



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Cláudio Marques Schaeffer

**PROCESSO MIG/MAG DE ALTA PERFORMANCE: EXPLORAÇÃO FUNCIONAL E
PROSPECÇÃO DE APLICAÇÕES**

Florianópolis 2026

Cláudio Marques Schaeffer

**PROCESSO MIG/MAG DE ALTA PERFORMANCE: EXPLORAÇÃO FUNCIONAL E
PROSPECÇÃO DE APLICAÇÕES**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

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

Coorientador: Prof. Mateus Barancelli Schwedersky,
Dr. Eng.

Florianópolis

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Schaeffer, Cláudio Marques
PROCESSO MIG/MAG DE ALTA PERFORMANCE: EXPLORAÇÃO
FUNCIONAL E PROSPECÇÃO DE APLICAÇÕES / Cláudio Marques
Schaeffer ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva,
coorientador, Mateus Barancelli Schwedersky, 2026.
205 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem MIG/MAG de alta
performance. 3. Alta Potência. 4. DynaFlex-Arc. 5. Efeito
Indutivo. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves e. II.
Schwedersky, Mateus Barancelli. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Cláudio Marques Schaeffer

**PROCESSO MIG/MAG DE ALTA PERFORMANCE: EXPLORAÇÃO FUNCIONAL E
PROSPECÇÃO DE APLICAÇÕES**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 20 de fevereiro de 2026, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez, Dr. Eng.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Sr. Giovanni Dal Piaz, Dr. Eng.
Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

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

Florianópolis, 2026.

Dedico esta tese em honra ao legado de meus
antepassados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder mais este dia de vida;

À minha esposa, Cheila Mara F. Schaeffer, pelo seu amor, incentivo e apoio ao longo de toda esta jornada. Você é o meu universo, você é tudo pra mim;

Ao meu orientador, professor Dr. Régis Henrique G. e Silva, exemplo a ser seguido como docente e pesquisador, pelos seus conhecimentos compartilhados, pela autonomia concedida em meu trabalho e, principalmente, pela confiança em minhas decisões. Foi uma honra e um privilégio;

Ao meu coorientador, professor Dr. Mateus B. Schwedersky, pelos seus conselhos;

Ao professor Dr. Jair C. Dutra, por ser um pilar junto à fundação do LABSOLDA;

Ao professor Dr. Nelso G. Bonacorso, por pavimentar o meu caminho ao doutorado;

Ao professor Dr. Luís Edson Saraiva, pelo incentivo em ingressar no POSMEC;

Ao senhor Cleber Guedes, que hoje eu tenho a honra e a felicidade de chamar de amigo, por estar ao meu lado, incansavelmente, ao longo de toda esta empreitada;

Ao IFSC, por disponibilizar o tempo necessário para a realização deste doutorado;

À UFSC, por ser um farol àqueles que ousam avançar na fronteira do conhecimento;

À Petrobras, pela expertise da equipe e pelos investimentos na pesquisa brasileira;

À IMC, na figura do Dr. Raul Gohr Júnior, por toda a base tecnológica e conhecimentos disponibilizados;

À SPS, na figura do Dr. Cleber Marques, pelas contribuições ao LABSOLDA;

À TODA a equipe do LABSOLDA, pelo dinamismo do trabalho diário;

Aos amigos:

Alex Sandro Pereira, em consideração à época do mestrado;

Anderson Borges, pela parceria e pelas discussões sobre a física do arco elétrico;

Daniel Galeazzi, por resgatar o surfe em meu coração;

Duván Quintana, pelos cafés colombianos, mas, principalmente, pela motivação para seguir em frente neste doutorado;

Gabriel Madruga, pelas conversas sobre indutância;

Compadre Gianpaulo de Medeiros, pela confiança e pela energia positiva que sempre faz parte de nossa amizade;

Manoel Dutra, por iluminar meu caminho no surfe;

Ricardo Muhl, pela amizade desde os tempos da graduação, lá se vão uns 30 anos;

Tiago Marchione, pela parceria e a boa vontade em sempre ajudar o próximo;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste doutorado. Vocês fizeram a diferença em minha vida.

Obrigado.

*E amigos, naquele instante
Me amaldiçoei em segredo
Das vezes que tive medo
De algo insignificante,
Ao ver ali, impressionante
Aquele galo ferido,
No próprio sangue esvaído,
Torto, quase cego até,
Disposto a morrer de pé
Pra não se dar por vencido!*

Jayme Guilherme Caetano Braun

RESUMO

Diferente do MIG/MAG convencional, as variantes MIG/MAG de alta performance (MIG/MAG AP) conseguem operar com melhor controle sobre a transferência metálica e, conseqüentemente, com maiores taxas de deposição, graças a determinadas características de suas fontes, tanto de *hardware* quanto de *software*. Dentre as famílias de variantes de alta performance classificadas pela *Deutscher Verband für Schweißen (DVS)*, encontra-se a família denominada “Arco Modificado”, na qual o *DynaFlex-Arc* se enquadra. Este processo, que funciona em modo de tensão, está fundamentado no controle do conjunto constituído pelo arco elétrico, transferência metálica e poça de fusão, via controle dos efeitos indutivos atuantes sobre as taxas das variações de corrente (di/dt), tanto de subida quanto de descida, e de forma independente sobre cada uma delas. Este controle permite que o *DynaFlex-Arc* opere em um modo de transferência em *spray* em *streaming*, sendo esta a sua principal característica, e em uma condição de *buried arc*, viabilizando, assim, a soldagem de juntas espessas. Além disso, estudos realizados para esta tese, demonstraram que este controle também viabiliza sua aplicação em soldagens de revestimento. Devido a esta controlabilidade, este processo representa uma opção para a aplicação em determinadas condições da indústria de petróleo e gás, como, por exemplo, na soldagem manual ou mecanizada de reparos em dutos em operação. Este tipo de manutenção pode ser demandada, principalmente, por fatores como erosão, corrosão e vibração. Além destes, também há a ameaça de danos causados pelas práticas de furto de combustíveis, realizadas através de operações criminosas de *hot tapping* em dutovias. Conseqüentemente, estas condições provocam riscos de vazamento, que podem causar prejuízos ao meio ambiente e às comunidades próximas. Neste contexto, esta tese objetiva caracterizar o *DynaFlex-Arc*, principalmente, frente às seguintes questões, tanto do ponto de vista científico quanto de engenharia: caracterizar e refinar a atuação do efeito indutivo sobre a estabilidade da transferência metálica; e desenvolver parâmetros para aplicações fora de posição, com alvo na soldagem orbital, com vistas à instalação de abraçadeiras em tubos API 5L. Neste alinhamento, experimentos realizados em chapas espessas de aço SAE 1020 com arame ER70S-6 de 1,2 mm, resultaram em operações com velocidade de soldagem (V_s) de 60 cm/min e velocidade de alimentação de arame (V_a) de 15 m/min, os quais demonstraram a viabilidade de combinações de di/dt de subida na faixa de 70,0 A/ms, associados a di/dt de descida em torno de 0,8 A/ms, inclusive em situações fora de posição. Finalmente, com base na análise da evolução dos ensaios e nos resultados encontrados, foi possível realizar soldagens orbitais em junta sobreposta de filete com V_s de 60 cm/min e V_a de 10 m/min, com potenciais aplicações em dutos em operação. Além disso, esta tese representa uma contribuição relevante para o entendimento dos fenômenos envolvidos entre a indutância e a transferência metálica na soldagem.

Palavras-chave: GMAW; *DynaFlex-Arc*; Alta potência; *Spray streaming*; Indutância; Efeito indutivo; produtividade.

