicação de um atraso de pulso de 0,5 ms no arame 'slave' [28].

3.2.5 Efeitos da configuração dos bicos nos arcos elétricos

A configuração dos dois arames na tocha de soldagem, bem como suas velocidades de alimentação impactam a qualidade do processo de soldagem e evitam a formação de mordeduras e descontinuidades. Ueyama et al. [30], estudaram estes efeitos através de experimentos utilizando soldagem robotizada tandem pulsada sem sincronização e uma tocha de soldagem que permitia ajustes como distância e ângulo entre bicos de contato, sendo o esquema de configuração da tocha mostrado na figura 18.

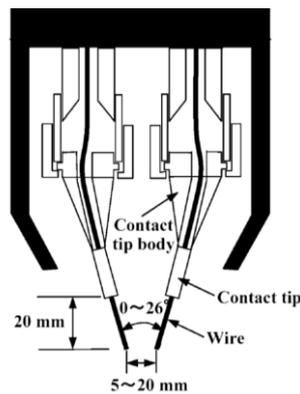
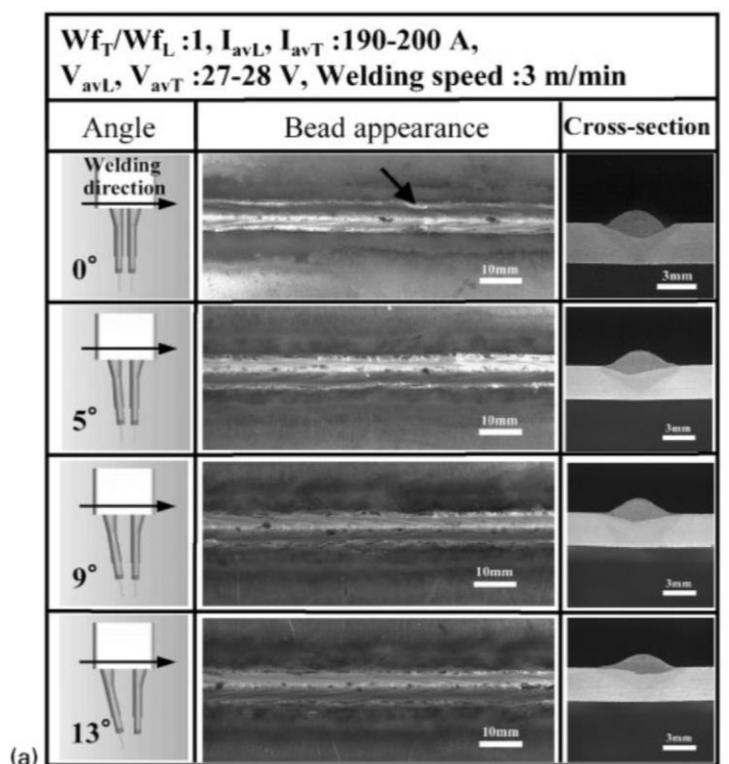


Figura 18 - Esquema de configuração de tocha experimental que permite variação de distância e ângulo entre arames utilizada por Ueyama et al [30].

Após analisada a velocidade ideal de deslocamento da tocha de soldagem, os autores avaliaram aparência do cordão, perfil de penetração e formação da poça de fusão. Neste experimento, a distância entre arames foi mantida em 12mm, velocidade de soldagem de 3m/min, alimentação de ambos os arames de 5,5m/min, ângulo do arame 'master' em 0° ou 9°, enquanto que o arame 'slave' variou entre 0° e 13°. A figura 19 mostra os resultados obtidos, sendo as condições onde o arame 'slave' estava inclinado, ou seja, posicionado para soldagem empurrada, as que apresentaram melhor aparência do cordão. Foi identificado que o aumento na inclinação do arame 'slave' reduzia a altura do cordão de solda e aumentava sua largura [30]



a Leading wire angle 0° ; b Leading wire angle 9°

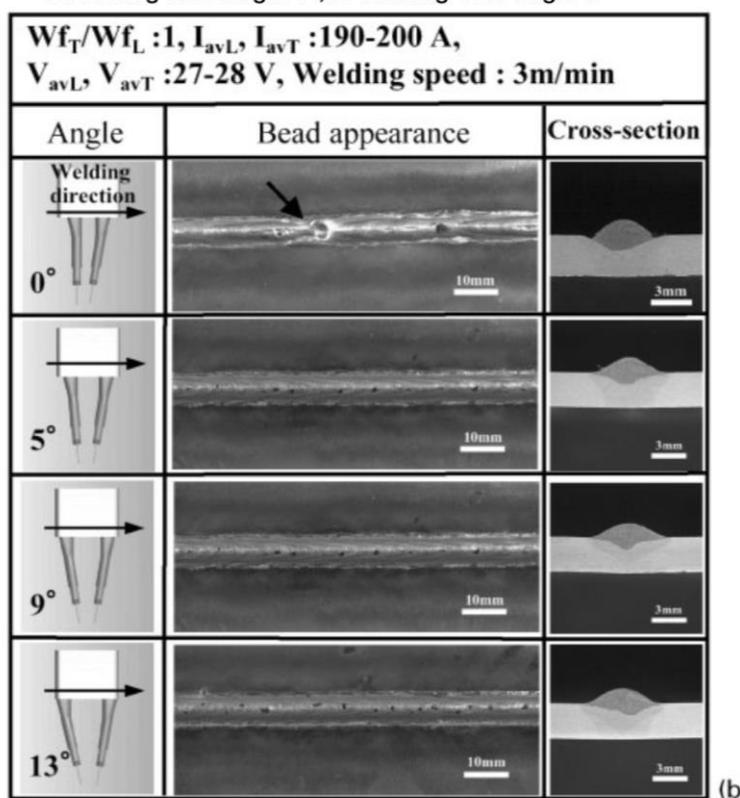


Figura 19 - Efeitos da inclinação dos arames na aparência do cordão e no perfil de penetração, sendo os melhores resultados obtidos com inclinação para posição empurrada do arame 'slave' [30].

A formação da poça de fusão foi analisada em duas condições mostradas na figura 20. Na primeira, ambos os arames estavam configurados para 0° , enquanto que na segunda condição o arame 'master' estava posicionado em 0° enquanto que o arame 'slave' apresentava inclinação de 9° para posição de soldagem empurrada. Nesta primeira condição, uma protuberância de metal fundido é produzida entre os dois arames, fazendo com que o arco do arame 'slave' encontre este material, ocorra curto circuito e formação de respingos. Em contraste, o ângulo de soldagem empurrada do arame 'slave' da segunda condição (linha de imagens inferior na figura 20) garante que o efeito de movimentação do material fundido irregularmente para trás não ocorra, obtendo-se cordões de solda com melhor qualidade [30].

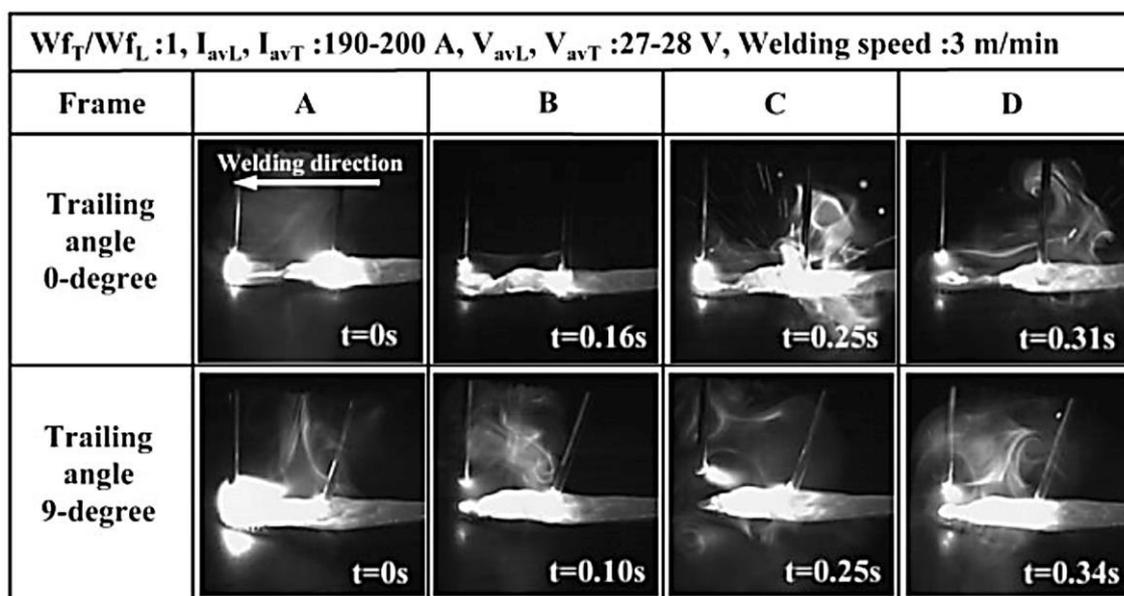


Figura 20 - Formação da Poça de fusão para a primeira condição, onde ambos os arames estão à 0° e para a segunda condição, onde o arame 'slave' está empurrando com angulação de 9° [30].

Fersini e Matera [31] avaliaram os efeitos de distância e angulação entre bicos de contato na soldagem tandem GMAW do aço estrutural alta resistência baixa liga S355 e eletrodo consumível ER70S-6 com o objetivo de expandir o uso desta tecnologia na soldagem de aços estruturais. O aço deste utilizado neste experimento é de alta resistência e baixa liga, apresentando propriedades físicas

e químicas similares ao ASTM A572. Neste estudo foram utilizadas duas tochas de soldagem, sendo a primeira fabricada pela Cloos e com distância e ângulo entre bicos de contato fixos, enquanto a segunda, fabricada pela Esab, permitia diferentes ajustes. As tochas e dimensões adotadas no ensaio são mostradas na figura 21.

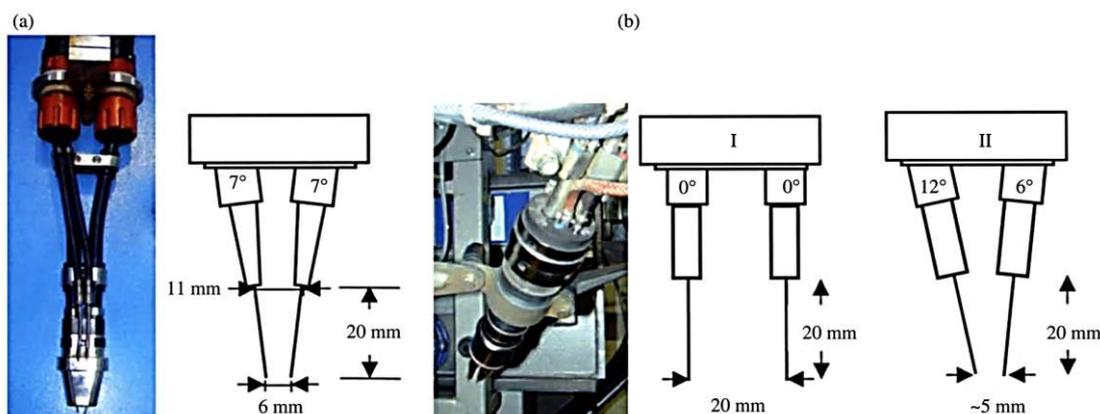


Figura 21 - a) Tocha Cloos configuração fixa; b) Tocha Esab com configuração variável e as respectivas dimensões utilizadas nos experimentos [31].

Em soldagem tandem GMAW, a combinação da distância entre bicos de contato e o modo de transferência adotado são importantes para garantir a estabilidade do arco e permitir a correta seleção de parâmetros. O estudo recomenda que para tochas de configuração fixa, com distância de ponto de contato entre 5 e 6mm, utilize-se arco pulsado em ambos os arames. Para tochas de configuração variável, onde o espaçamento do ponto de contato pode chegar a 20mm, a atração entre os arcos é pequena e vários modos de transferência podem ser utilizados, podendo até ser eliminada a necessidade de sincronização entre os arcos. A tabela 1 resume os parâmetros operacionais de acordo com a variação de distância do ponto de contato [31].

Tabela 1 - Parâmetros operacionais de acordo com a variação de distância do ponto de contato [31].

Parâmetros ou especificações	Distância do ponto de contato (δ)	
	$\delta > 15\text{mm}$	$\delta < 10\text{mm}$
Inclinação do bico de contato master	$\leq 35^\circ$	$\leq 25^\circ$
Modo de transferência	Todos	Pulsado/pulsado; spray/spray; spray/pulsado
Sincronização	Aplicável, mas não necessária	Necessária
Stick out	$\leq 30\text{mm}$	$\leq 20\text{mm}$
Corrente	$\leq 500\text{A}$	$\leq 400\text{A}$
Penetração	Alta penetração	Similar GMAW convencional

3.2.6 Efeitos da composição do gás de proteção nos arcos elétricos

Tradicionalmente, misturas binárias de argônio e gás carbônico são utilizadas como proteção gasosa no processo GMAW. Entretanto, a desvantagem em se utilizar argônio está no baixo fluxo de calor do arco de argônio até a peça, limitando a profundidade da poça de fusão. O hélio, que também é um gás inerte, necessita de maior tensão para ionização, porém produz elevada densidade de corrente no arco. Devido ao elevado custo do hélio, misturas ternárias entre argônio, gás carbônico e hélio têm sido estudadas para obter a vantagem de cada um desses gases, uma vez que o comportamento do arco elétrico é fortemente afetado por diferenças de composição química [35].

O aumento da porcentagem de gás carbônico na mistura resulta em redução do comprimento e alargamento do arco e altera o modo de transferência das gotas. Com 5% de gás carbônico a transferência ocorre por spray pulsado, com um teor entre 10 e 15% a transferência passa a ser de gotas multi pulsadas, ou seja, após o destacamento da primeira gotas, múltiplas pequenas gotas se destacam. Composições com mais de 15% de gás carbônico podem reduzir o arco a ponto de destacar a gota apenas quando esta toca a peça. A figura 22 exemplifica a variação nos modos de transferência. [35]

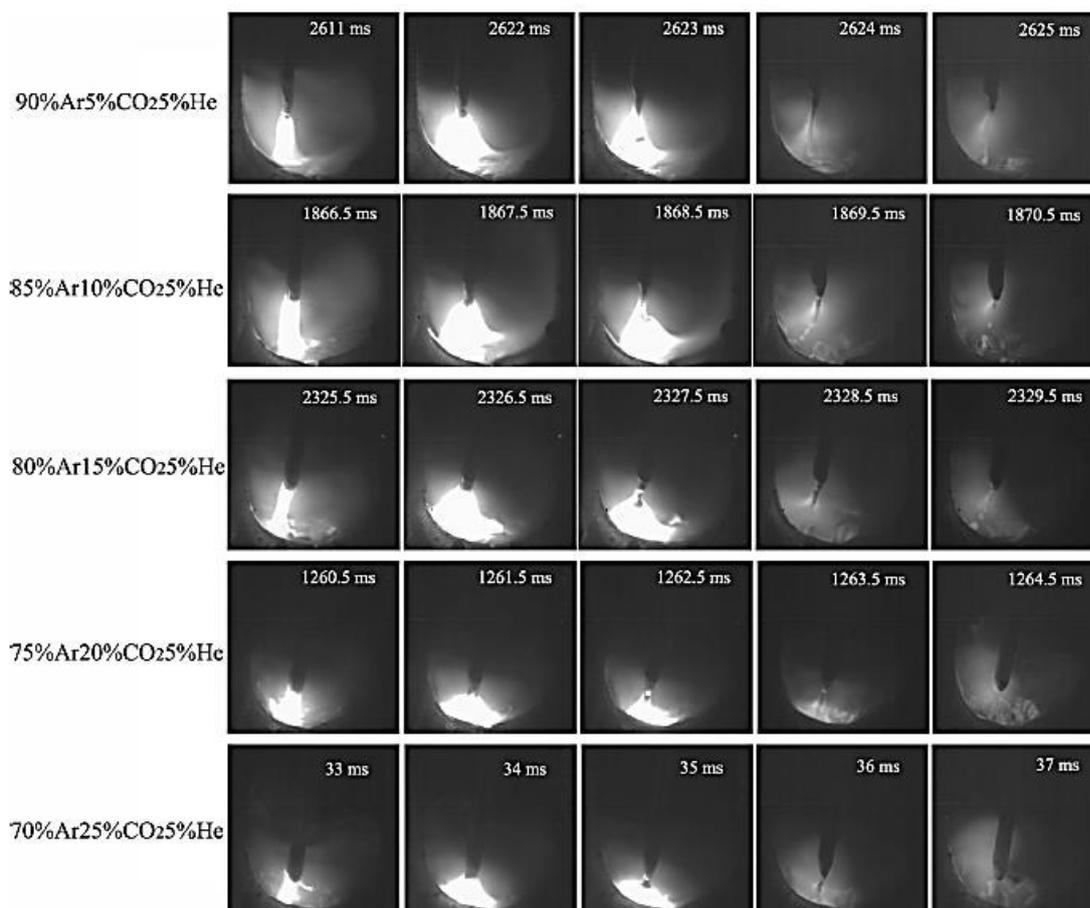


Figura 22 - Comportamento do arco elétrico com diferentes proporções de gás carbônico na mistura de proteção gasosa [35].