ABSTRACT

Unlike conventional MIG/MAG, high-performance MIG/MAG variants (HP MIG/MAG) are capable of operating with improved control over metal transfer and, consequently, with higher deposition rates, due to specific characteristics of the power sources, encompassing both hardware and software aspects. Among the families of high-performance variants classified by the *Deutscher Verband für Schweißen* (DVS), there is the so-called “Modified Arc” family, within which the DynaFlex-Arc is categorized. This process, which operates in voltage mode, is based on the control of the system composed of the electric arc, metal transfer, and weld pool, through the regulation of inductive effects acting on the rates of current variation (di/dt), both in the rising and falling phases, and independently for each of them. This control enables the DynaFlex-Arc to operate in a streaming spray transfer mode — the main characteristic of this process — and under a buried arc condition, thus promoting the welding of thick joints. Furthermore, studies conducted for this thesis have demonstrated that such control also enables its application in cladding operations. Due to this level of controllability, this process represents a viable option for application under certain conditions in the oil and gas industry, such as manual or mechanized welding for permanent repairs in in-service pipelines. This type of maintenance may be required primarily due to factors such as erosion, corrosion, and vibration. In addition, there is also the risk of damage caused by fuel theft practices, carried out through criminal hot tapping operations in pipelines. Consequently, this leakage risk condition may result in environmental damage and harm to nearby communities. In this context, this thesis aims to characterize the DynaFlex-Arc, particularly with regard to the following aspects, from both a scientific and engineering perspectives: (i) to characterize and refine the influence of the inductive effect on the stability of metal transfer; and (ii) to develop parameters for out-of-position applications, targeting orbital welding for the installation of clamps on API 5L pipes. Within this framework, experiments performed on thick SAE 1020 steel plates using 1.2 mm ER70S-6 wire resulted in welding operations with welding speed (W_s) of 60 cm/min and wire feed rate (Fr) of 15 m/min, which demonstrated the feasibility of combinations involving rising di/dt values around 70.0 A/ms, associated with falling di/dt values of approximately 0.8 A/ms, even in out-of-position situations. Finally, based on the analysis of the experimental evolution and results obtained, it was possible to perform orbital fillet welds on lap joints with W_s of 60 cm/min and Fr of 10 m/min, indicating potential applications for in-service pipelines. Additionally, this thesis represents a relevant contribution to the understanding of the phenomena involved between inductance and metal transfer in welding.

Keywords: GMAW; DynaFlex-Arc; High power; Spray streaming; inductance; Inductive effect; Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva característica de uma fonte estática de tensão constante [15].	28
Figura 2 - Força eletromagnética em repulsão [18]. Em a) Maior pressão na gota na região de acoplamento com o arco; b) Desvio de direção da gota; c) Imagem real do fenômeno.	34
Figura 3 - Força eletromagnética favorável ao destacamento da gota. [17]. Em a) Atuação da força resultante; b) Resultado do efeito <i>Pinch</i> ; c) Imagem real do fenômeno.....	34
Figura 4 - Modos naturais de transferência metálica [19].....	35
Figura 5 - Diagrama representando um circuito fechado (em curto) [41].....	36
Figura 6 - Frame -00199, DynaFlex-Arc, arco aberto com queda de tensão. Fonte: O autor. Videografia disponível em: < https://www.youtube.com/watch?v=3EmkVwGfLIA >	37
Figura 7 - Transferência metálica em curto-circuito em MIG/MAG convencional, estável.	38
Figura 8 - Situação em que a gota foi repelida do encontro com a poça de fusão, mesmo após o contato da ponta fundida do arame (<i>frames f e g</i>) [47].	40
Figura 9 - Curto circuito incipiente durante uma transferência em <i>spray</i> em <i>streaming</i> [19].	41
Figura 10 - Relação de penetração em relação à velocidade de soldagem [19].	43
Figura 11 - Resultados com o processo GCCV.....	45
Figura 12 - Resultados com o processo GRHF.....	45
Figura 13 – Experimento com fonte tiristorizada. Fonte: O autor. Em a) Fonte CLOOS; b) Soldagem em condição de buried arc [45]. Filmagem disponível em: https://youtu.be/3kJlyAdYBYY	46
Figura 14 - Gráfico destacando nas linhas em vermelho a ampliação das faixas de operação promovidas pelas variantes de alta performance do processo MIG/MAG [5].	47
Figura 15 - Comparação entre oscilogramas de convencional e CMT [22].	51
Figura 16 - Características do <i>RapidArc</i> [59, 60].	51
Figura 17 - Comparação entre o MIG/MAG pulsado e o <i>RapidArc</i> [61].	52

Figura 18 - Evolução de uma transferência metálica com o <i>RapidArc</i> [62].	52
Figura 19 - Soldas feitas com o <i>RapidArc</i> [60].	53
Figura 20 - Atuação do <i>RapidArc</i> [7].	53
Figura 21 - Forma de onda de corrente modelada e seus efeitos [64].	54
Figura 22 - Oscilograma esquemático do CCC [66].	55
Figura 23 - Resultados dos experimentos obtidos por Filho et al. [67].	55
Figura 24 - Resultados dos experimentos realizados por Dutra [35].	56
Figura 25 –Transição entre o Arco Pulsado e o <i>Spray Arc</i> no processo <i>PCS</i> [73].	58
Figura 26 - Exemplo de oscilograma de uma soldagem com o <i>PCS</i> [75].	59
Figura 27 - Diferenças entre os modos pulsado e <i>PCS</i> [72].	59
Figura 28 - Perfil das soldas realizadas [74].	60
Figura 29 - Características do processo <i>SpeedArc</i> [76, 79].	60
Figura 30 - Oscilograma de soldagem realizada com o <i>SpeedArc XT</i> [80].	61
Figura 31 - Principais resultados dos experimentos realizados por Wu et al [80].	61
Figura 32 – Em a) Região de atuação do <i>ForceArc</i> em comparação com demais processos [86]; b) Atuação em <i>buried arc</i> [65].	62
Figura 33 - Comparação entre o <i>Spray</i> convencional e o <i>ForceArc</i> [81].	63
Figura 34 - Transferência metálica do <i>ForceArc</i> [84].	63
Figura 35 - Comparação de soldas em junta de filete T [81, 87],(adaptado).	64
Figura 36 – <i>DynaFlex-Arc</i> . Fonte: O autor. Em a) <i>Buried arc</i> com $U = 30 \text{ V}$, $I = 430 \text{ A}$, $V_a = 15 \text{ m/min}$ e $V_s = 170 \text{ cm/min}$; b) Revestimento com $U = 32 \text{ V}$, $I = 270 \text{ A}$, $V_a = 13,5 \text{ m/min}$ e $V_s = 60 \text{ cm/min}$	65
Figura 37 - Exemplos de soldas realizadas com o <i>DynaFlex-Arc</i> : Em a) Depósito sobre chapa [7]; b) Solda de topo em chanfro V [8]; c) Junta de filete em "T" [9].	66
Figura 38 - Estudo do efeito de diferentes gases no processo [7]. Em a) Efeito na transferência metálica em uma junta de filete com velocidade de alimentação de 15 m/min ; b) Resultado dos oscilogramas.	67
Figura 39 - <i>Frames</i> de uma filmagem em alta velocidade. Fonte: O autor. Em a) Arco atuando abaixo da superfície da peça; b) O equilíbrio metaestável da poça de fusão do <i>DynaFlex-Arc</i> . Filmagem disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=maRSxr2fHn8	68

Figura 40 - Atuação do arco [8]. Em a) MIG/MAG convencional; b) <i>DynaFlex-Arc</i>	68
Figura 41 - Esquema do balanço de forças na formação do <i>Keyhole</i> [91].	69
Figura 42 - Influência da DBCP sobre a transferência metálica [92].	69
Figura 43 - Oscilogramas mostrando o comportamento causado por diferentes valores de K_s e K_d [88]. EM a) $K_s = 25$ e $K_d = 100$; b) $K_s = 100$ e $K_d = 100$; c) $K_s = 100$ e $K_d = 1$	72
Figura 44 - Soldagem com a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 100$ [88]. Vídeo disponível em:	72
Figura 45 – Soldagem com a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 1$ [85]. Vídeo disponível em:	73
Figura 46 - Comportamento da poça considerando dl/dt de descida abrupta.	74
Figura 47 - Comportamento da poça considerando dl/dt de descida suave.	74
Figura 48 - Esquema do oscilograma ideal do <i>STT</i> [100].....	75
Figura 49 - Exemplo de análise de ciclogramas em função da variação de área. [54].	76
Figura 50 - Exemplo de ciclograma em função da repetibilidade de ciclos [102].	76
Figura 51 - Esquema de geometria de cordão de solda para fins de cálculo de diluição [109].	79
Figura 52 - Exemplos de processos de soldagem de revestimento [109].	80
Figura 53 - Ilustração de como são extraídos os dados dos ciclogramas [103].	83
Figura 54 - Situação que o limiar do SAP não extrai a realidade de dados. Fonte: O autor	84
Figura 55 - Bancada utilizada para a realização dos ensaios na horizontal. Fonte: O autor	89
Figura 56 - Orientação da tocha, experimentos na horizontal. Fonte: O autor.	90
Figura 57 - Bancada de testes para os experimentos na sobrecabeça. Fonte: O autor	91
Figura 58 - Macrografia da secção transversal da solda realizada na sobrecabeça sem penetração total. Fonte: O autor.....	92

Figura 59 - Soldas realizadas na sobrecabeça com escorrimento. Fonte: O autor.....	92
Figura 60 - Orientação da tocha, experimentos na sobrecabeça. Fonte: O autor.	92
Figura 61 - Fonte CLOOS utilizada nos experimentos.....	94
Figura 62 - Gráfico Potência x Velocidade de Soldagem [119].	95
Figura 63 – Exemplo de solda circunferencial para a realização de reparo de abraçadeira sobre duto, com potencial para a utilização do <i>DynaFlex-Arc</i> . Fonte: O autor.....	98
Figura 64 – <i>Setup</i> de laboratório. Fonte: o Autor. Em a) Bancada experimental; b) Detalhe do Tartilope e junta soldada.	99
Figura 65 - Representação da sequência de soldagem. Fonte: O autor	99
Figura 66 - Posição relativa da tocha em relação à junta. Fonte: O autor.....	100
Figura 67 - Posição das soldagens realizadas [4] (adaptado). Em a) Setores do corpo de prova; b) Posições das macrografias.	100
Figura 68 - Tamanho da perna da solda de filete (PCC-2) [120].....	102
Figura 69 - Tamanho da perna da solda de filete, calha maior que 1,4 (PCC-2) [120]	102
Figura 70 - Garganta teórica mínima para solda de filete (ASME B31-3) [124].	103
Figura 71 - Critério para medição da convexidade da solda de filete (ISO 5817) [122].	103
Figura 72 - Posição dos termopares. Fonte: O autor. Em a) Posição T1, no interior do tubo alinhado com T2, na calha; b) Imagem da fixação do termopar T2, na bordada calha; c) Ponto T2 de aquisição da câmera térmica durante a soldagem.	104
Figura 73 - Exemplo de análise de oscilograma para evidenciar as diferentes formas de medir os valores de dl/dt . Fonte O autor.....	105
Figura 74 - Esquema do <i>layout</i> da bancada. Fonte: O autor.....	107
Figura 75 - Representação da vista lateral com os pontos de medição da composição química no corpo de prova. Fonte: O autor	108
Figura 76 - Efeito indutivo em uma combinação de $K_s = 1$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor. O vídeo pode ser acessado em: https://youtu.be/4OaoTFEAzdk	110
Figura 77 - Oscilogramas. Fonte: O autor. Em a) $K_s = 1$ e $K_d = 100$; b) $K_s = 1$ e $K_d = 200$	112

Figura 78 - Oscilograma resultado de uma combinação $K_s = 100$ e $K_d = 100$. Fonte: O autor	113
Figura 79 – Gráfico da corrente média de $K_s = 100$ e $K_d = 100$. Fonte: O autor.	113
Figura 80 – Oscilogramas detalhados. Fonte: O autor. Em a) $K_s = 100$ e $K_d = 100$; b) $K_s = 200$ e $K_d = 200$	114
Figura 81 - Pico de corrente com uma combinação de $K_s = 100$ e $K_d = 100$. Fonte: O autor	115
Figura 82 – Períodos em que os oscilogramas registraram os maiores picos de corrente para as combinações de $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor	117
Figura 83 – Gráficos de variação de corrente para as combinações de $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.	119
Figura 84 - Histogramas de picos de corrente, valores de média e desvio padrão resultado das combinações de $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.....	120
Figura 85 - Oscilogramas de tensão, $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor	121
Figura 86 - Histogramas de picos de tensão, valores de média e desvio padrão dos períodos analisados para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.	122
Figura 87 - Ciclogramas de Corrente x Tensão dos períodos aquisitados para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.....	123
Figura 88 - Efeito indutivo em uma combinação de $K_s = 100$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor	124
Figura 89 - Efeito indutivo em uma combinação de $K_s = 200$ e $K_d = 1$	125
Figura 90 – Solda feita com o <i>Dynaflex-Arc</i> com a combinação $K_s = 1$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.....	126
Figura 91 - Soldas realizadas com o <i>Dynaflex-Arc</i> . Fonte: O autor. Em a) $K_s = 100$ e $K_d = 1$; b) $K_s = 200$ e $K_d = 1$	126
Figura 92 – Oscilogramas de tensão e corrente para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 100$ e $K_d = 20$ dos períodos aquisitados. Fonte: O autor.....	127
Figura 93 - Histogramas de Picos de Corrente para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 100$ e $K_d = 20$. Fonte: O autor	128

Figura 94 - Histogramas de Picos de Tensão para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 100$ e $K_d = 20$. Fonte: O autor.	128
Figura 95 - Ciclogramas para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 100$ e $K_d = 20$. Fonte: O autor	128
Figura 96 – Oscilogramas de tensão e corrente para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 60$ cm/s.....	130
Figura 97 – Histogramas de picos de corrente para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_c = 60$ cm/s e $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.....	131
Figura 98 – Histogramas de picos de tensão para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_c = 60$ cm/s e $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.....	131
Figura 99 – Ciclogramas de corrente e tensão para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_c = 60$ cm/s e $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.....	132
Figura 100 - Frames de filmagem de alta velocidade do processo <i>DynaFlex-Arc</i> com $V_s = 60$ cm/s. Fonte: O autor.....	132
Figura 101 - Frames de filmagem de alta velocidade do processo <i>DynaFlex-Arc</i> com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor	133
Figura 102 – Aspecto superficial do cordão e macrografia da solda realizada com $V_s = 60$ cm/s.....	133
Figura 103 - Aspecto superficial do cordão e macrografia da solda realizada com $V_s = 75$ cm/s.	134
Figura 104 – Oscilogramas de tensão e corrente da soldagem sobrecabeça.	136
Figura 105 - Histogramas de picos de corrente e de tensão para soldagem sobrecabeça. Fonte: O autor	137
Figura 106 - Oscilograma Corrente x Tensão para a soldagem sobrecabeça.	137
Figura 107 - <i>Frames</i> da filmagem em alta velocidade da soldagem sobrecabeça.	138
Figura 108 – Aspecto superficial da solda na sobrecabeça. Fonte: O autor.	139
Figura 109 – Macro da secção transversal da solda na sobrecabeça. Fonte: O autor	139
Figura 110 – Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão A1. Fonte: O autor	142