Cai et al [35] também estudaram os efeitos da variação da porcentagem de hélio na mistura gasosa, sendo o comportamento do arco elétrico mostrado na figura 23. Devido a sua maior condutividade térmica, ocorre uma expansão do arco elétrico, aumentando a penetração lateral. Diferentemente do gás carbônico, a variação de hélio na composição química da mistura não altera o modo de transferência, mantendo sempre o modo pulsado spray. Ao ultrapassar 15% de hélio na composição a transferência se torna mais profunda e ao atingir 25% o arco se torna instável devido ao elevado potencial de ionização.

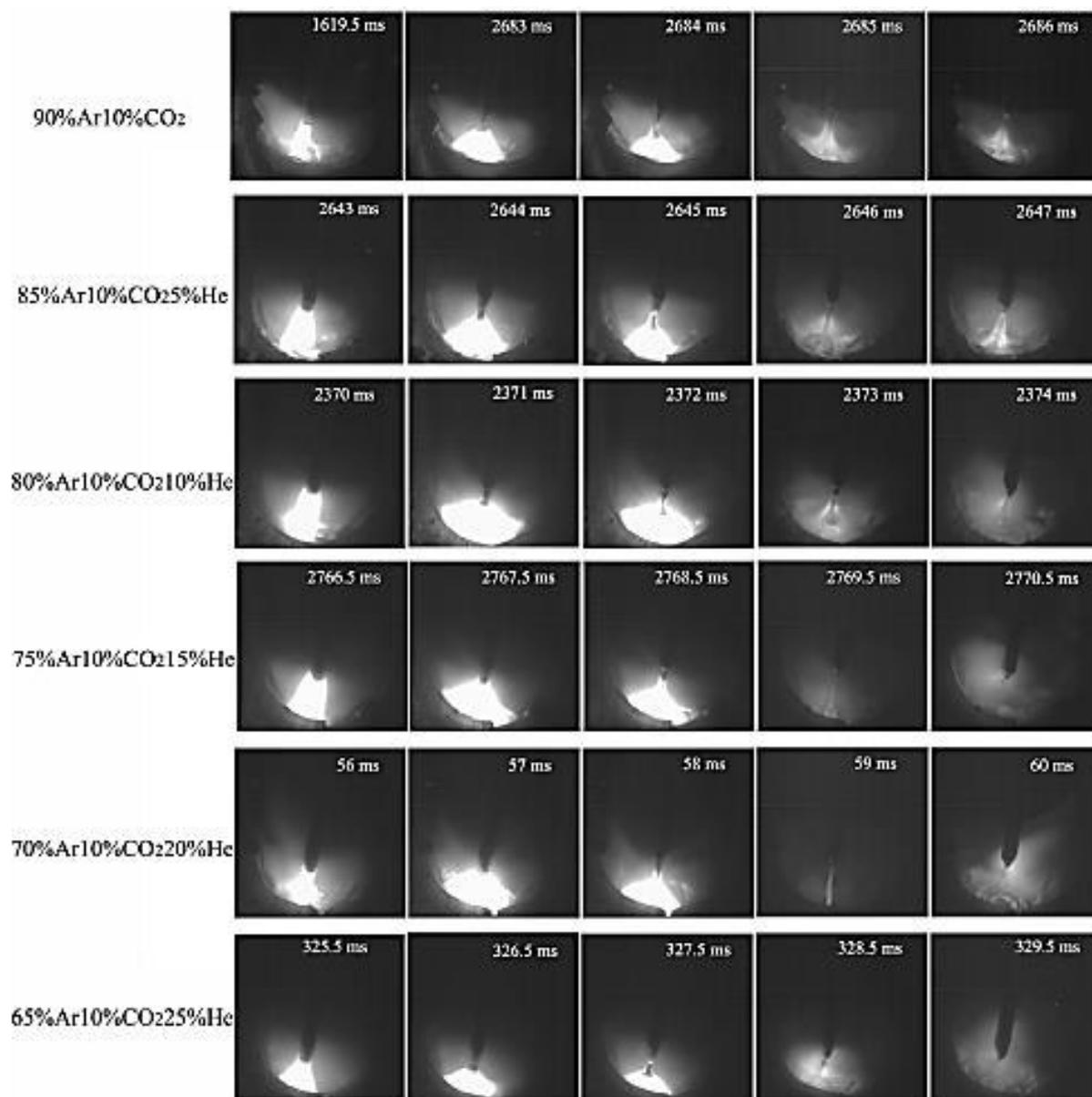


Figura 23 - Comportamento do arco elétrico com diferentes proporções de hélio na mistura de proteção gasosa [35].

Já o estudo de Ueyama et al [26], focou no comportamento anormal e na interrupção de arco de acordo com a porcentagem de gás carbônico na mistura utilizando uma tocha com espaçamento entre arames de 10mm. Foi observado que o maior teor de gás carbônico resulta em maiores ocorrências de tensões anormais e interrupções no arco elétrico. Para explicar o aumento das ocorrências, foram realizadas fotografias do arco elétrico para misturas com 2%

e 25% de gás carbônico. O arco de plasma gerado para o arame 'master' na condição com mistura com 2% de gás carbônico, se expandiu tanto que tocou o arame 'slave', garantindo a passagem de corrente para o segundo arco e evitando a ocorrência de tensões anormais. Já na mistura com 25% de gás carbônico, não ocorre a expansão acentuada do arco de plasma devido ao maior resfriamento causado pela dissociação do gás carbônico. Entretanto, o arco do arame 'slave' é atraído devido a maior corrente de pico do arame 'master'. Mesmo que não ocorra a interação entre os arcos nesta segunda condição, a tensão do arco 'slave' atinge valores anormais devido ao maior alongamento do comprimento do arco causado pela força de atração em conjunto com o maior gradiente potencial causado pela maior concentração de gás carbônico. As figuras 24 e 25 exemplificam estas ocorrências.

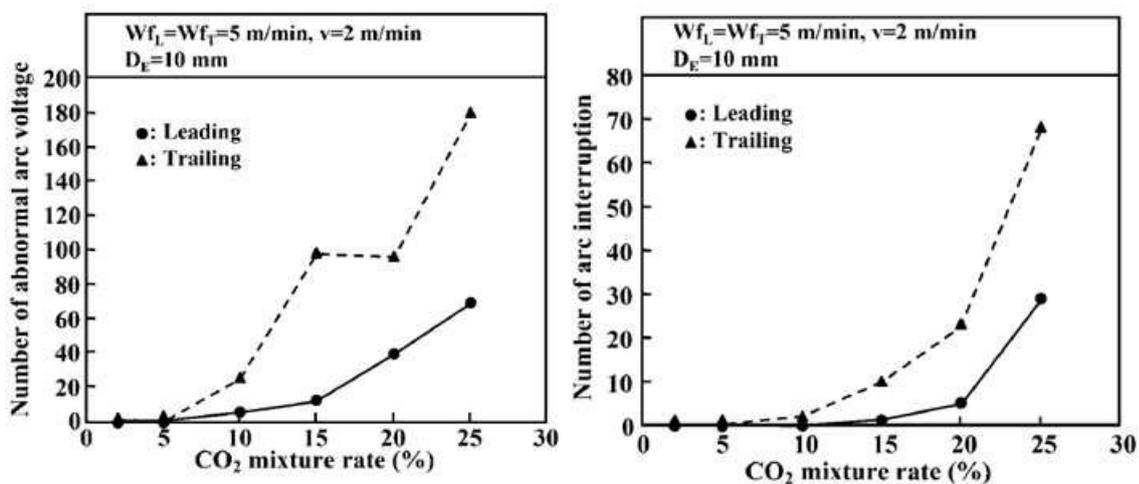


Figura 24 - Ocorrências de tensões anormais e interrupções do arco elétrico em função da variação da proporção de gás carbônico na mistura de proteção gasosa [26].

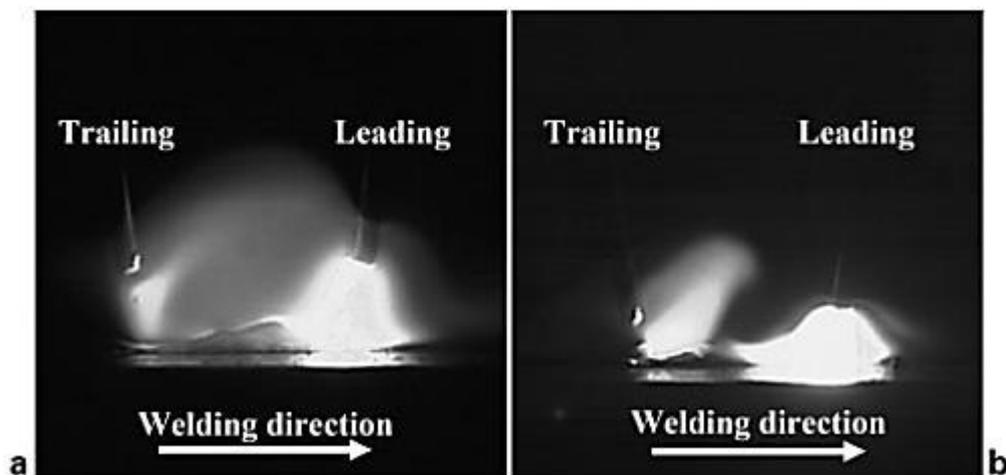


Figura 25 - Comparativo dos comportamentos dos arcos elétricos: a) mistura gasosa de 98% argônio e 2% gás carbônico; b) mistura gasosa de 75% argônio e 25% gás carbônico.

3.3 Aços ARBL eletricamente soldados

Atualmente, soldagem é o principal método utilizado para a união de metais, entretanto, sua importância foi reconhecida apenas após a segunda guerra mundial. Aços específicos para utilização em estruturas soldadas passaram a ser desenvolvidos para que o processo de soldagem fosse capaz de substituir métodos de união tradicionais como rebitemento e parafusamento. Como exemplo destes desenvolvimentos, pode-se citar a ampla gama de aços estruturais soldáveis disponível no mercado que combinam a desejável alta resistência com ductilidade, resistência à fadiga e melhor soldabilidade [17].

Aços de alta resistência modernos utilizam ligas selecionadas e processos de fabricação termo mecanicamente controlados. As propriedades mecânicas finais são controladas através do desenvolvimento de microestruturas caracterizadas por grãos refinados de ferrita e uma dispersão de elementos de liga precipitados para otimizar resistência mecânica, ductilidade e dureza. O processo de soldagem inerentemente expõe o aço a elevadas temperaturas, modificando estas microestruturas e conseqüentemente as propriedades mecânicas. A região imediatamente adjacente à solda, onde temperaturas se

aproximam do ponto de fusão, podem ser significativamente degradada pelo aumento do tamanho de grão que ocorre na região de fase austenita. Embora vários parâmetros controlem a microestrutura e as propriedades mecânicas da zona afetada pelo calor, o controle do tamanho de grão da austenita é crítico para o desempenho destes aços [18].

Nas últimas décadas, os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) passaram por grandes desenvolvimentos tecnológicos baseados principalmente na compreensão da correlação entre propriedades e microestrutura. De um modo geral, o principal elemento de liga dos aços é o carbono, resultando em materiais de baixo custo, porém com tenacidade e soldabilidade reduzidas. No entanto, com o objetivo de melhorar-se a soldabilidade e manter-se a resistência, foi reduzido o teor de carbono e aumentado o teor de manganês. Mesmo assim, falhas catastróficas de estruturas soldadas continuaram ocorrendo, levando ao reconhecimento da necessidade de controle da tenacidade e do tamanho de grão, além de maior redução do teor de carbono [19].

Estudos posteriores mostraram que a redução do tamanho de grão permitia aumentar a resistência e a tenacidade sem comprometer a soldabilidade e a ductilidade. Para que se obtenha austenita de grão refinado e que naturalmente favoreça a nucleação de ferrita durante o resfriamento, resultando em microestruturas de extremamente refinadas, são necessários tratamentos termomecânicos em que deformações significativas são realizadas a temperaturas inferiores à de recristalização. Entretanto, aços C-Mn apresentam temperatura de recristalização muito baixas, sendo necessária a utilização de laminadores de alta potência. Uma opção é a utilização de elementos microligantes, com o nióbio que, dissolvidos na austenita ou precipitados como carbonetos, aumentam a temperatura de recristalização e retardam o crescimento do grão austenítico [19].

Aços carbonos soldáveis laminados a quente e sem tratamento térmico posterior geralmente apresentam microestrutura formada por ferrita e perlita e limite de escoamento entre 207MPa e 345MPa. O aumento do teor de carbono nesses aços aumenta a proporção de perlita na microestrutura e conseqüentemente a resistência mecânica. Entretanto, o uso dessa abordagem para aumento de resistência não é viável, uma vez que resulta em redução na dureza e na soldabilidade. Por exemplo, o aumento do teor de carbono de 0,2 para 0,4% resultaria em um aumento de 414MPa no limite de escoamento, porém os resultados de dureza e soldabilidade seriam insatisfatórios para a maioria das construções soldadas [17].

Uma maneira satisfatória e amplamente utilizada para obtenção de aços ARBL estruturais laminados a quente é a adição de pequenas quantidades de um ou mais elementos de liga como o manganês, silício, cobre, níquel, vanádio e cromo com o objetivo de aumentar a resistência mecânica da ferrita. Uma característica essencial é limitar o teor de carbono em 0,26%, dependendo da desejada combinação de resistência, dureza e soldabilidade [17].

Silva e Mei [19] ressaltam três fatores importantes para a continuação da evolução dos aços ARBL:

- Desenvolvimento de mecanismos para refino de grão, resultando em aumento de tenacidade e limite de escoamento;
- Melhoria da soldabilidade por meio da redução do carbono equivalente, reduzindo a tendência de formação da martensita e pelo controle da evolução da microestrutura da zona afetada pelo calor através do controle do teor de microadições, carbono e nitrogênio presentes;
- Melhoria da tenacidade e da formabilidade, além de buscar isotropia da ductilidade.

3.3.1 Ciclo térmico e curva CCT do aço ASTM A572 G65

A transformação dos aços nos processos industriais ocorrem majoritariamente por resfriamento contínuo, resultando na construção de curvas de transformação por resfriamento contínuo (TRC), ou do inglês, *continuous cooling transformation* (CCT). A construção destas curvas é realizada através da austenitização das amostras e posteriores resfriamentos em diferentes taxas, analisando-se o comprimento da amostra e relacionando-se com a microestrutura formada [19].

As curvas CCT descrevem a extensão das transformações de fase em função do tempo através de um resfriamento contínuo, sendo que as linhas do diagrama descrevem o início e fim da mudança de uma microestrutura em particular. Atualmente, as curvas CCT tem sido utilizadas como suporte na seleção de composições e rotas de processo para que se obtenha uma microestrutura específica [22].

O aço utilizado neste trabalho é o ASTM A572 G50, porém, pela dificuldade de encontrar-se informações sobre ciclo térmico e curvas de CCT na literatura, será apresentada nesta seção a curva CCT do aço ASTM A572 G65 criada a partir de simulações físicas utilizando as técnicas de dilatométrica de alta velocidade e o aquecimento/resfriamento controlado. Uma vez que o metal de adição utilizado neste trabalho possui elevados teores de manganês, entende-se que a compressão da curva apresentada suportará a análise do comportamento das juntas estudadas. As diferenças entre os aços serão citadas ao decorrer desta seção.

A norma ASTM A572M [20] apresenta os aços ASTM 572 G50 e G65 com composição química básica muito próximas, variando o teor de manganês em 0,3% em peso. Ambas as composições químicas básicas são mostradas na tabela 2.

Tabela 2 - Composições químicas dos aços ASTM A572 - % em peso [20].

Grau	C max [%]	Mn max [%]	P max [%]	S max [%]
50	0,23	1,35	0,04	0,05
65	0,23	1,65	0,04	0,05

O maior teor de manganês reflete em maiores resistências mecânicas para o aço ASTM 572 G65. A tabela 3 apresenta os requisitos de resistência à tração para os aços ASTM A572 G50 e G65.