Figura 111 - Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão A2. Fonte: O autor	142
Figura 112 - Histogramas de picos de tensão e corrente, ensaios A1 e A2. Fonte: O autor	143
Figura 113 - Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão B1. Fonte: O autor	144
Figura 114 - Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão B2. Fonte: O autor	144
Figura 115 Histogramas de picos de tensão e corrente, ensaios B1 e B2. Fonte: O autor.....	145
Figura 116 - Ciclogramas de tensão e corrente, ensaios A1, A2, B1 e B2. Fonte: O autor.....	146
Figura 117 – Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem A1. Fonte: O autor. Filmagens em: https://youtu.be/3EmkVwGfLIA?si=GUNlzSm4WmCqEz8m	147
Figura 118 - <i>Frames</i> dos pontos de maior instabilidade na soldagem A1. Fonte: O autor.	148
Figura 119 – Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem A2. Fonte: O autor.....	149
Figura 120 - <i>Frames</i> dos pontos de maior instabilidade na soldagem A2. Fonte: O autor.	150
Figura 121 - Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem B1. Fonte: O autor. Filmagens em: https://youtu.be/hXs0LI5nAnU?si=QGTXIgmDkExknSc7	151
Figura 122 - <i>Frames</i> dos pontos F19, 20 e 21 da soldagem B1. Fonte: O autor.	152
Figura 123 - <i>Frames</i> dos pontos F22, 23 e 24 da soldagem B1. Fonte: O autor.	153
Figura 124 - <i>Frames</i> dos pontos F25, 26 e 27 da soldagem B1. Fonte: O autor.	154
Figura 125 - Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem B2. Fonte: O autor. Filmagens em: https://www.youtube.com/watch?v=uB4qP4leWLY	155
Figura 126 - <i>Frames</i> dos pontos F28, 29 e 30 da soldagem B2. Fonte: O autor.	156

Figura 127 - <i>Frames</i> dos pontos F31, 32 e 33 da soldagem B2. Fonte: O autor.	156
Figura 128 - <i>Frames</i> dos pontos F34, 35 e 36 da soldagem B2. Fonte: O autor.	157
Figura 129 - Oscilogramas com as variações de tensão e corrente dos principais ensaios. Fonte: O autor	160
Figura 130 - Filmagem em alta velocidade do MIG/MAG convencional e do <i>DynaFlex-Arc</i> e seus respectivos oscilogramas de corrente (vermelho) e tensão (azul). Fonte: O autor. Em a) e b) Velocidade de soldagem de 0,6 m/min; c) Formação de <i>humping</i> com o MIG/MAG convencional com velocidade de soldagem de 2,5 m/min; d) Formação de <i>humping</i> com o <i>DynaFlex-Arc</i> com velocidade de soldagem de 1,7 m/min.	162
Figura 131 - Quadros de filmagem em alta velocidade para diferentes estágios de solidificação de uma protuberância (<i>hump</i>). Fonte: O autor. Em a) Logo após a extinção do arco; b) Metal líquido acumulado no cordão (centro da imagem); c) <i>Hump</i> formado/solidificado.	162
Figura 132 - Macrografias. Fonte: O autor. Em a) Cordão de solda C1, $V_c = 0,6$ m/min; b) Cordão de solda C20, $V_s = 2,5$ m/min.	163
Figura 133 - Macrografias. Fonte: O autor. Em a) Cordão de solda D1, $V_c = 0,6$ m/min; b) Cordão de solda D12, $V_c = 1,7$	164
Figura 134 - Filmagem térmica. Fonte: O autor. Em a) MIG/MAG convencional; b) <i>DynaFlex-Arc</i>	165
Figura 135 - Oscilograma do <i>DynaFlex-Arc</i> com 1 passe manual. Fonte: O autor	167
Figura 136 - Oscilograma do <i>DynaFlex-Arc</i> com 1 passe mecanizada. Fonte: O autor	167
Figura 137 - Oscilograma do <i>DynaFlex-Arc</i> , 1º de 3 passes manual. Fonte: O autor	169
Figura 138 - Oscilograma do <i>DynaFlex-Arc</i> , 1º de 3 passes mecanizada. Fonte: O autor.	169
Figura 139 - Posições dos setores e das macrografias extraídas. Fonte: O autor	170

Figura 140 - Sobreposição gráfica dos ciclos térmicos com o <i>DynaFlex-Arc</i> , soldagem do 1º grupo de ensaios, com um único passe, mecanizada, $K_s = 100 = K_d = 1$ e DBCP = 14 mm. Fonte: O autor.....	174
Figura 141 – Oscilograma do processo MIG/MAG globular.....	175
Figura 142 - Oscilograma do processo MIG/MAG <i>spray</i>	176
Figura 143 - Oscilograma do processo <i>DynaFlex-Arc</i>	177
Figura 144 - Diferenças de aplicação do <i>DynaFlex-Arc</i> . Fonte: O autor. Em a) Aplicado em alta penetração, com formação de cratera; b) Aplicado em revestimento, sem formação de cratera.	178
Figura 145 - Aspecto superficial do revestimento feito com o MIG/MAG em <i>spray</i> . Fonte: O autor.....	179
Figura 146 - Aspecto superficial do revestimento feito com o <i>DynaFlex-Arc</i> . Fonte: O autor	179
Figura 147 - Macrografias referentes à secção A-A (MIG/MAG, <i>spray</i>). Fonte: O autor	180
Figura 148 - Macrografias referentes à secção B-B (<i>DynaFlex-Arc</i>). Fonte: O autor	180
Figura 149 - Comportamento da curva do gráfico das Equações L_s e L_d	203
Figura 150 - Diagrama elétrico com controle de indutância via IGBT. [41]....	203
Figura 151 - Gráfico efeitos na corrente causados por L_s e L_d [7].	204
Figura 152 - Poster de variantes do processo MIG/MAG HP [5].....	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de ensaios com os parâmetros utilizados. Fonte: O autor.	86
Tabela 2 - Matriz de ensaios com os principais parâmetros. Fonte: O autor.	90
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem regulados utilizados nos ensaios comparativos entre o DynaFlex-Arc e o MIG/MAG convencional. Fonte: O autor.....	94
Tabela 4- Principais parâmetros de soldagem. Fonte: O autor	97
Tabela 5 - Composição química dos materiais de base e de adição [3].	98
Tabela 6 - Parâmetros utilizados nos experimentos na junta circular de filete. Fonte: O autor	101
Tabela 7 - Parâmetros de soldagem utilizados. Fonte: O autor.....	107
Tabela 8 - Combinações de Ks e Kd utilizadas. Fonte: O autor	109
Tabela 9 – Aquisições. Fonte: O autor.....	111
Tabela 10 – Aquisições. Fonte: O autor	112
Tabela 11 – Aquisições. Fonte: O autor.....	115
Tabela 12 – Combinações Ks = 100 e Kd = 1 e Ks = 200 e Kd = 1. Fonte: O autor	118
Tabela 13 - Parâmetros aquisitados, resultados da combinação Ks 100 e Kd = 1 e Ks 100 e Kd = 20. Fonte: O autor	127
Tabela 14 - Matriz de ensaios com os principais parâmetros. Fonte: O autor.	129
Tabela 15 - Parâmetros aquisitados, resultados para Ks 300, Kd = 30 com 60 cm/s e Ks = 300 e Kd = 30 com Vs = 75 cm/s. Fonte: O autor	130
Tabela 16 - Parâmetros aquisitados, resultados da soldagem sobrecabeça. Fonte: O autor	136
Tabela 17 - Matriz dos ensaios realizados. Fonte: O autor	141
Tabela 18 - Cordões e macros das soldas realizadas. Fonte: O autor	158
Tabela 19 - Medições das geometrias das soldas A1, A2, B1 e B2. Fonte: O autor	158
Tabela 20 - Parâmetros aquisitados das amostras mais relevantes: convencional (amostras C), DynaFlex (amostras D). Fonte: O autor	159
Tabela 21 - Parâmetros dos experimentos da soldagem circular de filete. Fonte: O autor.	166

Tabela 22 - Parâmetros adquiridos, primeiro grupo de testes. Fonte: O autor.	168
Tabela 23 - Parâmetros adquiridos, segundo grupo de testes. Fonte: O autor.	170
Tabela 24 - Soldas com 1 passes, $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e DBCP = 14 mm. Fonte: O autor.....	171
Tabela 25 - Soldas com 3 passes, $K_s = 100$ e $K_d = 5$ e DBCP = 17 mm. Fonte: O autor.....	172
Tabela 26 - Macrografias das secções transversais das juntas soldadas com o <i>DynaFlex-Arc</i> . Fonte: O autor	173
Tabela 27 - Tensões e correntes médias adquiridas. Fonte: O autor	177
Tabela 28 - Composição química das soldas com o MIG/MAG em <i>spray</i> . Fonte: O autor.	180
Tabela 29 - Composição química das soldas com o <i>DynaFlex-Arc</i> . Fonte: O autor	180