Tabela 3 - Requisitos de resistência nominal à tração para os aços ASTM A572 G50 e G65 [20].

Grau	Limite de escoamento (mínimo)	Limite de resistência à tração (mínimo)	Alongamento (% mín.)	
			200mm	50mm
50	345 Mpa / 50 ksi	450 Mpa / 65 ksi	18	21
65	450 Mpa / 65 ksi	550 Mpa / 80 ksi	15	17

A curva CCT mostrada na figura 26, foi gerada com base nos ciclos térmicos em dilatômetro e ciclos térmicos em equipamento Gleebe, com caracterização das microestruturas, ensaios de tração e comparação dos resultados experimentais com o de juntas soldadas reais. Isso comprova que a utilização da curva CCT e do atlas microestrutural suportam a seleção da energia de soldagem adequada para cada processo [23].

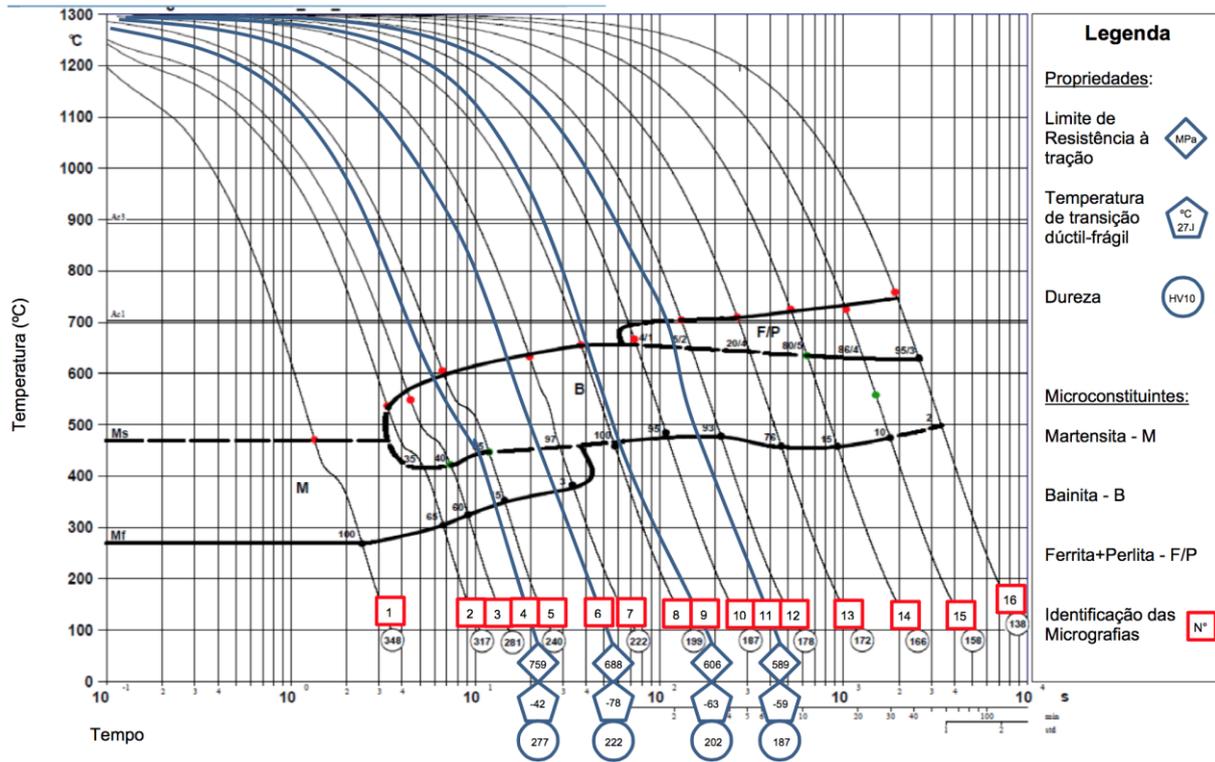


Figura 26 - Atlas do aço ASTM A572 grau 65 levantado a partir dos dados experimentais [23].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Anteriormente a este trabalho, foram realizados experimentos para adquirir conhecimento e entender os impactos das variáveis do equipamento de soldagem tandem GMAW e para desenvolver os métodos que seriam utilizados neste trabalho de Mestrado. Estes experimentos foram publicados no formato de artigos científicos no XLII Consolda 2016 e no XLIII Consolda 2017.

Desta forma, para atender o objetivo de otimização do tempo de ciclo através da variação da energia de soldagem e da oscilação da tocha, a principal junta soldada presente nos conjuntos produzidos pela estação de soldagem será analisada utilizando os materiais e métodos descritos a seguir.

4.1 Materiais

Foram utilizados metal base ASTM A572 G50 e metal de adição AWS 5.18 ER70S-6 com diâmetro de 1,32mm. Descreve-se nas tabelas 4 e 5, as composições químicas extraídas dos boletins técnicos dos metais base e de adição.

Tabela 4 - Composição química do metal de base ASTM A572 G50.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Ceq
% peso	0,13	0,24	1,29	0,02	0,0008	0,007	0,012	0,007	0,028	0,003	0,381

Tabela 5 - Composição química do metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
% peso	0,12	1,15	1,8	0,025	0,025	0,15	0,15	0,35	0,15	0,03

4.1.1 Geometria dos corpos de prova

Serão utilizadas duas chapas de aço ASTM A572 G50 com dimensões de 200x200x15mm (CxLxE) cortadas pelo processo de corte plasma para compor as juntas em ângulo com dimensão da garganta de solda de 7mm (a7). A figura 27 representa a montagem dos corpos de prova.

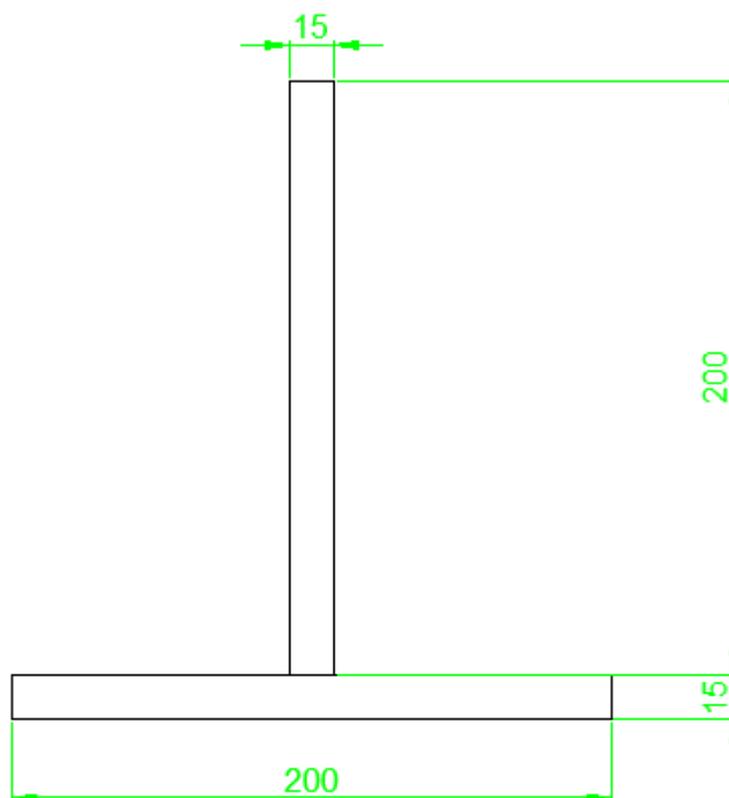


Figura 27 - Corpo de prova para junta em ângulo. Dimensões em mm.

4.2 Métodos

Os métodos utilizados para realização de ensaios deste trabalho serão descritos nas subseções a seguir.

4.2.1 Procedimento de Soldagem

Foi utilizada uma estação de soldagem robotizada equipada com tocha de soldagem tandem de potencial isolado e duas máquinas de solda Fronius TPS 5000 Time Twin sincronizadas. As curvas sinérgicas de soldagem são desenvolvidas pelo fabricante das máquinas de solda, não sendo possível alterar suas configurações.

Para a soldagem, os corpos de prova foram posicionados em uma bancada na posição plana (ASME-1F) [36]. A bancada utilizada neste estudo e mostrada na figura 28, foi preparada com o objetivo de eliminar variações externas que

pudessem afetar a distância bocal-peça nas diferentes condições de soldagem analisadas.



Figura 28 - Posicionamento do corpo de prova e tocha de soldagem tandem.

Aproveitando que as fontes de soldagem Fronius TPS 5000, quando utilizadas com o módulo “Time Twin”, possibilitam parametrizações individuais para os arames “master” e “slave”, além de diferentes modos de transferência metálica para cada um dos arames, três diferentes condições de soldagem foram estudadas.

A primeira condição estudada, denominada de condição 1, utilizou os parâmetros de soldagem definidos na programação inicial para a soldagem desta junta pelo robô. Os parâmetros e modos de transferência desta condição serão detalhados na tabela 6, ressaltando-se que nesta condição ambos os arames estão configurados para transferência no modo pulsado.

Já as condições 2 e 3 utilizaram novos parâmetros de soldagem definidos após testes preliminares. Nestas duas condições, a velocidade de deslocamento foi aumentada com o objetivo de reduzir o tempo de processo e a corrente do arame “master” foi alterada para contínua, passando a ter transferência metálica por spray, sendo o arame “slave” mantido no modo de transferência e

corrente pulsada. A angulação da tocha é o único parâmetro divergente entre estas duas condições. Na condição 3 foi adicionado um ângulo de 10° na tocha de soldagem com o objetivo de aumentar a penetração de raiz através do arame “master”. Para o cálculo da energia (*heat input*), foram utilizados os valores médios de corrente e tensão extraídos do software de aquisição de dados descrito na próxima seção. Parâmetros destas duas últimas condições também estão detalhados na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados nas condições 1, 2 e 3.

Condição de soldagem	Arame	Modo de transferência	Deslocamento [mm/min]	Angulo tocha [°]	Corrente [A]	Tensão [V]	Energia [kJ/mm]
1	Master	Pulsado	460	0	301	26	1,02
	Slave	Pulsado			256	29	0,97
2	Master	Contínuo	570	0	427	32	1,44
	Slave	Pulsado			294	29	0,90
3	Master	Contínuo	570	10	418	32	1,41
	Slave	Pulsado			295	29,6	0,92

4.2.2 Aquisição de dados de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame instantâneos

Foi utilizado o sistema de aquisição de dados SAP V4 Duplo fabricado pela IMC Soldagem com o objetivo de acompanhar instantaneamente valores de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arames para ambos os arcos elétricos. Os dados adquiridos com este equipamento permitirão análises como a de interrupções e tensões anormais dos arcos elétricos, fatores que impactam na qualidade da junta soldada. A Figura 29 mostra o sistema de aquisição de dados conectado a um computador.

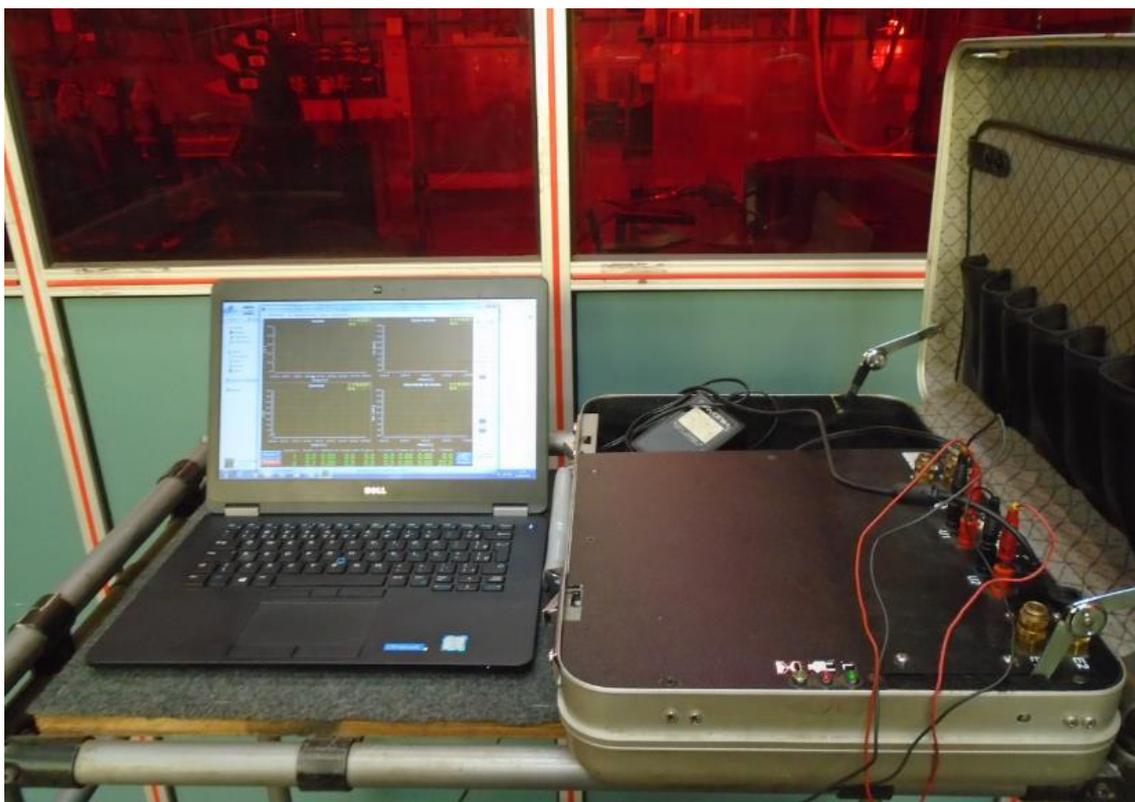


Figura 29 - Sistema de aquisição de dados SAP V4 duplo responsável por adquirir 3000 medições por segundo.

4.2.3 Ensaio de microdureza Vickers

Foram determinados os perfis de microdureza Vickers para três amostras de cada condição de soldagem com carga de 1kgf (HV 1,0) e espaçamento de 0,5mm com o objetivo de avaliar a variação de dureza no metal base, zona afetada pelo calor e zona fundida utilizando-se as normas ISO 9015-1 e ISO 9015-2 [33], [34]. A figura 30 exemplifica como foram realizadas as medições para posterior levantamento do gráfico de perfil de microdureza.

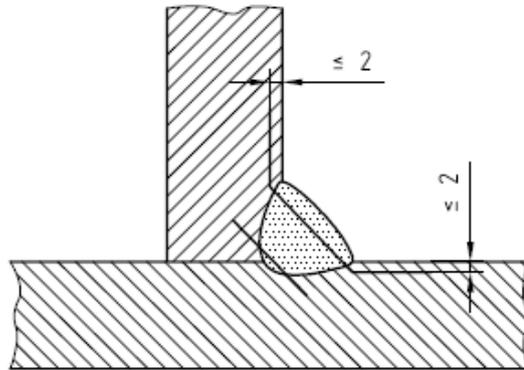


Figura 30 - Linhas para realização de perfil de microdureza de juntas em ângulo de acordo com norma ISO 9015-2 [34].

4.2.4 Macrografia e Evolução Microestrutural

A análise metalográfica das juntas soldadas foi realizada através de macrografia e microscopia óptica (MO). As amostras foram preparadas pelas técnicas de lixamento e polimento, sendo posteriormente atacadas quimicamente com reagente nital 3%. Foram avaliadas as microestruturas do metal de base, zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de adição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise macrográfica das juntas soldadas

A análise macrográfica das juntas foi realizada com o objetivo de avaliar a geometria do perfil de penetração e da zona afetada pelo calor nas três condições. Para facilitar a análise, as imagens tiveram estas regiões destacadas através de linhas coloridas e em seguida foram sobrepostas. A condição 1, destacada em azul na figura 31, apresentou perfil de penetração raso e irregular, resultado do modo pulsado para o arame master combinado com os fenômenos de tensões anormais e interrupções de arco. Já a condição 2, destacada em vermelho, e a condição 3, destacada em verde, apresentaram perfis de penetração mais profundos, uma vez que a corrente constante imposta na transferência spray do arame “master” transfere níveis de energia mais altos para a poça de fusão.

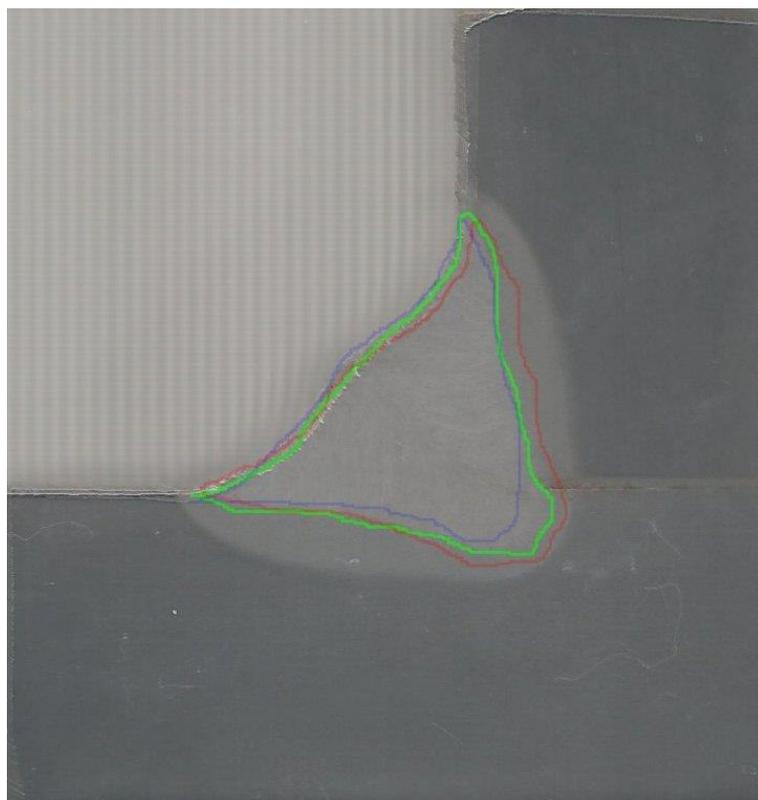


Figura 31 - Comparativo de perfil de penetração para corpos de prova em aço estrutural ASTM A572 G50 soldados com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Condição 1 destacada em azul, condição 2 destacada em vermelho e condição 3 destacada em verde .

A figura 32 representa a zona afetada pelo calor, sendo o perfil em azul utilizado para representar a ZAC da condição 1, o perfil em vermelho para a ZAC da condição 2 e o perfil em verde para a ZAC da condição 3. Embora a condição 1 utilizasse modo pulsado nos arames master e slave resultando em menores níveis de energia, o tamanho da região da ZAC nas paredes laterais foi muito próximo ao tamanho das condições 2 e 3. A ZAC aparece mais profundamente nas condições 2 e 3 apenas na região de junção das duas chapas do corpo de prova e assim como no perfil de penetração, seu maior tamanho é justificado pelo maior aporte de energia da corrente contínua no arame master.

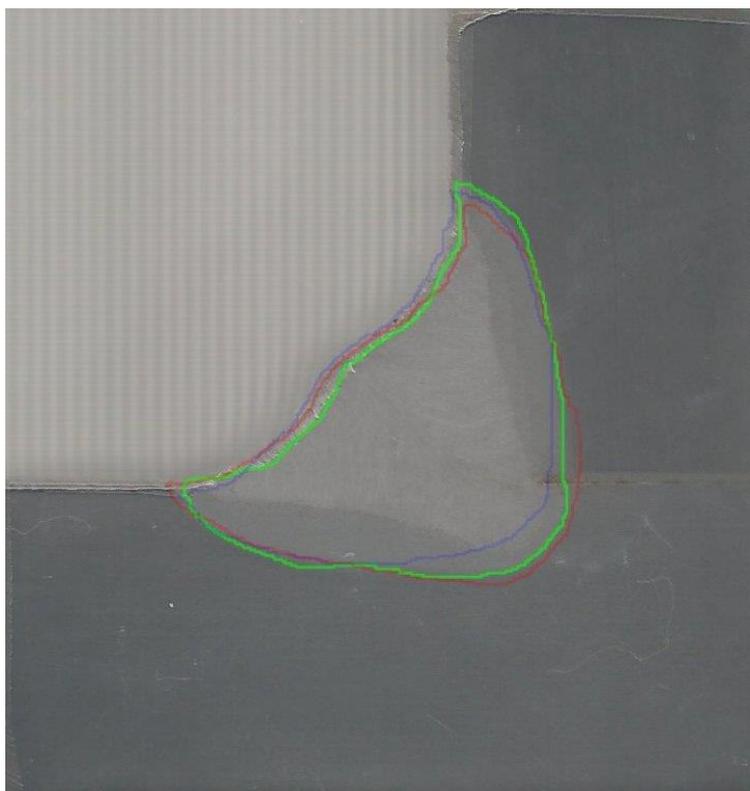


Figura 32 - Comparativo da zona afetada pelo calor para corpos de prova em aço estrutural ASTM A572 G50 soldados com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Condição 1 destacada em azul, condição 2 destacada em vermelho e condição 3 destacada em verde.

5.2 Análise de dados de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame instantâneos

A revisão bibliográfica mostrou que a interação entre os arcos elétricos no processo de soldagem tandem GMAW pode resultar em tensões anormais e interrupções dos arcos elétricos, sendo um fator determinante para obtenção de juntas uniformes e sem presença de defeitos.

Para esta análise, foram soldados 3 corpos de provas de cada uma das condições detalhadas na seção 6.2.1 – tabela 9 utilizando o equipamento registrador de dados SAP V4 duplo que registrava 3000 medições por segundo. Devido à diferença de velocidade de deslocamento do robô, o tempo de soldagem para a condição 1 foi de 26 segundos enquanto que o tempo de

soldagem para as condições 2 e 3 foi de 21 segundos. Desta forma, optou-se pela análise comparativa do intervalo entre 8 e 19 segundos, descartando os trechos iniciais e finais dos corpos de prova, onde ocorre maior instabilidade do processo.

O intervalo de 15,0 segundos até 15,2 foi escolhido aleatoriamente para demonstrar de forma macro os comportamentos das curvas de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame para as condições 1, 2 e 3. De acordo com o comportamento de cada curva, intervalos de tempo específicos serão destacados e analisados detalhadamente de acordo com a necessidade de cada condição nos parágrafos subsequentes. Em todas as figuras desta seção, as curvas do arame master são representadas pela cor azul, enquanto que as curvas do arame slave são representadas pela cor vermelha.

Através da análise da figura 33, é possível observar que ambos os arcos elétricos estão no modo de transferência pulsado com defasagem entre as fases e que característica das curvas não é extremamente regular, indicando a presença de anormalidades que serão detalhadas nos parágrafos seguintes.

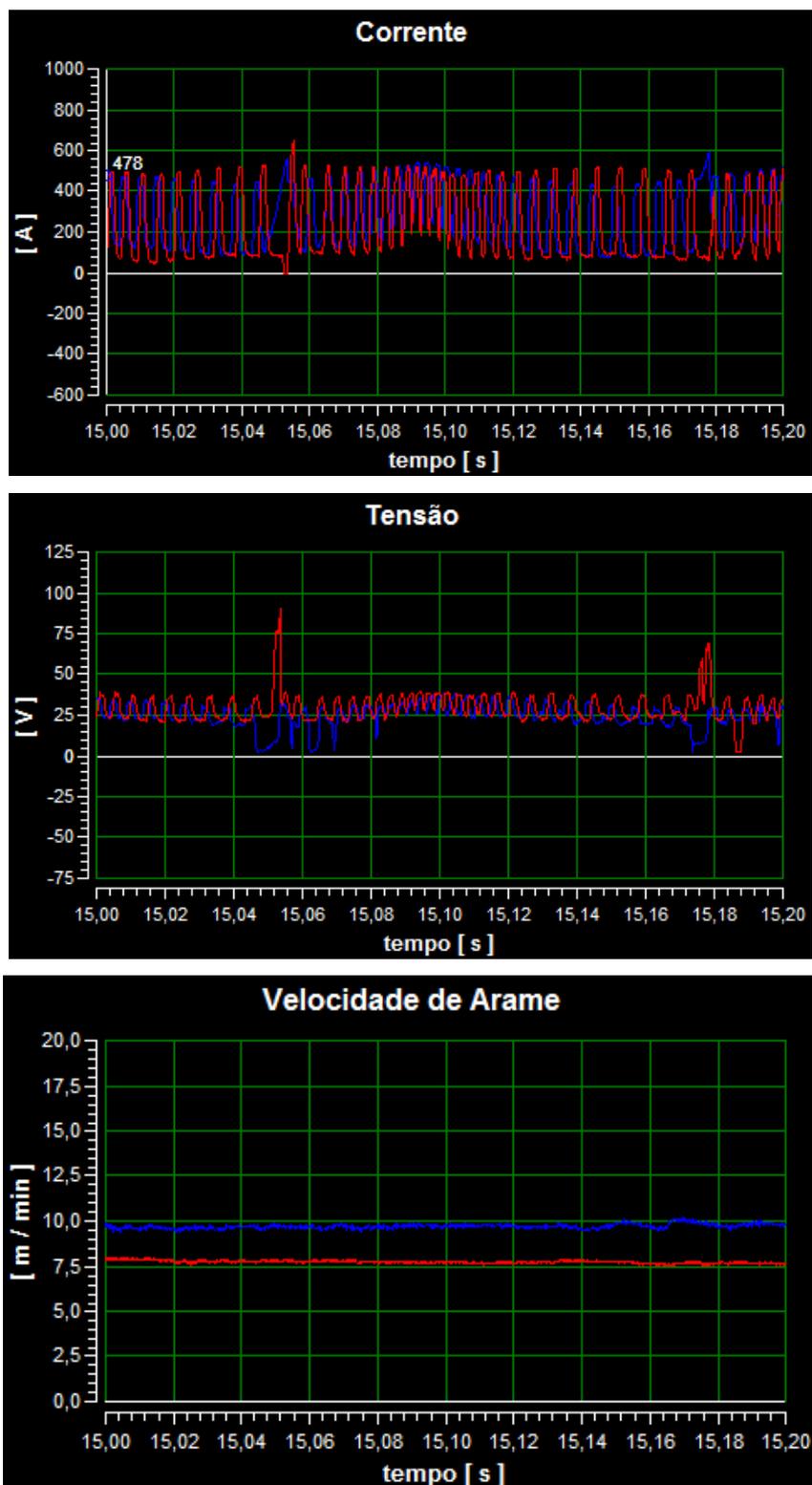


Figura 33 – Evolução da variação de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 1 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

A irregularidade das curvas de corrente e tensão da condição 1, principalmente para o arame slave, requer análise mais detalhada. Aplicando-se diferentes aproximações para as curvas de corrente e tensão, é possível observar na figura 34 que no intervalo entre 15,04 e 15,06 segundos ocorre a interrupção do arco elétrico do arame slave. Este fenômeno, onde o arco se apaga momentaneamente, é caracterizado pela queda de corrente até zero ampères e um abrupto aumento da tensão para valores maiores que 80V.

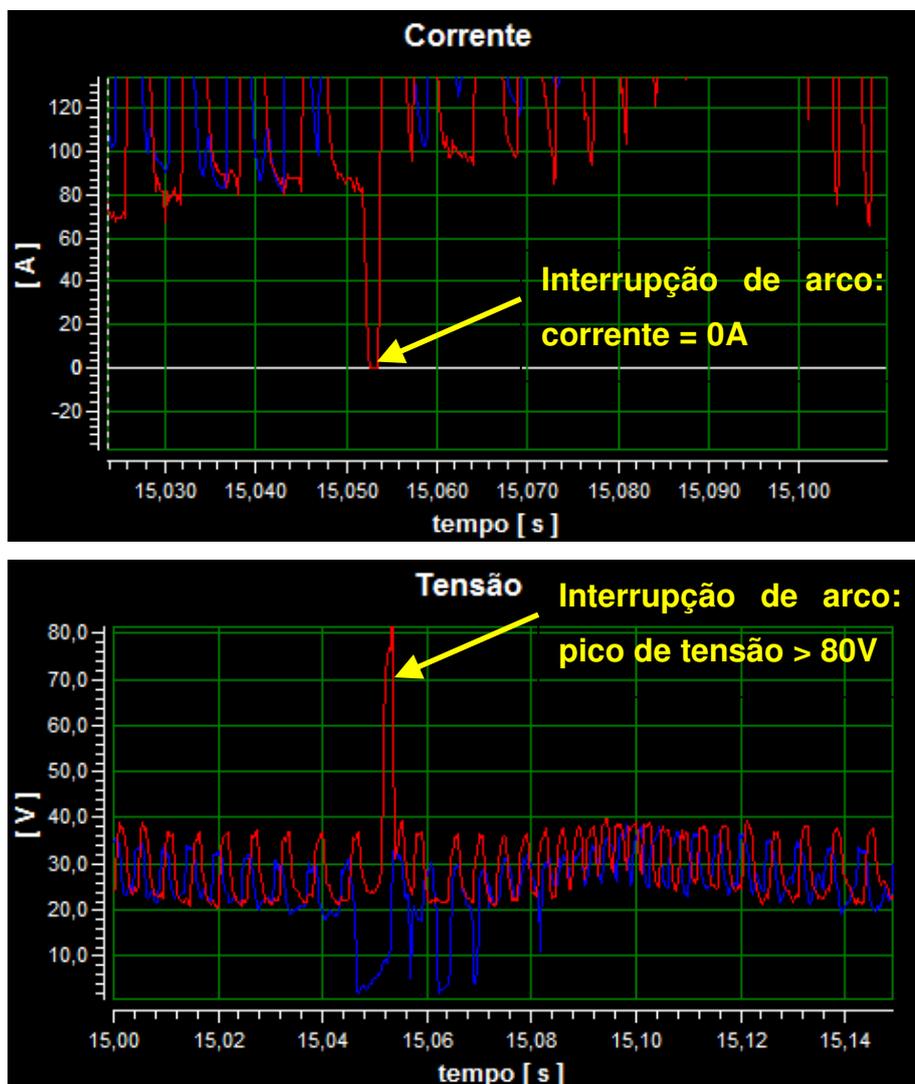


Figura 34 - Ocorrência de interrupção do arco elétrico para o arame slave no intervalo entre 15,04 e 15,06s durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

As figuras 35 e 36 representam as curvas de corrente, tensão e velocidade de alimentação para a condição 2. Analisando-as, conclui-se que o processo de soldagem nesta condição é muito mais estável. Além da regularidade, é possível observar que o arame master está configurado no modo de corrente contínua e o arame slave no modo de corrente pulsada. Comparativamente à condição 1, também observa-se maior velocidade de alimentação de arame, o que possibilita aumentar a velocidade de deslocamento do robô e redução do tempo de processo.