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
2	OBJETIVOS	27
2.1	OBJETIVO GERAL.....	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O PROCESSO MIG/MAG CONVENCIONAL.....	28
3.2	ASPECTOS EVOLUCIONAIS DO PROCESSO MIG/MAG.....	29
3.3	PONDERAÇÕES SOBRE A TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG ORIENTADAS A ESTA TESE.....	32
3.3.1	<i>Teorias sobre as forças e os fenômenos envolvidos</i>	32
3.3.2	<i>Modos de transferência metálica que contrastam com a transferência em spray em streaming</i>	35
3.3.3	<i>Transferência metálica em spray em streaming com controle refinado dos efeitos indutivos</i>	42
3.4	VARIANTES MIG/MAG DE ALTA PERFORMANCE.....	42
3.4.1	<i>Aspectos relevantes sobre os processos MIG/MAG AP</i>	43
3.4.2	<i>Características das variantes de controle, de acordo a DVS</i>	47
3.4.3	<i>Características das variantes Modified Spray Arc</i>	57
3.5	<i>DYNAFLEX-ARC</i>	65
3.5.1	<i>Breve alinhamento histórico</i>	65
3.5.2	<i>Antecedentes e resultados com aplicações do DynaFlex-Arc</i>	66
3.5.3	<i>Conceito e funcionamento</i>	67
3.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE APLICAÇÕES INOVADORAS DO PROCESSO MIG/MAG AP.....	78
4	MATERIAIS E MÉTODOS	82
4.1	EXPERIMENTOS-BASE COM O PROCESSO <i>DYNAFLEX-ARC</i>	82
4.1.1	<i>Estudo dos efeitos de diferentes combinações de Ks e Kd e suas relações com as taxas de variação de subida e de descida de corrente</i>	86
4.1.1.1	Verificação dos efeitos da combinação Ks =100 e Kd = 20.....	87
4.1.2	<i>Soldagens de união de chapas espessas de aço com junta de topo com chanfro V</i>	88
4.1.2.1	Posição horizontal.....	88
4.1.2.2	Posição sobrecabeça.....	91
4.2	EXPERIMENTOS COMPARATIVOS ENTRE O <i>DYNAFLEX-ARC</i> E O MIG/MAG CONVENCIONAL.....	93

4.2.1	<i>Estudo das diferenças entre os processos em condições similares de buried-arc</i>	93
4.2.2	<i>Estudo da formação de humping a fim de demonstrar o limite da velocidade de soldagem</i>	96
4.3	EXPERIMENTOS COM O PROCESSO <i>DYNAFLEX-ARC</i> COM VISTAS À SOLDAGEM APLICÁVEL À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS ONSHORE.....	97
4.3.1	<i>Estudo da viabilidade do processo na execução manual e mecanizada de reparo por calhas soldadas sobre dutos</i>	98
4.3.2	<i>Estudo prospectivo da utilização do DynaFlex-Arc para a soldagem de revestimento com Inconel 625</i>	106
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	109
5.1	ESTUDO DOS EFEITOS DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE K_s E K_d E SUAS RELAÇÕES COM AS TAXAS DE VARIAÇÃO DE SUBIDA E DE DESCIDA DE CORRENTE	109
5.1.1	<i>Verificação da estabilidade para a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 20$</i>	126
5.2	SOLDAGENS DE UNIÃO DE CHAPAS ESPESAS DE AÇO COM JUNTA DE TOPO COM CHANFRO V.....	129
5.2.1	<i>Posição horizontal</i>	129
5.2.2	<i>Posição sobrecabeça</i>	135
5.3	ESTUDO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS PROCESSOS <i>DYNAFLEX-ARC</i> E MIG/MAG CONVENCIONAL EM CONDIÇÕES DE BURIED-ARC	139
5.4	ESTUDO DA FORMAÇÃO DE <i>HUMPING</i>	159
5.5	ESTUDO DA VIABILIDADE DO PROCESSO NA EXECUÇÃO MANUAL E MECANIZADA DE REPARO POR CALHAS SOLDADAS SOBRE DUTOS	166
5.6	ESTUDO PROSPECTIVO DA UTILIZAÇÃO DO <i>DYNAFLEX-ARC</i> PARA A SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM INCONEL 625.....	175
6	CONCLUSÕES	181
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	184
8	BIBLIOGRAFIA	185
	APÊNDICE A – ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA FONTE IMC QUE VIABILIZAM A VARIANTE <i>DYNAFLEX-ARC</i>	202
	ANEXO A - <i>DVS media Process Control Variants for GMAW</i>	205

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os sistemas de transporte de petróleo e seus derivados, hidrocarbonetos, consistem em modais logísticos que fazem a ligação entre pontos de extração, armazenamento, processamento e distribuição destes fluidos. Dentre estes modais estão as dutovias, constituídas de segmentos soldados de tubulações, feitas predominantemente de aço, podendo ser subterrâneas, submarinas ou aparentes. Há em operação no mundo hoje uma extensão de aproximadamente 1,2 milhões de quilômetros de dutos, entre oleodutos e gasodutos [1]. Estes dutos possuem um tempo de vida útil estimado de acordo com uma previsão de degradação provocada, principalmente, por fatores como corrosão, oxidação e vibração. Mesmo tendo uma estimativa de vida útil, inspeções e manutenções regulares são realizadas preventivamente para garantir a segurança de sua operação. Contudo, problemas tanto durante a construção do duto quanto em suas manutenções, como procedimentos de soldagem incorretos, descontinuidades nas soldas e montagens malfeitas podem precipitar a ocorrência de falhas estruturais. Além destas situações citadas, ainda há o risco de danos causados por derivações clandestinas, atividade criminosa de furto destes hidrocarbonetos que, apesar dos esforços para sua coibição, tem aumentado ano a ano no Brasil.

Em vista deste cenário, a manutenção de um duto deve ser feita preferencialmente em operação, devido aos altos custos envolvidos em uma parada. Quando uma manutenção de reparo envolve procedimentos de soldagem, como por exemplo os reparos apresentados pela norma PETROBRAS N-2163 [2], estes devem ser baseados em processos de soldagem que garantam a segurança do soldador, a qualidade da solda, a eficiência de deposição de material, o baixo aporte térmico e o controle da poça de fusão. Um processo bem controlado deve evitar, principalmente, o risco de ocorrência de defeitos como trincas a frio induzidas pelo hidrogênio, e, ou a perfuração da parede do tubo. Com base nestas questões, a norma PETROBRAS 2163 [2] restringe os processos aplicáveis aos reparos em dutos em operação ao *Tungsten Inert Gas* (TIG), ao MIG/MAG e ao Eletrodo Revestido (ER). Em consonância com esta norma, a indústria brasileira utiliza principalmente o processo ER, basicamente pela robustez de serviço em campo (menor susceptibilidade às variações das condições encontradas em campo), além de exigir menores

investimentos para a implementação de novas tecnologias (novas Especificações de Procedimentos de Soldagem (EPS), treinamento de soldadores, adaptação de equipamentos, etc...) [3].

Contudo, novos investimentos em atualizações dos processos e procedimentos de soldagem utilizados nestes reparos, representam a possibilidade de melhoria da qualidade das uniões soldadas, fator que reverte em mais segurança e menos tempo gasto com manutenção [4]. Neste sentido, é importante destacar que menores tempos de paradas representam maior produtividade dos sistemas operacionais de extração e transporte de hidrocarbonetos dos modais citados acima. Além disso, justificam uma oportunidade para novas aplicações dos processos MIG/MAG de alta performance, a exemplo do processo *DynaFlex-Arc*.