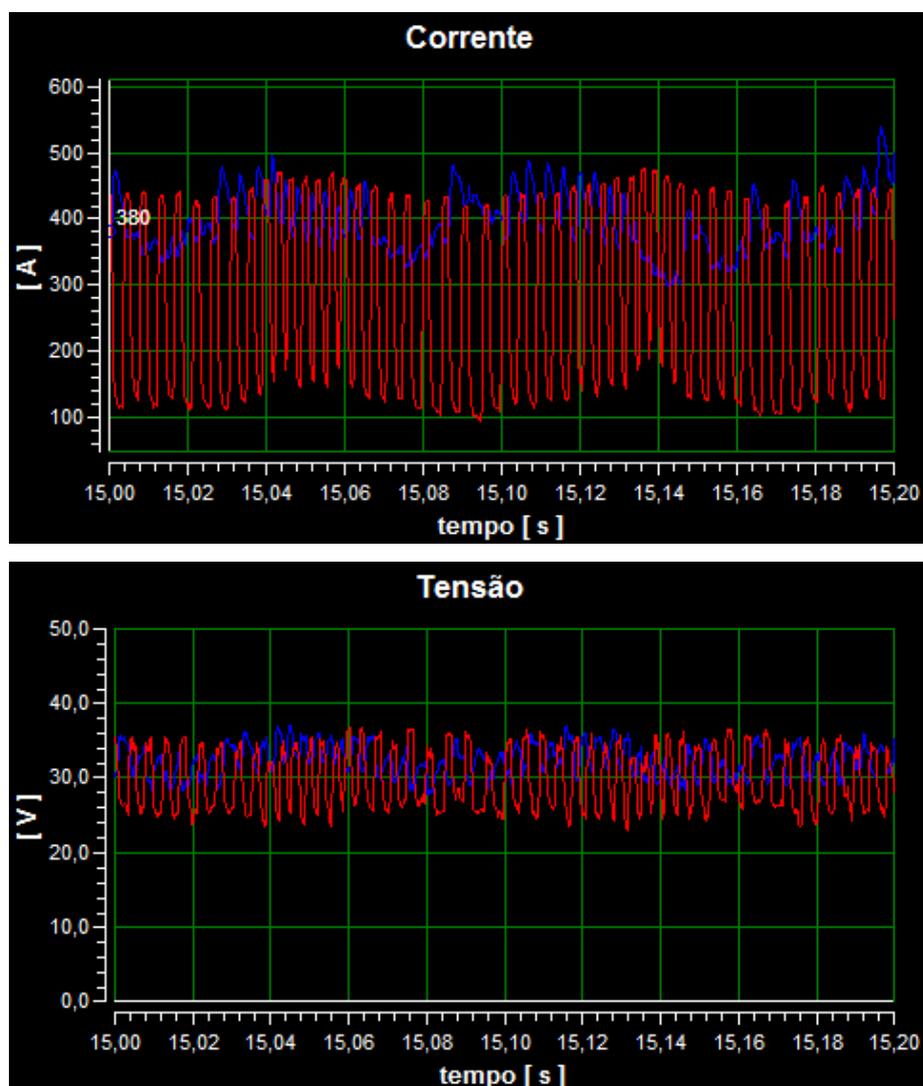


Figura 35 - Evolução da variação de corrente e tensão de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 2 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

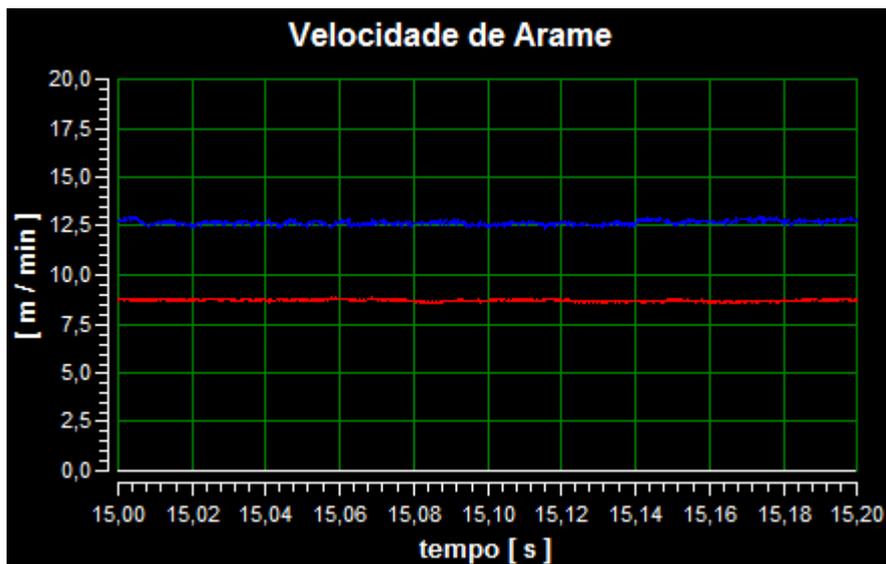


Figura 36 - Evolução da variação da velocidade de alimentação de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 2 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

No caso da condição 2, a análise das figuras 35 e 36 mostra que devido à maior velocidade de alimentação em ambos os arames, o nível de corrente é mantido mais alto. Observa-se que a corrente de base para o arame slave se mantém acima de 100 A, enquanto que na condição 1 este valor era próximo de 60 A.

As figuras 37 e 38 mostram com maior detalhamento as evoluções da corrente e tensão para a condição 2.

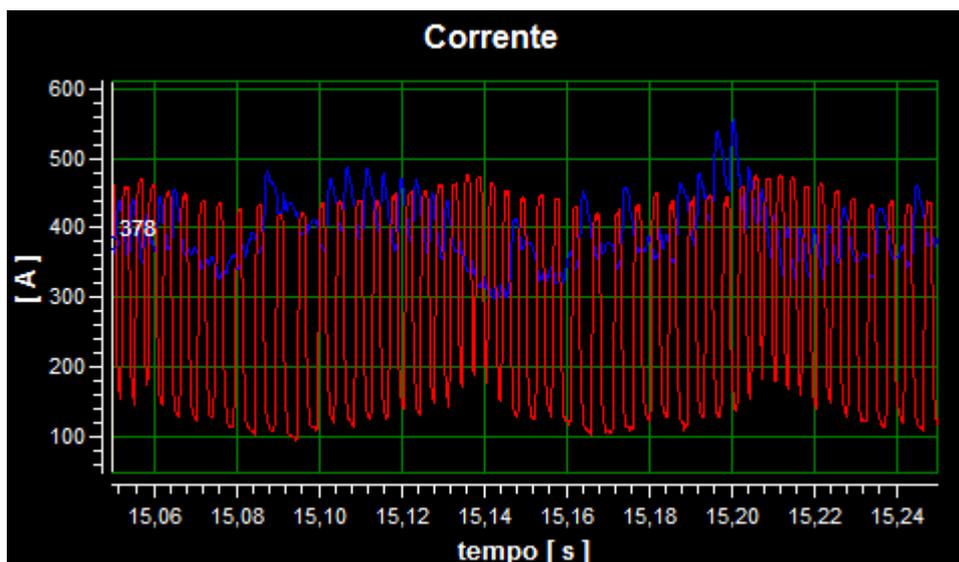


Figura 37 - Visualização detalhada da curva de corrente elétrica para a condição 2 durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

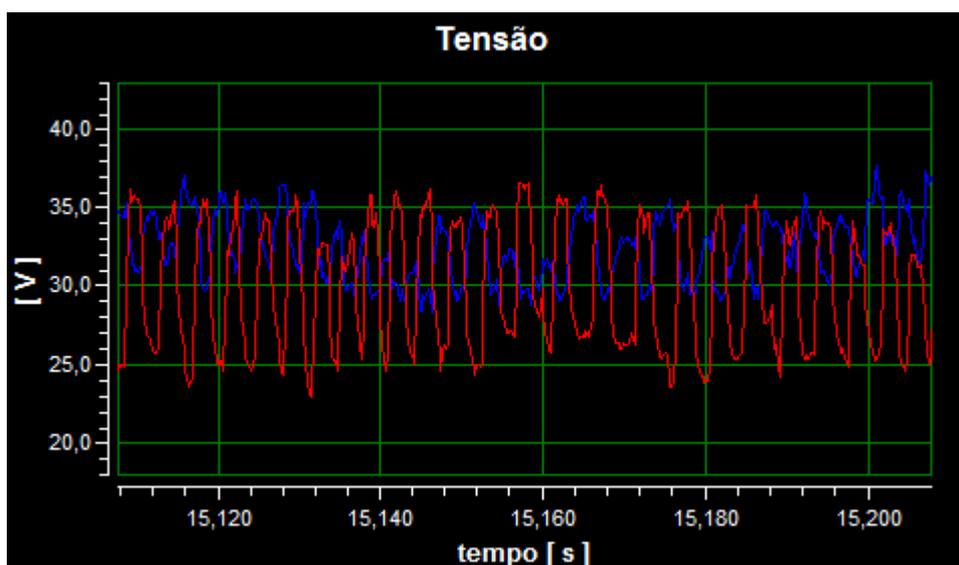


Figura 38 - Visualização detalhada da curva de tensão para a condição 2 durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

Por fim, as curvas da condição 3 são apresentadas. Esta condição utilizou os mesmos parâmetros de corrente, tensão, velocidades de alimentação de arames e velocidade de deslocamento do robô que a condição 2, divergindo apenas na angulação da tocha. Nota-se que a angulação da tocha afeta a

dinâmica da poça de fusão, refletindo no comportamento das curvas. As figuras 39 e 40 mostram que o arame slave manteve-se estável assim como na condição 2, porém o arame master apresentou oscilações com amplitude levemente maiores para as curvas de corrente e tensão.

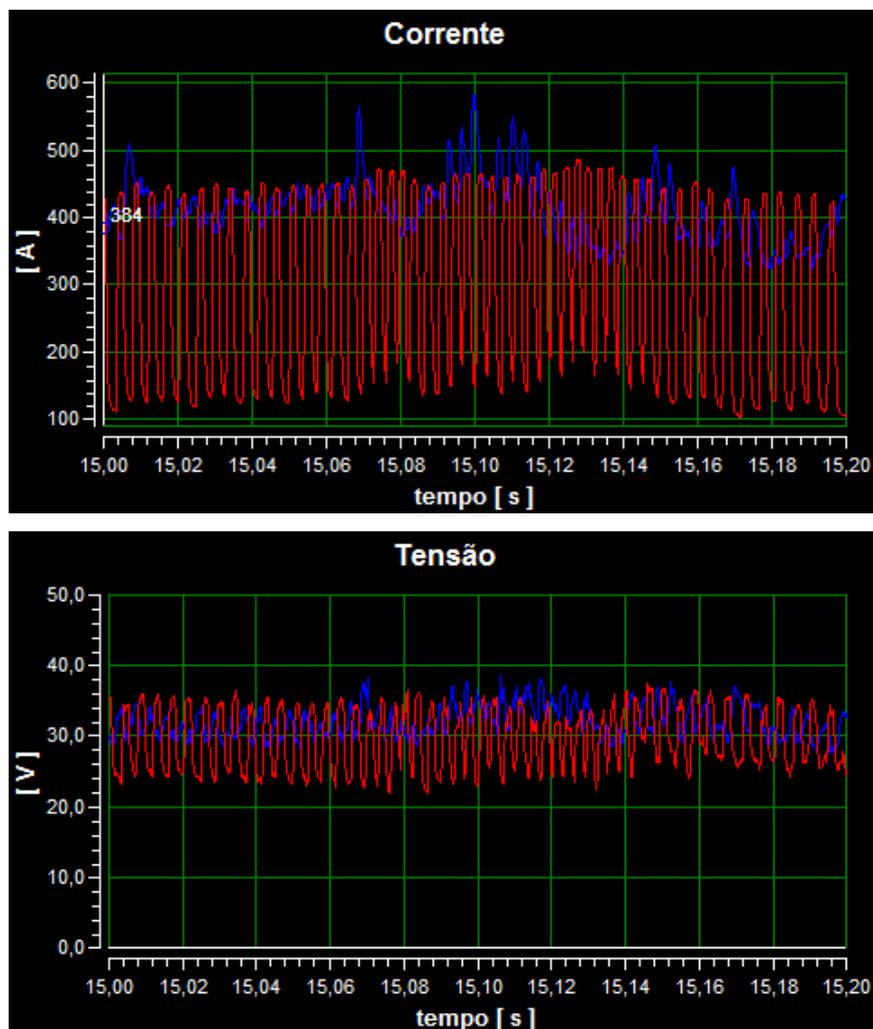


Figura 39 - Evolução da variação de corrente e tensão no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 3 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

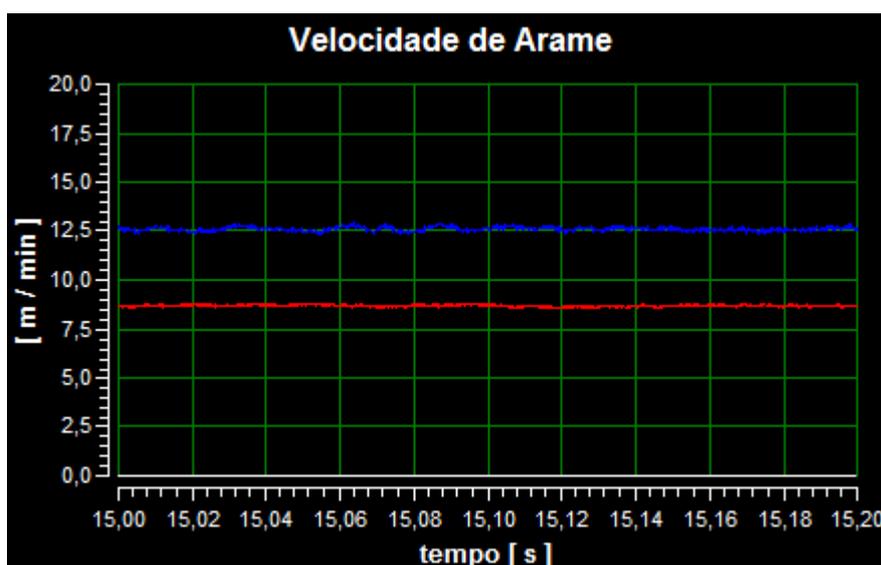


Figura 40 - Evolução da variação da velocidade de alimentação de arame no intervalo de 15,0s até 15,2s para a condição 3 de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

As figuras 41 e 42 trazem visualizações aproximadas das curvas de corrente e tensão. É possível perceber que o valores de corrente para o arame master oscilou entre 500 e 300A entre 14,74 e 14,76s e a curva de tensão apresentou um ligeiro pico acima de 40V, evidenciando a probabilidade de ocorrência de tensões anormais.

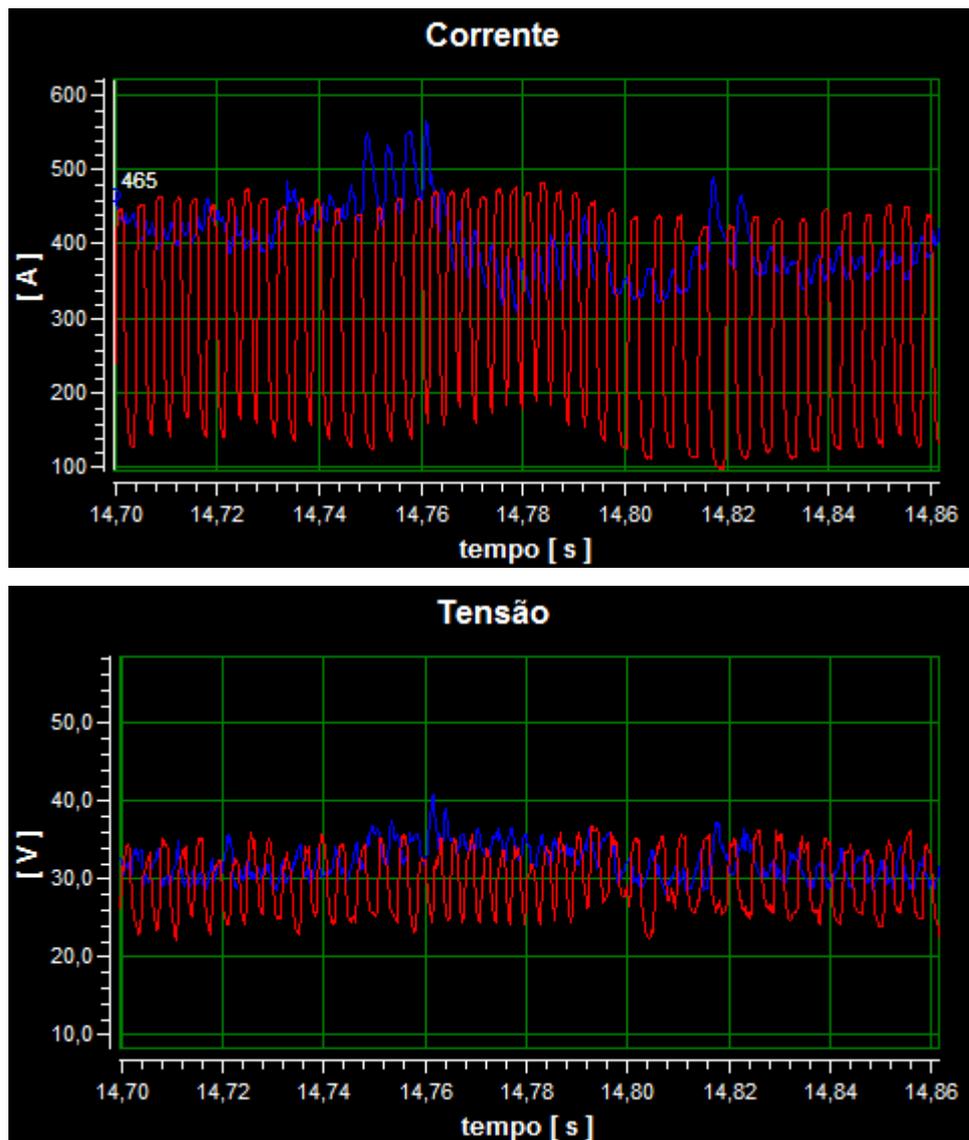


Figura 41 - Visualização detalhada das curvas de corrente e tensão para a condição 3 durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho.