Neste contexto, e para um melhor entendimento, cabe situar o leitor quanto à posição do *DynaFlex-Arc* em relação às variantes dos processos MIG/MAG de alta performance, considerando as características do MIG/MAG convencional e seus avanços com base na evolução tecnológica das fontes de soldagem. Evolução que pode ser descrita desde as primeiras patentes, que fundamentaram a tipologia destes equipamentos, passando pelos diferentes modos de operação até chegar aos refinamentos tecnológicos eletroeletrônicos atuais, baseados em microcontroladores, com foco nos efeitos da indutância sobre a variação dos valores de corrente e visando o controle do regime de transferência metálica. Assim, uma das formas de categorizar este processo MIG/MAG de alta performance, pode ser feita da perspectiva de um dos grupos de variantes classificado pela *Deutscher Verband für Schweißen* (DVS) como "*Modified Spray Arc Group*" [5]. Assim, com base nestas considerações, será introduzido a seguir o conceito de como funciona e atua o processo *DynaFlex-Arc*, com vistas aos diferenciais que o enquadram neste grupo.

Conceitualmente, e com base em experimentos iniciais realizados por Gohr [6], Dutra et al. [7, 8] e Silva et al. [9, 3], o *DynaFlex-Arc* pode ser descrito como uma variante dos processos de soldagem MIG/MAG de alta performance, operado em modo de tensão, fundamentado em um controle refinado dos efeitos indutivos, via transistor bipolar de porta isolada, *insulated-gate bipolar transistor (IGBT)*, com o objetivo de manter o equilíbrio metaestável entre a poça de fusão e a transferência metálica, que ocorre em *spray* em *streaming*, com um arco extremamente curto e enterrado, atuando abaixo da linha de superfície do material de base. Esta condição só é estabelecida graças à alta resposta dinâmica da fonte de soldagem, que, a fim

de manter o regime de trabalho estável, age prontamente ao variar a corrente de forma rápida e controlada, flexibilizando o arco diante da iminência de eventos indesejáveis de curtos-circuitos, que possam descaracterizar a transferência metálica.

Apesar de os estudos, citados acima, que conceituaram e demonstraram a viabilidade desta variante do processo MIG/MAG em uma condição de arco enterrado que favorece a alta penetração, e mesmo com o grande avanço promovido na área de processos de soldagem, algumas questões, do ponto de vista da física do arco elétrico, ainda podem ser aprofundadas com o objetivo de melhorar o entendimento da variação dos efeitos indutivos sobre determinados fenômenos que ocorrem na região entre o eletrodo e o material de base durante a transferência metálica. Afinal, ainda não foi possível filmar o que ocorre nesta região devido, obviamente, à condição de atuação do arco enterrado. Além disso, cabe destacar que os ensaios citados acima foram focados em uma condição de soldagem plana de juntas de topo e de filete em “T”. Por isso, é importante investigar de que forma se comporta a poça de fusão em outras condições e aplicações, a fim de desenvolver procedimentos de soldagem fora de posição em dutos em operação e, assim, caracterizar a atuação do arco e conseqüentemente da transferência metálica neste tipo de situação. Além disso, considerando a flexibilidade do arco e o controle refinado de indutância, avaliar a possibilidade de aplicar este processo em soldagem de revestimento, a fim de constatar suas características de controle da transferência metálica e da poça de fusão.

Em vista do exposto, é possível perceber a necessidade do desenvolvimento, caracterização e parametrização deste processo de soldagem, que pode ser operado de forma manual ou mecanizada e que tem controle e robustez suficientes para atuar tanto com altas taxas de deposição, na fabricação de reparos, a exemplo das abraçadeiras, quanto na soldagem altamente controlada, na manutenção de reparo de dutos em operação. Portanto, pesquisas que podem resultar em avanços no entendimento do *DynaFlex-Arc* representam uma oportunidade de aprimoramento ou, até mesmo, de desenvolvimento de aplicações específicas, as quais podem ser de grande utilidade no segmento da indústria de petróleo e gás *onshore*.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o de estabelecer uma base teórica, ainda não disponível, sobre a tecnologia de soldagem MIG/MAG de alta performance, investigar e avaliar este processo quanto ao seu real princípio de funcionamento e de diferenciação em relação às demais variantes MIG/MAG, assim como testá-lo em aplicações no setor de petróleo e gás.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as influências sobre o comportamento da poça de fusão, da transferência metálica e da interação entre de ambas, com a utilização de filmagens com câmera de alta velocidade e monitoração dos transientes elétricos para a geração de oscilogramas, para identificar as influências de diferentes parametrizações de efeito indutivo;
- Aprimorar a soldabilidade desta variante do processo MIG/MAG AP do ponto de vista operacional para situações e procedimentos em que são aplicados reparos por soldagem de dutos API 5L em operação *onshore*;
- Desenvolver e avaliar o *Dynaflex-Arc* para soldas de união em posições forçadas (fora da plana);
- Avaliar a sua aplicabilidade na soldagem de revestimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O PROCESSO MIG/MAG CONVENCIONAL

Segundo a *American Welding Society (AWS)* [10], o conceito do processo de soldagem *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, ou MIG/MAG, foi proposto em 1920, porém a sua concepção só ocorreu mais tarde, entre as décadas de 1940 e 1950, evoluindo desde o desenvolvimento de invenções até chegar às versões mais robustas com aplicações industriais, conforme alguns registros de patentes da época [11, 12, 13, 14]. Em síntese, o sistema consistia na utilização de uma fonte de soldagem a arco elétrico, que operava com valores ajustáveis de tensão e de velocidade de alimentação de arame, fazendo com que a corrente variasse naturalmente, dentro de uma determinada faixa operacional, limitada pela potência do equipamento, no sentido de fundir apenas o material suficiente a ponto de manter constante a altura do arco elétrico. Ou seja, como uma fonte convencional estática de tensão constante, respeitando uma curva característica estática, conforme Figura 1 [15]. Conseqüentemente, este arranjo promovia uma transferência metálica em uma condição estável. Deste modo, o material de adição era fornecido por um arame-eletrodo bobinado que alimentava continuamente a poça de fusão, mantida sob a atmosfera de um gás inerte ou ativo. Basicamente, o fundamento do que conhecemos atualmente como MIG/MAG convencional [6, 16, 17].

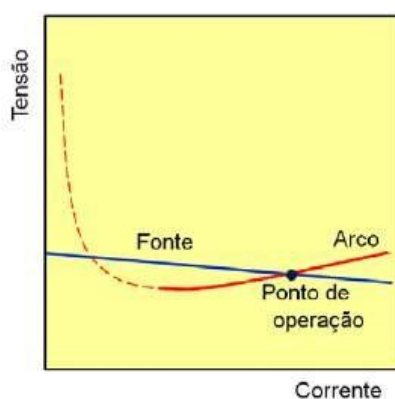


Figura 1 - Curva característica de uma fonte estática de tensão constante [15].

3.2 ASPECTOS EVOLUCIONAIS DO PROCESSO MIG/MAG

Com o passar dos anos, as fontes foram evoluindo do ponto de vista de sua constituição interna e podem ser classificadas em dois grupos: o primeiro, o grupo das convencionais, baseadas em uma arquitetura analógica de controle, concebidas na década de 1950, subdivididas entre as estáticas, baseadas principalmente em um transformador ligado diretamente à rede, e as rotativas, baseadas em motores que acionavam geradores de energia. Já o segundo, o grupo das modernas fontes de soldagem, que começaram a ser comercializadas na década de 1970, constituídas de uma eletrônica robusta, sendo inicialmente baseadas em tiristores, e em seguida, na década de 1980, chegaram as fontes inversoras transistorizadas, com tempos de velocidade de resposta maiores, ainda amplamente utilizadas pela indústria atual [18].