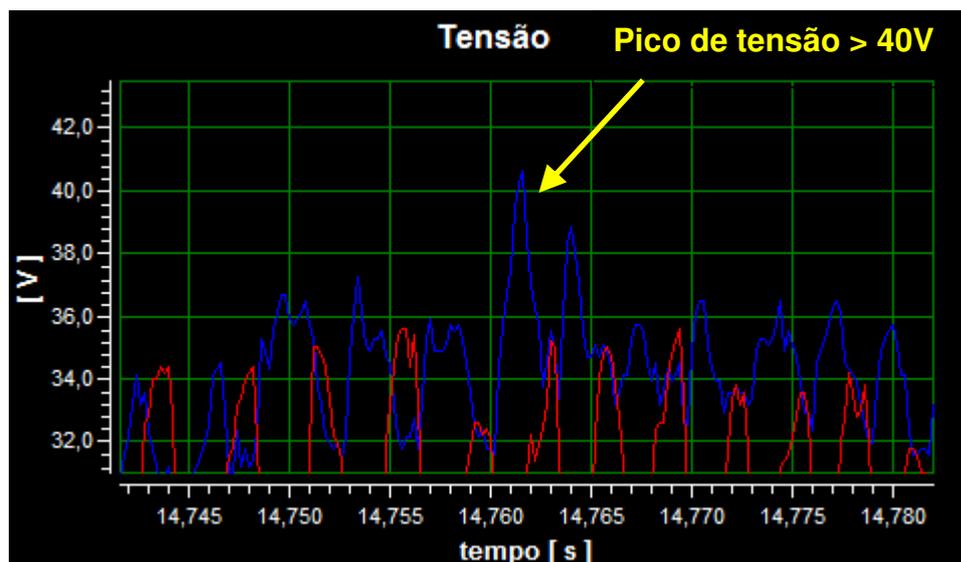


Figura 42 - Visualização detalhada da curva de tensão para a condição 3 evidenciando o pico de tensão no intervalo de 14,76 e 14,765s durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6. Master – azul; slave – vermelho..

Além da análise gráfica das curvas de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame, foram extraídos os dados registrados pelo software SAP V4 Duplo para o Microsoft Excel. Esta análise de dados teve foco na quantificação de ocorrência dos fenômenos de interrupção de arcos elétricos e tensões anormais com o objetivo de identificar quais das condições investigadas apresentava o processo mais estável.

Como critérios para identificar interrupção de arcos elétricos, foram considerados intervalos onde a corrente atingiu valor nulo e a tensão ultrapassou 80V, conforme adotado pelo trabalho de Chen et al. [25]. Para definição dos níveis de valores para tensões anormais, histogramas de tensão foram extraídos para as três condições, sendo estes mostrados nas figuras 43, 44 e 45. Através de sua análise, foram adotados valores acima de 40V como tensões anormais.

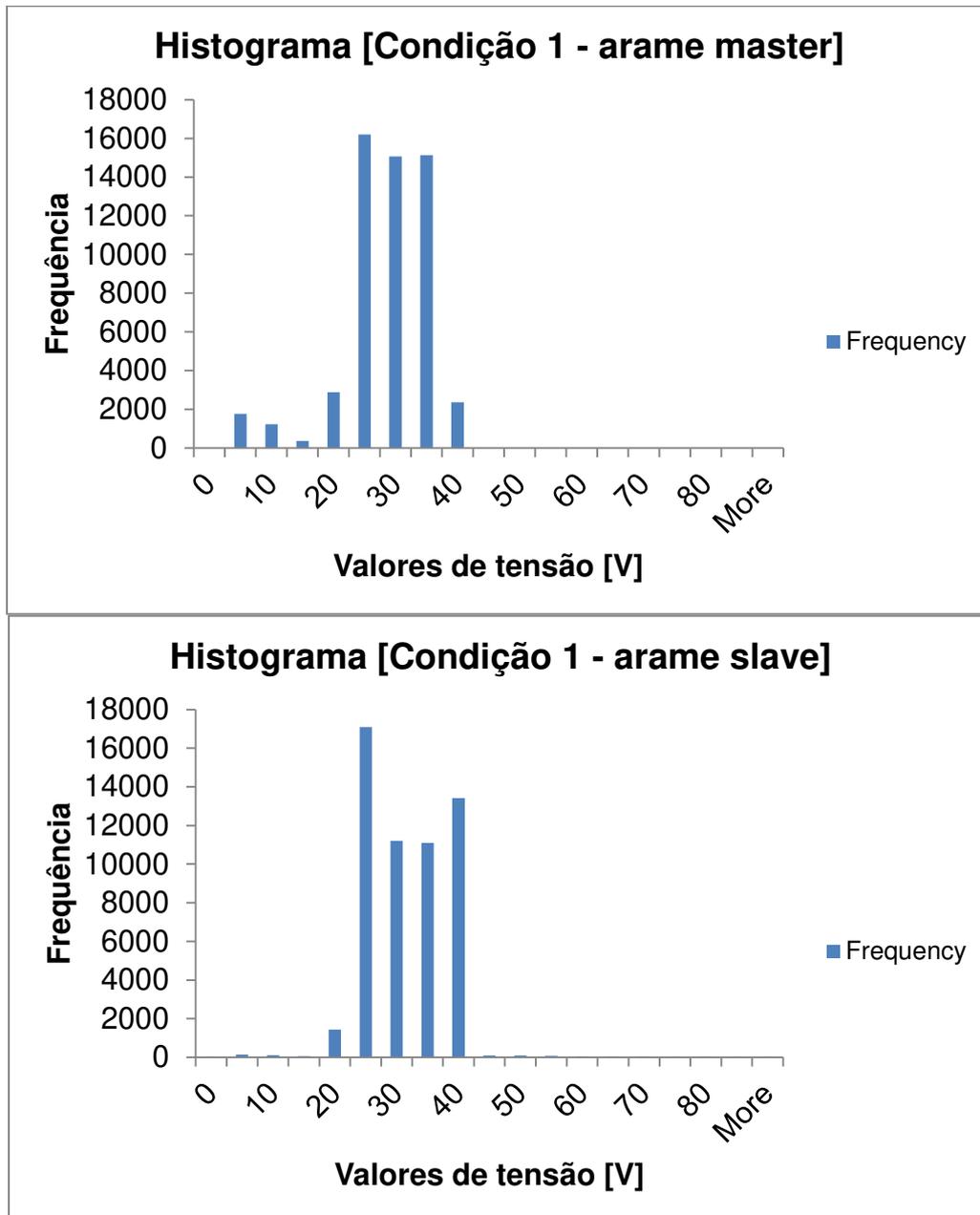


Figura 43 - Histograma de valores de tensão para os arames master e slave na condição 1 de soldagem.

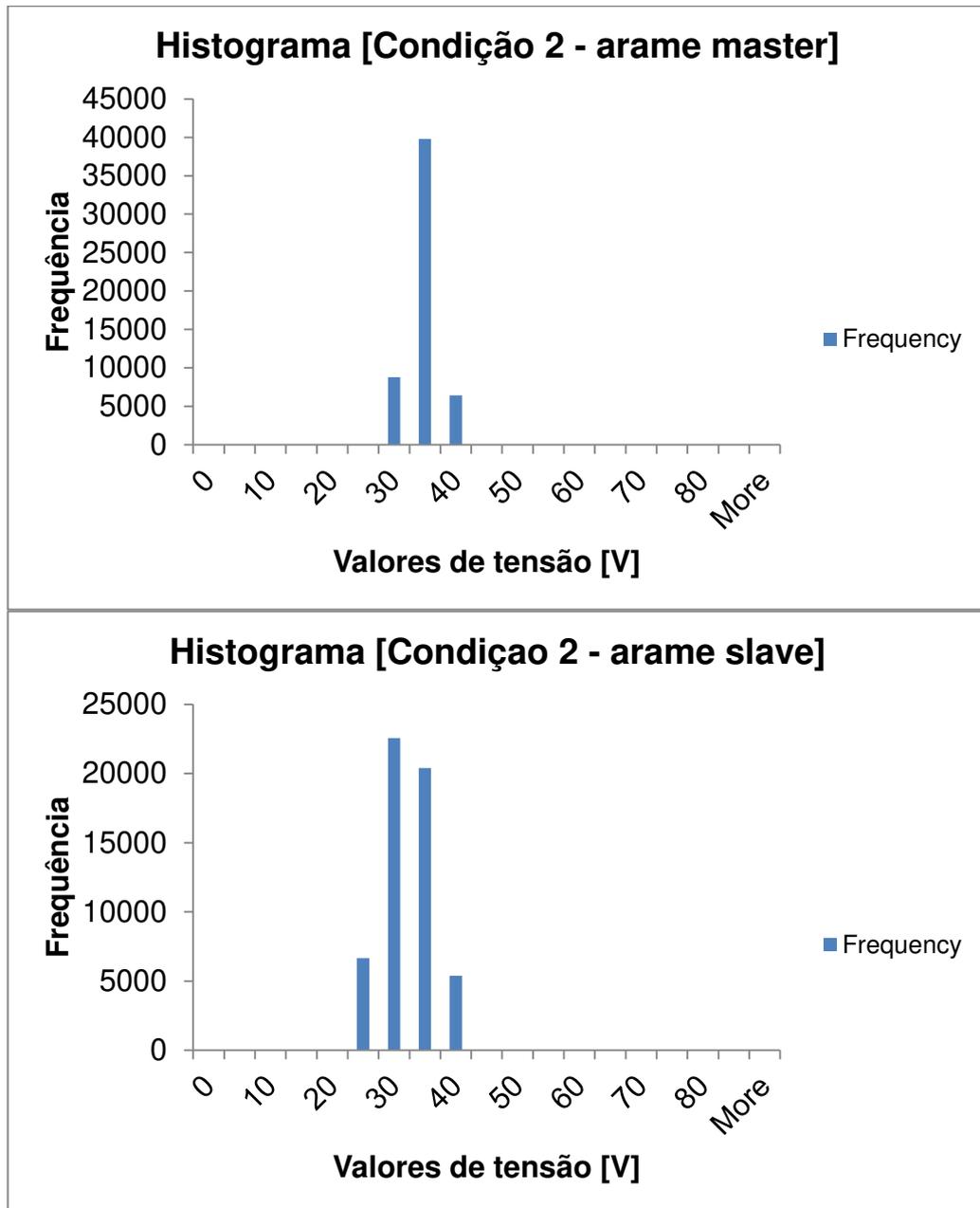


Figura 44 - Histograma de valores de tensão para os arames master e slave na condição 2 de soldagem.

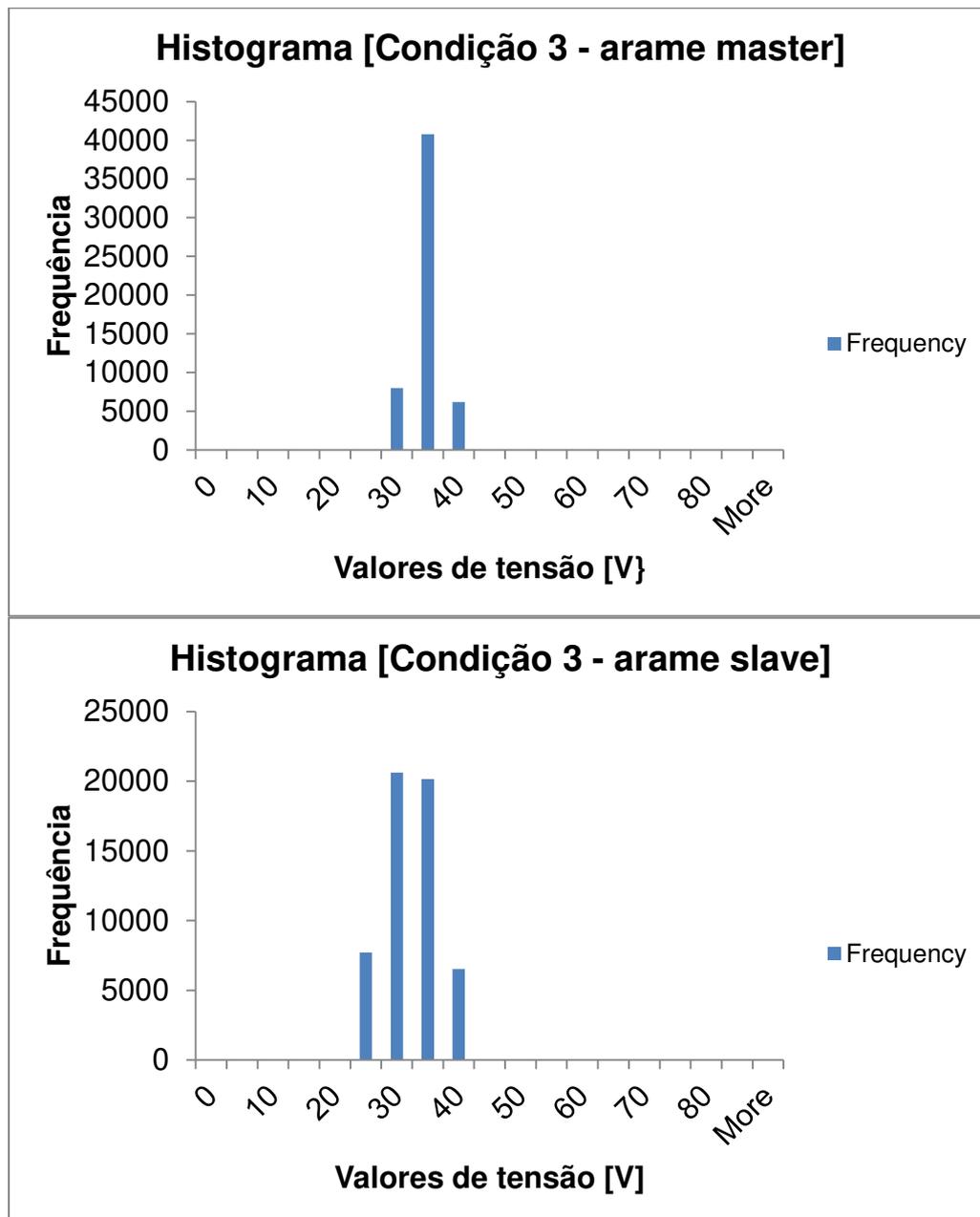


Figura 45 - Histograma de valores de tensão para os arames master e slave na condição 3 de soldagem.

Após definidos os valores limite para classificação como interrupções de arcos elétricos e tensões anormais, a quantificação destes fenômenos foi realizada para as três condições. É possível verificar no gráfico mostrado na figura 46

que a condição 1 é a mais instável, principalmente no arco elétrico do arame slave, apresentando 290 ocorrências de tensões anormais e 26 interrupções de arco elétrico. A condição 2 não apresentou situações anormais de tensão, mostrando-se extremamente viável para adoção no processo em questão. Já a condição 3 apresentou apenas algumas tensões ligeiramente anormais no arame master, apresentando-se uma boa opção, porém com maior geração de respingos durante a soldagem.

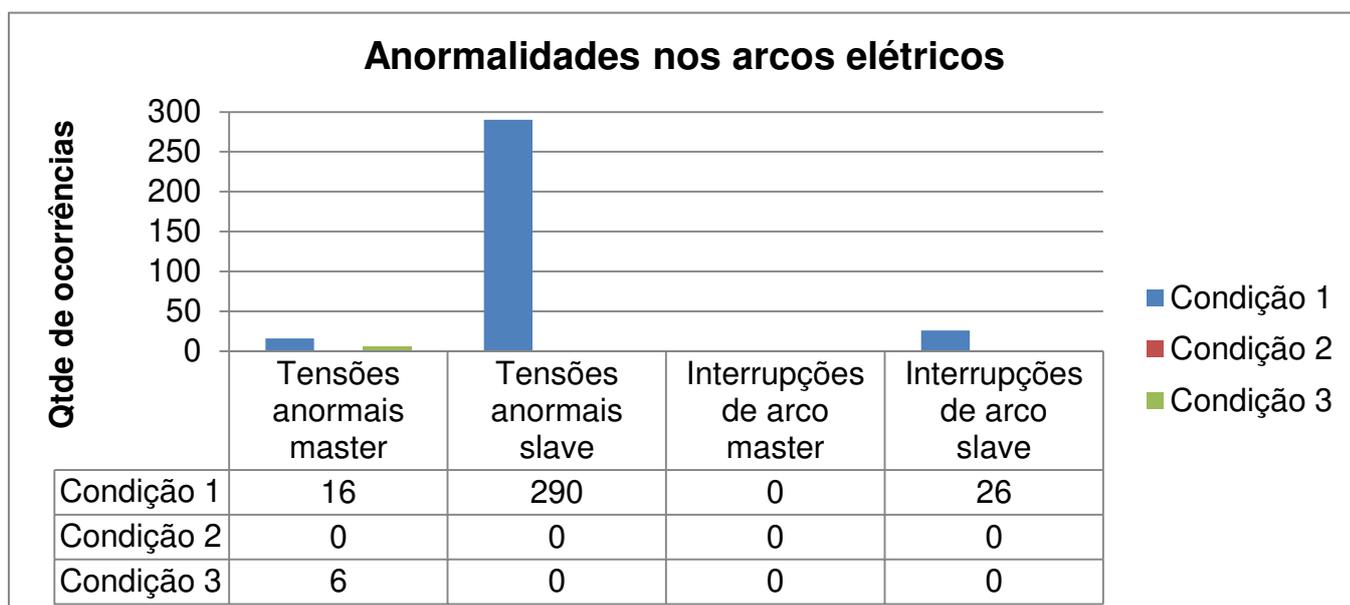


Figura 46 - Quantificação de ocorrências de tensões anormais e interrupções de arco para os arames master e slave nas três condições estudadas durante soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.