Graças a estes avanços tecnológicos, ainda entre as décadas de 1970 e 1980, foi possível utilizar uma fonte operando em modo de corrente, com a vantagem de modular eletronicamente seus valores, com programação de parâmetros de base e de pulso, e conseqüentemente, controlar melhor a transferência metálica ao longo do processo de soldagem. Desta forma, tornou-se possível determinar diferentes tempos e valores de corrente, com uma melhor repetibilidade dos ciclos de formação e destacamento de gota e, assim, ficaram mais precisos os estabelecimentos tanto das faixas de transição quanto de operação dos modos de transferência.

Com os ajustes adequados, tornou-se possível estabelecer uma transferência de gota por pulso no modo *spray*, com uma corrente média, abaixo da corrente de transição, onde apenas ocorreria transferência por curto-circuito em uma operação nas mesmas condições, mas em modo não pulsado. Ou seja, no modo pulsado, tornou-se viável executar uma transferência por *spray* abaixo da corrente de transição, exigindo, conseqüentemente, menos energia e produzindo menos respingos em comparação com uma transferência por curto-circuito, com a vantagem relevante de uma melhor fusão do material de adição. Os principais benefícios deste modo de operação, traduzidos em uma forma de onda pulsada, são fornecer calor para a fusão e formação das gotas, bem como fornecer forças de destacamento para contrabalançar a força de retenção da gota [19, 20]. Duas teorias principais estão disponíveis para melhor explicar a transferência metálica em voo livre, em suma, a teoria do Equilíbrio de Forças e a teoria da Instabilidade *Pinch*. Desta maneira,

emergiu a variante do MIG/MAG nominada *Gas Metal Arc Welding Pulse (GMAW-P)*, ou MIG/MAG pulsado. Posteriormente, cabe destacar que, aliada aos avanços promovidos pela tecnologia sinérgica, abordada logo à frente, foi possível o desenvolvimento de variantes como *Cold Metal Transfer (CMT)*, conforme demonstrado por Mvola et al. [21] e Galeazzi et al. [22]. E, mais recentemente, sua incorporação permitiu o avanço de uma série de variantes avançadas do processo MIG/MAG, onde a influência da forma de onda de corrente no comportamento da gota, devido a uma modulação mais precisa da energia de soldagem, é examinada de maneira mais aprofundada, como os de Dutra & Silva [23], Huang et al. [24], e Norrish [25].

Além das vantagens citadas anteriormente, do ponto de vista da soldabilidade, cabe salientar, que o MIG/MAG pulsado também promove melhorias do ponto de vista metalúrgico da solda. Conforme experimentos realizados por Barra [26], foi possível constatar que, em seus experimentos, houve relação entre a frequência e o formato dos pulsos, que conseqüentemente afetaram a formação das escamas (frequência de destacamento do material de adição), além de uma redução do aporte térmico. Estes fatores, quando comparados ao MIG/MAG convencional em condições similares, promovem uma redução do tamanho dos grãos, contribuindo para evitar a formação de trincas a quente.

Com as melhorias incorporadas aos sistemas das fontes, como o aprimoramento de *hardware* (com destaque para a evolução dos microcontroladores) e *software* (com destaque recente para os sistemas baseados em *machine learning*), que permitem dinâmicas mais rápidas e a possibilidade de serem realizadas medições em tempo real dos transientes elétricos e das variações da velocidade de alimentação de arame, aliados ao processamento destas informações em tempo real e atuação com rapidez compatível com a dinâmica do processo, foi possível conceber mais dois modos de operações de fontes: o sinérgico e o adaptativo. Os chamados modos sinérgicos são viabilizados por fontes eletrônicas que operam baseadas em algoritmos pré-definidos, alimentados por parâmetros testados anteriormente, que servem para controlar a transferência metálica em diversos *jobs* de soldagem que variam de acordo com o diâmetro do eletrodo, material, velocidade de soldagem, entre outros fatores [27]. Já os adaptativos são baseados na monitoração do processo em tempo real, desde os parâmetros de entrada, passando pela condição da transferência metálica, até o aspecto final da solda. Assim, o sistema é

retroalimentado fazendo automaticamente os ajustes necessários nos parâmetros de soldagem, baseados em respostas de operações de algoritmos, a fim de garantir a estabilidade do processo e, conseqüentemente, uma melhor qualidade da solda [28].

Ainda, quanto aos aspectos comentados acima, cabe destacar que, os modos de operação podem ser combinados em uma mesma estratégia de controle, de forma mista, como é o caso do *Synergic Pulsed GMAW* [29, 30] e do Curto-Circuito Controlado (CCC) [31, 32].

Para complementar o tema, a composição dos gases de trabalho também figura como um ponto tecnológico em constante desenvolvimento. Uma vez que os efeitos destas composições exercem um papel fundamental no comportamento do arco elétrico e, em alguns casos, também ocorrem interações físico-químicas com o material de adição e a poça de fusão, que, inclusive, refletem no modo de transferência metálica e na estabilidade do processo [7, 33]. Avanços neste segmento visam otimizar a taxa de fusão e a própria geometria da solda, porém em alguns casos, a exemplo do *Transferred Ionized Molten Energy (T.I.M.E)*, nome comercial de uma mistura quaternária de gases), estudos demonstraram que as taxas de fusão efetivas não convergiam com as taxas previstas pelo fabricante [7, 34]. Contudo, ajustes nos valores dos efeitos indutivos podem aumentar a estabilidade de um processo, tornando similares, do ponto de vista da transferência, a utilização de diferentes misturas de gases [35].

Neste contexto, em conjunto com o desenvolvimento tecnológico tanto de *hardware* quanto de *software* das fontes, também são necessárias pesquisas que permitam melhorar o entendimento e, assim, otimizar os efeitos que toda esta tecnologia pode promover no controle da transferência metálica [36]. Neste sentido, e agora sob um ponto de vista mais específico, estudos quanto à atuação da indutância sobre a corrente têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a estabilidade dos processos de soldagem [37, 16]. Cabe destacar que circuitos indutivos representam um assunto pacificado dentro da área da engenharia elétrica, conforme literatura [38]. No entanto, os efeitos da variação da corrente, provocados pelos efeitos indutivos, sobre a estabilidade da transferência metálica quanto à ocorrência de respingos, geometria do cordão e, principalmente, quanto à possibilidade de aumentar a eficiência das taxas de deposição, que garantam a qualidade da solda, figuram ainda como um tema em discussão na área da engenharia da soldagem.

3.3 PONDERAÇÕES SOBRE A TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG ORIENTADAS A ESTA TESE

Para uma melhor clareza das questões físicas que viabilizam o modo de operação, em tensão, da variante MIG/MAG de alta performance denominada *Dynaflex-Arc*, cuja principal característica é a transferência em *spray* em *streaming* com arco extremamente curto (em uma situação crítica constante de iminência de curtos-circuitos indesejáveis) e com controle refinado dos efeitos indutivos sobre as variações de corrente ao longo do processo, cabe a abordagem dos seguintes tópicos: primeiro, as principais teorias referentes ao arranjo de forças envolvidas na transferência metálica, com ênfase na força eletromagnética e no efeito *pinch* e, segundo, os modos de transferência metálica naturais e controlados, considerando as particularidades dos modos em curto-circuito, *spray* e *spray* em *streaming*.

3.3.1 Teorias sobre as forças e os fenômenos envolvidos

As transferências metálicas que ocorrem a partir de faixas de corrente mais baixas até a chamada região da corrente de transição, que pode variar a depender, principalmente, da composição do gás, são atendidas satisfatoriamente pela Teoria do Equilíbrio de Forças Estáticas [18, 19]. Porém, acima da corrente de transição, a Teoria de Instabilidade *Pinch* é considerada mais adequada, apesar de ter certas limitações, para explicar as relações de causa e efeito entre os fenômenos envolvidos na dinâmica de destacamento da gota de material de adição [39, 40].

A primeira teoria, a do Equilíbrio de Forças Estáticas, estabelece que são cinco as principais forças em uma transferência metálica, as quais resultarão no sentido, na direção e na energia cinética com que a gota se destacará do eletrodo, sendo elas: força gravitacional, força devida à tensão superficial do material fundido, força de vaporização, força de arraste dos gases e força eletromagnética.