5.3 Perfil de microdureza Vickers

O perfil de microdureza Vickers foi adotado neste trabalho pois, uma vez que as identificações são realizadas com espaçamento de 0,5mm entre si, possibilitam medir a dureza nas regiões de grãos grosseiros, grãos finos, zona intercrítica e zona subcrítica que compõem a zona afetada pelo calor. A revelação microestrutural mostrou que o perfil de penetração e da zona afetada pelo calor foram diferentes em cada uma das condições, e, portanto, o gráfico contendo os perfis de microdureza não mostrará as subdivisões de metal de base, metal de adição e zona afetada pelo calor, sendo as variações descritas nos

parágrafos referentes à cada situação de soldagem.

As medições foram subdivididas em 4 trechos diferentes, mostrados na figura 47, de acordo com o indicado na norma ISO 9015-2 [34], iniciando e terminando no metal de base. As medições dos trechos 1 a 3 visam criar o perfil de microdureza do trecho do cordão de solda gerado pelo arame slave, enquanto que as medições do trecho 4 suportam a análise do trecho pelo arame master.

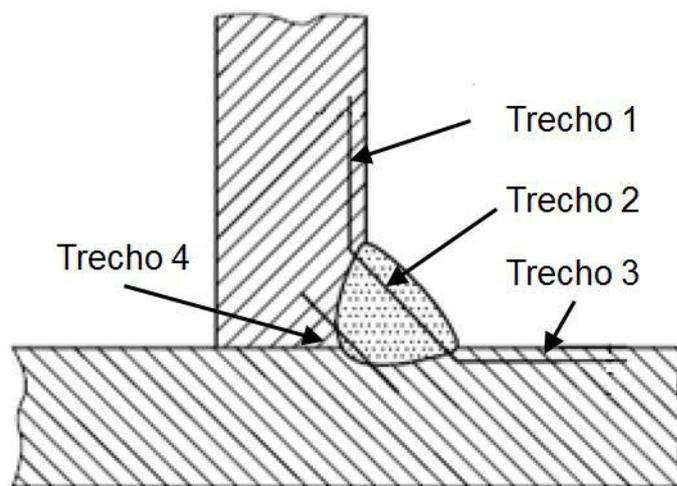


Figura 47 - Trechos para medições de microdureza das juntas soldadas nas condições 1, 2 e 3.

A figura 48 mostra os perfis de microdureza dos trechos 1 a 3 interligados, seguindo a mesma distribuição de cores de cada condição de soldagem adotada para análises macrográficas. Nota-se maior aumento de dureza na zona termicamente afetada (ZAC), seguido de aumento de dureza na zona fundida, ambos devido ao resfriamento rápido do metal.

A energia de soldagem (*heat input*) para a condição 1 foi menor, apresentando menores valores de dureza quando comparada às condições 2 e 3, principalmente no intervalo central entre os pontos 15 e 40 que representa o metal de solda. Nesta condição (1), a ZAC compreende o intervalo entre os pontos 8 a 14 e volta a aparecer no intervalo entre os pontos 41 a 48, sendo este segundo trecho com valores consideravelmente acima das outras

condições estudadas. Este fato pode ser explicado com base no ciclo térmico, e consequente taxa de resfriamento, imposto pela utilização de corrente pulsada ser diferente do imposto pela utilização de corrente contínua (caso das condições 2 e 3). Na transferência pulsada, a corrente de pico é mais elevada que a corrente contínua utilizada na transferência por spray, e por ser aplicada em um curto intervalo de tempo, aumenta a taxa de resfriamento, resultando em maiores durezas na ZAC.

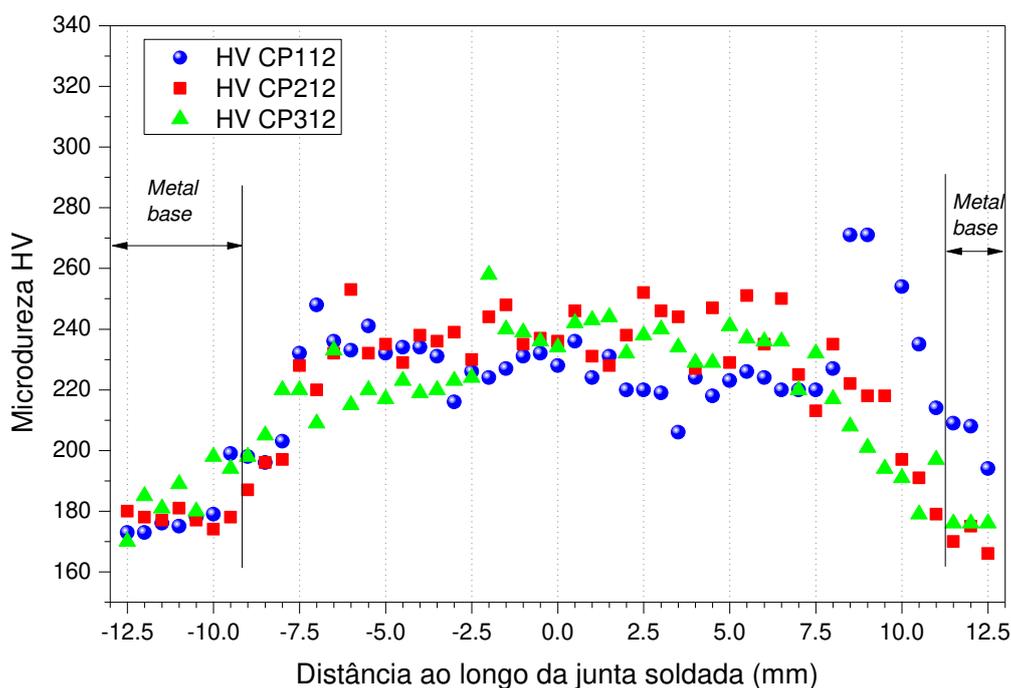


Figura 48 – Evolução da microdureza Vickers associada com os trechos monitorados 1, 2 e 3 para as três condições de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.

A figura 49 mostra os perfis de microdureza do trecho 4, ou seja, da região do cordão formada pela transferência metálica do arame master. Os valores de microdureza da condição 2 (pontos em vermelho) se revelaram, de um modo geral, superiores aos demais tanto na ZAC quanto no metal de solda. Isso pode estar ligado com a estabilidade reportada anteriormente para a condição 2, a qual não apresentou situações anormais de tensão, o que parece refletir no alcance de maior integridade do cordão de solda e continuidade na transferência de energia.

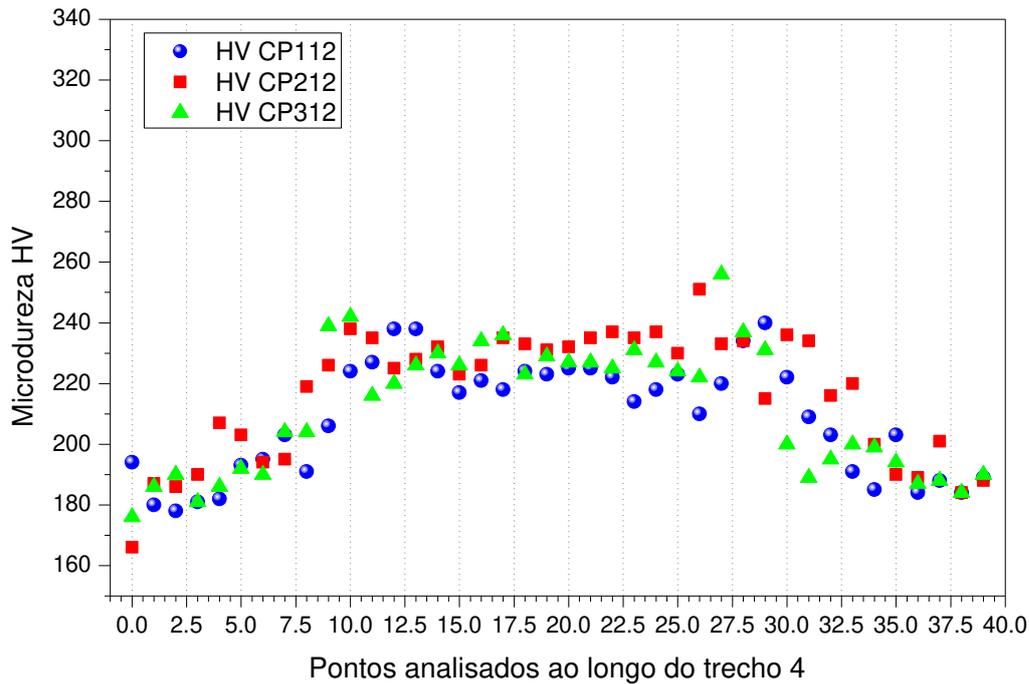


Figura 49 - Evolução da microdureza Vickers associada com o trechos monitorado 4 para as três condições de soldagem tandem do aço estrutural ASTM A572 G50 com metal de adição AWS 5.18 ER70S-6.

5.4 Análise microestrutural

As micrografias ópticas apresentadas foram realizadas com aumentos de 500 x e 1000 x para regiões relativas aos trechos 1 a 3 do perfil de microdureza. A figura 50 apresenta a micrografia do metal de base ASTM A572 G50 composta de ferrita e perlita. Linhas de deformação típicas de chapas laminadas caracterizam as microestruturas com prevalência de ferrita.

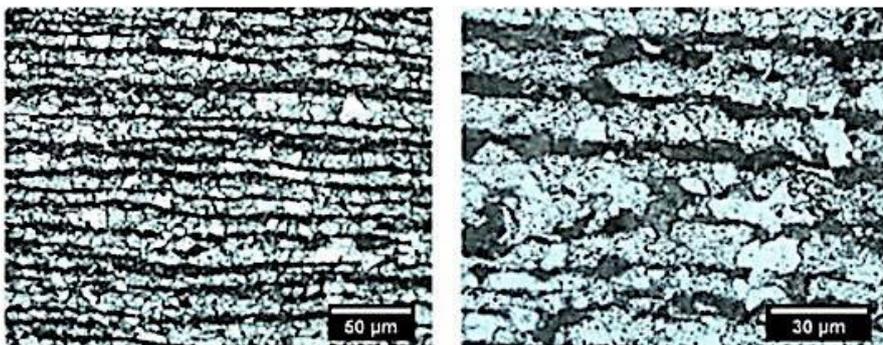


Figura 50 - Micrografia óptica do aço estrutural ASTM A572 G50.

A Figura 51 representa a região do metal de solda, que é uma mistura do volume fundido do metal de base com o metal de adição, apresentando macromorfologia de grãos colunares. Esta região pode apresentar diferentes microestruturas de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados. A evolução da microestrutura colunar apresenta crescimento epitaxial, uma vez que os grãos em solidificação são continuação dos grãos do metal de base na interface fundida [35]. Nas micrografias da figura 51 é possível observar a presença de ferrita na forma acicular alinhada de acordo com o crescimento epitaxial com predomínio da formação de ferrita primária e de agregados ferrita-carbonetos [21]. As condições de soldagem 2 e 3, onde o arco do arame master utilizou corrente contínua, apresentaram estruturas ligeiramente mais grosseiras devido ao maior aporte de calor utilizado.

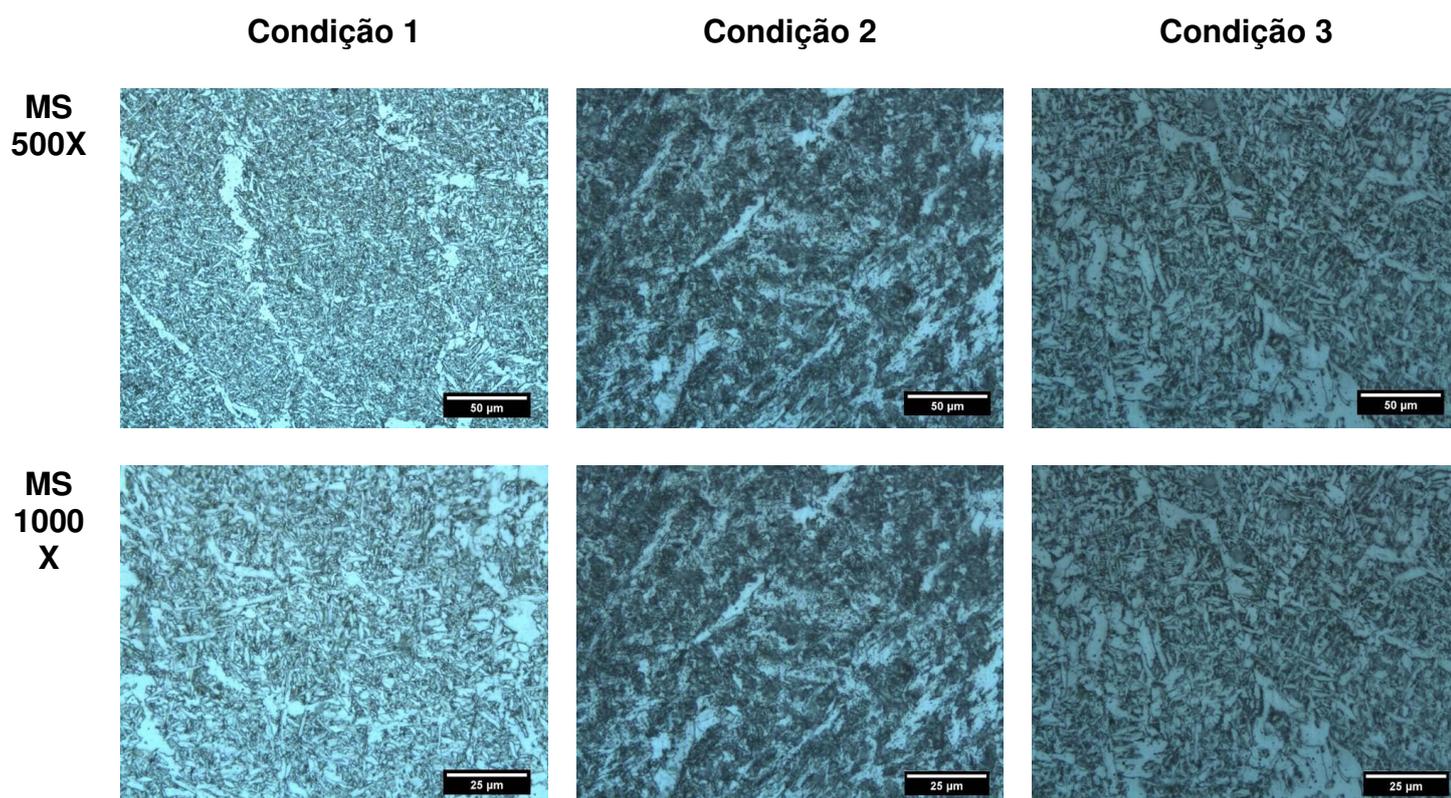


Figura 51 - Imagens de microscopia ótica com aumentos de 500x e 1000x do metal de solda (MS) para as 3 condições de soldagem de aço ASTM A572 G50 com metal de adição ER70S-6.

As figuras 51 e 52 mostram as micrografias das quatro regiões da zona afetada pelo calor de forma comparativa para as condições de soldagem 1, 2 e 3. As regiões intercrítica (IC) e subcrítica (SC) apresentaram a microestrutura do metal de base parcialmente alterada, sendo constituídas majoritariamente de ferrita e perlita.

A microestrutura que caracteriza a condição 1 na região de grãos grosseiros da ZAC (GG) é constituída basicamente por ferrita acicular (FA) bastante refinada contendo alguns poucos grãos de ferrita poligonal (FP). A região equivalente para a condição 3 é formada também por ferrita acicular mais grosseira e algumas estruturas do tipo bainita inferior (BI) contendo partículas de carboneto no interior da ferrita bainítica. Em nenhuma das condições (1, 2 ou 3) fica clara a presença de ferrita de Windmanstätten (FW).

Já no caso da condição 2 no que tange a ZAC – GG, a microestrutura é constituída por uma menor fração de ferrita acicular se comparada com as outras duas condições. Além disso, uma pequena fração de ferrita poligonal (FP) e ilhas de perlita compõem a microestrutura final.

De um modo geral, pode ser inferido que o menor aporte de calor relacionado com a condição 1 (Master:1,02J e Slave:0,97J), além do modo de transferência pulsado-pulsado propiciou taxas de resfriamento superiores resultando em maiores proporções de ferrita acicular (FA). Em contrapartida, as estruturas mais grosseiras encontradas para as condições de soldagem 2 e 3 e a presença de perlita nas microestruturas associadas com a condição 2 indicam resfriamento menos severo nestes casos.

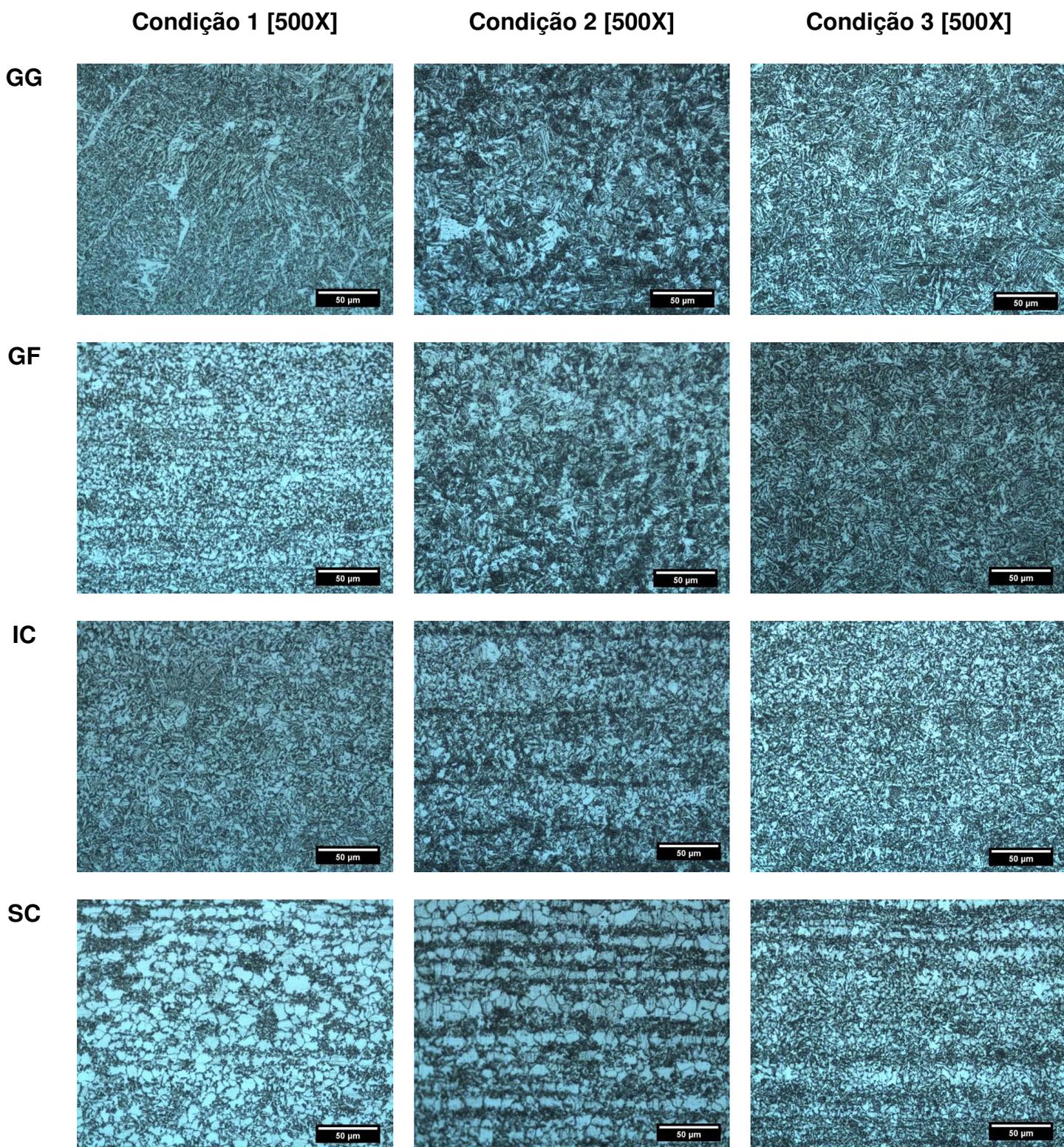


Figura 52 - Microscopia ótica das regiões de grãos grosseiros (GG), grãos finos (GF), intercrítica (IC) e subcrítica (SC) da zona afetada pelo calor (ZAC) com aumento de 500x para as 3 condições de soldagem de aço ASTM A572 G50 com metal de adição ER70S-6.

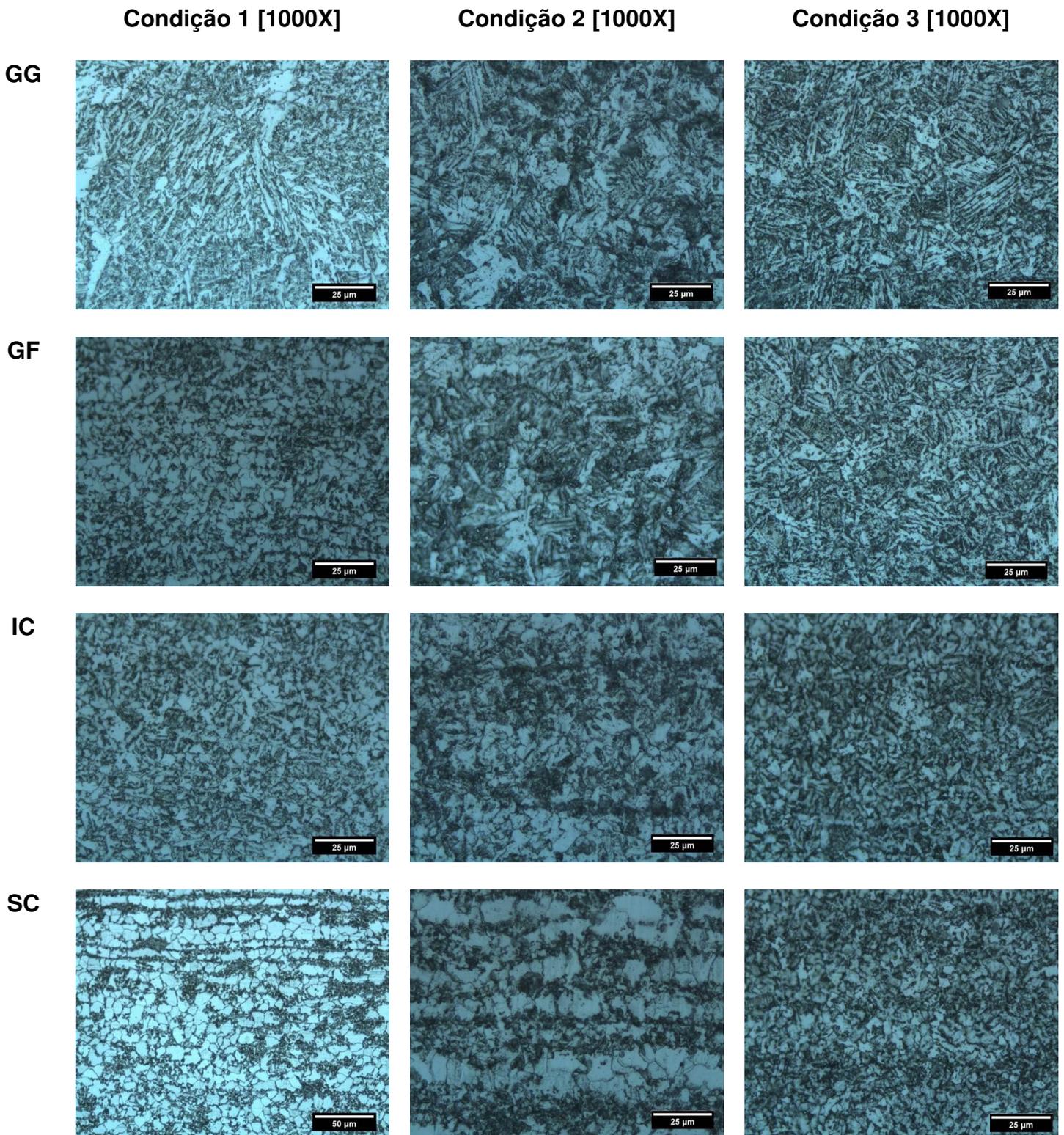


Figura 53 - Microscopia ótica das regiões de grãos grosseiros (GG), grãos finos (GF), intercrítica (IC) e subcrítica (SC) da zona afetada pelo calor (ZAC) com aumento de 1000x para as 3 condições de soldagem de aço ASTM A572 G50 com metal de adição ER70S-6.

6 CONCLUSÕES

A sequência de realização dos ensaios suportou o aumento do conhecimento de soldagem tandem GMAW para o autor deste trabalho. Além do aprendizado de diferentes métodos de ensaio para avaliação de uma junta soldada, entenderam-se quais são os fatores e parâmetros que impactam na qualidade de juntas soldadas por este complexo processo de soldagem.

Os ensaios contidos nesta dissertação permitiram as seguintes conclusões:

- a) A aquisição de dados instantâneos de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame é crucial para entendimento da interação entre os arcos elétricos e consequente qualidade de junta soldada;
- b) A revisão da literatura mostra que curvas sinérgicas costumam apresentar bons resultados quando os arames master e slave estão parametrizados no modo pulsado. A condição 1 estava parametrizada desta forma e apresentou altos níveis de tensões anormais e interrupções de arco. Por se tratar de uma curva sinérgica especial para um arame de bitola não convencional, entende-se que existe a oportunidade de aprimoramento desta curva junto ao fabricante das fontes de soldagem;
- c) A condição 2 de soldagem (modo de transferência contínuo/pulsado, deslocamento de 570mm/min e ângulo de tocha nulo) se mostrou a melhor opção, pois permitiu o aumento da velocidade do processo em 19,3%, sem apresentar ocorrências de tensões anormais e interrupções dos arcos elétricos. Além disso, esta condição de soldagem permitiu valores de dureza em torno de 20-30% menores na ZAC que aqueles encontrados na condição 1 (modo de transferência pulsado/pulsado, deslocamento de 460mm/min e ângulo de tocha nulo). Isso está associado com melhor balanço microestrutural obtido na ZAC para a condição 2 de soldagem, cujas fases de predomínio na zona denominada GG foram ferrita acicular (FA) + ferrita poligonal (FP) + perlita (P).

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como futuros trabalhos, sugere-se o contato com a fabricante de máquinas de solda Fronius para aprimoramento das curvas sinérgicas de soldagem para arames de aço estrutural com diâmetro de 1,32mm. O alto índice de tensões anormais e interrupções dos arcos elétricos quando ambos os arames estão parametrizados com transferência pulsada demonstra oportunidades de melhoria, como alterações em correntes de pico e de base, além da defasagem entre os arcos elétricos.

Ainda com o intuito de aumento de produtividade, sugere-se a realização de ensaios com misturas ternárias de gases contendo gás carbônico, argônio e hélio.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PURSLOW, Marc; MASSEY, Steve; HARRIS, Ian. Using tandem gas metal arc welding to create heavy weldments. *Welding journal*, v. 88, n. 11, p. 34-35, 2009.
2. SHEN, S.; OGUOCHA, I. N. A.; YANNACOPOULOS, S. Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 1, p. 286-294, 2012.
3. KIRAN, D. V. et al. Arc behavior in two wire tandem submerged arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 8, p. 1546-1556, 2014.
4. SHOLOKHOV, M. A.; MELNIKOV, A. U.; FIVEYSKIY, A. M. Influence of Specific Features of Twin Arc Welding on Properties of Weld Joints. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2016. p. 012025.
5. FORTES, Cleber; VAZ, C. T. Soldagem MIG/MAG. Apostila ESAB, São Paulo, 2005.
6. FISCHER, Alexander. Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW-Arco Pulsado. 2011.
7. MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem-fundamentos e tecnologia. Editora Elsevier, 2017.
8. MODENESI, Paulo J. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. Belo Horizonte, 2012.
9. WANG, W.; LIU, S.; JONES, J. E. Flux cored arc welding: arc signals, processing and metal transfer characterization. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, v. 74, n. 11, p. 369s, 1995.
10. ALLUM, C. J. Recent developments in pulsed gas metal arc welding. *Welding for Challenging Environments*, p. 1-10, 1985.
11. NORRISH, John. Advanced welding processes. Elsevier, 2006.
12. ZEEMANN, Annelise. Energia de soldagem. Rio de Janeiro, 2003.

13. MOTTA, M. F. Aplicação do processo MIG/MAG pulsado com duplo arame e potenciais isolados em soldagens de revestimentos. 2002.
14. NORRISH, J. Process control and automation developments in welding. In: 8th Int. Conf. on Trends in Welding Research. ASM. 2009. p. 17-24.
15. WEMAN, Klas. Welding processes handbook. Elsevier, 2011.
16. MOTTA, Marcelo Ferreira; DUTRA, Jair Carlos. Efeitos das variáveis do processo MIG/MAG duplo arame com potenciais isolados nas características geométricas do cordão de solda. Soldagem & Inspeção, v. 10, n. 1, p. 22-30, 2005.
17. DOTY, W. D. Weldability of Constructional Steel – USA Viewpoint. Supplement to the welding journal, 1971.
18. BARBARO, F. J. et al. Towards improved steel alloy designs for control of weld heat affected zone properties. 2013.
19. SILVA, Andre Luiz da Costa E.; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. Edgard Blücher, 2008.
20. ASTM, A572/A 572M-04. Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, 2005.
21. JORGE, JCF, SOUZA LFG, MAROUÇO, ES, SANTOS FILHO, OR, DINIZ, JLC. Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas pelo Processo a Arco Submerso com Elevado Aporte Térmico, Soldagem & Inspeção, v. 20, n. 3, p. 347-358. 2015.
22. STALHEIM, Douglas G.; MURALIDHARAN, Govindarajan. The role of continuous cooling transformation diagrams in material design for high strength oil and gas transmission pipeline steels. In: 2006 International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2006. p. 231-238.
23. AMARAL, Thiago de Souza et al. Atlas microestrutural para otimização de procedimentos de soldagem. 2016.
24. WU, Kaiyuan et al. Double arc interference and dynamic behavior characteristics of double wire double-pulsed GMAW. The International

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 95, n. 1-4, p. 991-1002, 2018.
25. CHEN, Dongsheng; CHEN, Maoai; WU, Chuansong. Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 225, p. 45-55, 2015.
 26. UEYAMA, T. et al. Occurrence of arc interaction in tandem pulsed gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 12, n. 6, p. 523-529, 2007.
 27. WU, Kaiyuan et al. The dynamic behavior of double arc interference in high-power double wire pulsed GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 88, n. 9-12, p. 2795-2802, 2017.
 28. UEYAMA, T. et al. Solution to problems of arc interruption and arc length control in tandem pulsed gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 14, n. 4, p. 305-314, 2009.
 29. REIS, Ruham Pablo et al. Investigation on welding arc interruptions in the presence of magnetic fields: welding current influence. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 40, n. 3, p. 870-876, 2012.
 30. UEYAMA, T. et al. Effects of torch configuration and welding current on weld bead formation in high speed tandem pulsed gas metal arc welding of steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 10, n. 6, p. 750-759, 2005.
 31. FERSINI, V.; MATERA, S. The synchronized tandem wire welding process applied to the welding of structural plates. *Welding International*, v. 23, n. 8, p. 597-605, 2009.
 32. PORTER, David A.; EASTERLING, Kenneth E.; SHERIF, Mohamed. *Phase Transformations in Metals and Alloys, (Revised Reprint)*. CRC press, 2009.
 33. ISO, E. N. 9015-1: 2011 Destructive tests on welds in metallic materials- Hardness testing-Part 1: Hardness test on arc welded joints. Google Scholar.
 34. ISO, E. N. 9015-2. Destructive Tests on Welds in Metallic Materials— Hardness Test: Part 2—Micro Hardness Testing on Welded Joints, 2011.

- 35.**CAI, Xiaoyu et al. Effects of shielding gas composition on arc behaviors and weld formation in narrow gap tandem GMAW. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 91, n. 9-12, p. 3449-3456, 2017.
- 36.**IX, ASME Sec. Qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures. ASME Int, v. 9, p. 1-24, 2015.