A força gravitacional varia de acordo com a massa da gota que está em transferência e sua perspectiva, quanto ao favorecimento ou não do destacamento, está em função da posição de soldagem analisada.

A força devido à tensão superficial está diretamente associada ao momento em que a massa de metal líquido está sendo analisada. Enquanto ainda não estiver em contato com a poça de fusão, suas componentes atuam no sentido de manter o material preso ao eletrodo. A partir do momento em que este material, em transferência, toca a poça de metal fundido, seu sentido passa a forçar a movimentação a favor de seu deslocamento para o material de base.

A força de vaporização ocorre devido a reações que formam os vapores metálicos entre a gota e a poça de fusão, mas especificamente na região de conexão entre a gota e o arco elétrico, região em que a energia gerada por estas reações exerce força contra o destacamento da gota.

A força de arraste dos gases pode ser descrita como a componente que está associada à movimentação do jato plasma e sempre favorece o destacamento da gota.

A quinta e última força tratada nesta teoria, a força eletromagnética. Esta força é causada pela movimentação da corrente no sentido axial em um fio condutor, no caso o eletrodo, que gera um campo eletromagnético radial atuando do sentido exterior para o interior do fio, em que suas componentes causam um estrangulamento ao longo do eixo. No caso da gota líquida que está em formação, este efeito é mais pronunciado e causa o chamado efeito "*Pinch*". Assim, foram escolhidas transferências metálicas na região de operação da faixa de corrente de transição para exemplificar os efeitos desta força, conforme segue.

Em correntes mais baixas, mas predominantemente na faixa da corrente de transição, a componente da força eletromagnética gerada no eixo y (F_y) promove uma repulsão da gota, atrapalhando o seu destacamento, situação em que o estrangulamento causado pelas forças radiais são maiores na região de acoplamento do arco elétrico, conforme sequência de representações deste efeito contidas na Figura 2 [18].

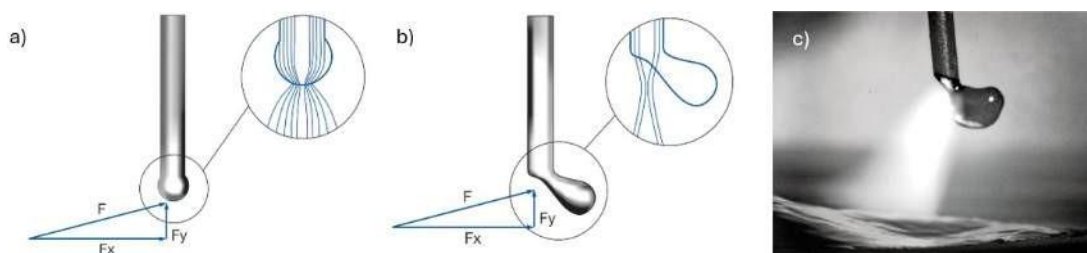


Figura 2 - Força eletromagnética em repulsão [18]. Em a) Maior pressão na gota na região de acoplamento com o arco; b) Desvio de direção da gota; c) Imagem real do fenômeno.

Em correntes mais altas, mas ainda dentro da faixa de corrente de transição, a componente da força eletromagnética gerada no eixo y (F_y) contribui para o destacamento do material fundido, situação em que o estrangulamento causado pelas forças radiais são maiores na região da gota em contato com o eletrodo, conforme sequência de representações deste efeito contidas na Figura 3 [18].

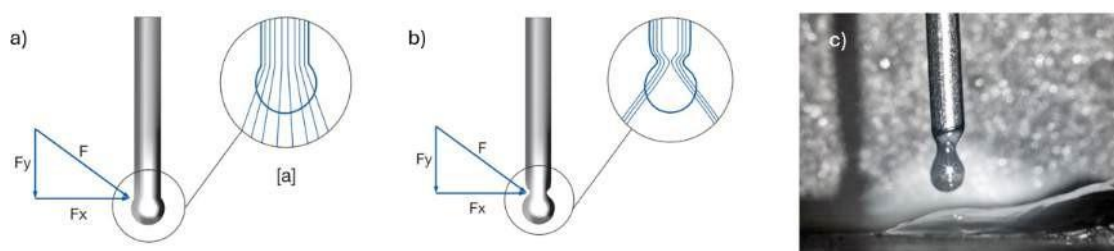


Figura 3 - Força eletromagnética favorável ao destacamento da gota. [17]. Em a) Atuação da força resultante; b) Resultado do efeito *Pinch*; c) Imagem real do fenômeno.

Já a segunda teoria trata da forma de atuação das linhas de campo magnéticas que atuam na formação e no destacamento da gota, conhecida como Teoria de Instabilidade *Pinch*. Esta teoria considera que em correntes, a partir de aproximadamente 10% acima da faixa de transição, onde as transferências começam a ocorrer em modo em *spray*, em outras palavras, as componentes da força eletromagnética não permitem que a gota se forme em uma geometria com característica esférica. Durante a fase de formação da gota fundida, seguida pelo destacamento, a geometria inicia em um formato de cilindro alongado, evoluindo para um afilamento da ponta fundida do arame, característico, e de forma pronunciada, principalmente, no modo de transferência em *spray* em *streaming*. Ou seja, condição em que o efeito *Pinch* compete com o efeito da tensão superficial, num movimento de diminuição do diâmetro da ponta fundida do arame, até o efeito *Pinch* se sobrepôr, e rompe-la em gotículas projetadas axialmente em direção à poça de fusão.

Apesar desta teoria não abordar a relação dos efeitos indutivos com as diferenças de dl/dt de subida e de dl/dt de descida, mas devido às altas faixas de corrente de operação do *DynaFlex-Arc*, aproximadamente 30% acima da faixa de transição, é possível afirmar que esta teoria serve para explicar grande parte do comportamento desta transferência metálica. Principalmente, considerando que nas soldagens na posição sobrecabeça, apresentadas no Subitem 5.2.2, é possível constatar os efeitos comentados no parágrafo anterior.

3.3.2 Modos de transferência metálica que contrastam com a transferência em *spray* em *streaming*

Os modos de transferência metálica podem ser classificados em três grupos: os modos naturais, controlados e intercambiáveis [19]. O grupo dos naturais é dividido em dois subgrupos, por contato e por voo livre, conforme tabela da Figura 4.




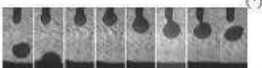





Grupos de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por contato	Por curto-circuito		Tensão superficial e efeito <i>pinch</i>
	Por "ponte"		Tensão superficial
	Por curto-circuito forçado		Efeito <i>pinch</i> pronunciado
Por voo livre	Globular		Gravitacional
	Globular repulsiva		Força gravitacional e forças de repulsão
	Goticular (ou goticular projetada)		Força eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Força eletromagnética e reações químicas

Figura 4 - Modos naturais de transferência metálica [19].

Aliado ao conceito do modo em *spray* (ou goticular, conforme tabela da Figura 4), tratado anteriormente na teoria de Instabilidade *Pinch*, cabe abordar o modo de transferência em curto-circuito para então, contrastar com a condição de curto-circuito incipiente. Esta última, caso ocorra durante a soldagem com o *DynaFlex-Arc*, transcorre de forma que seu desfazimento seja rápido, evitando perturbações que comprometam o modo predominante de transferência em *streaming*.

Pode-se dizer que, as duas condições de curto-circuito, citadas no parágrafo anterior, têm em comum a situação de contato da região fundida da ponta do eletrodo com a poça de fusão. Basicamente, esta situação causa desvio de corrente e a extinção do arco elétrico (para o modo de transferência por curto-circuito), provocando o fechamento do circuito de soldagem formado pela fonte, os cabos que conectam ao eletrodo e ao material de base, conforme exemplificado pelo diagrama do circuito da fonte IMC *DigiPlus* na Figura 5 [41], além de outros componentes (bico de contato, porta-bico, garra terra, gabarito ou mesa, além das conexões entre os condutores).

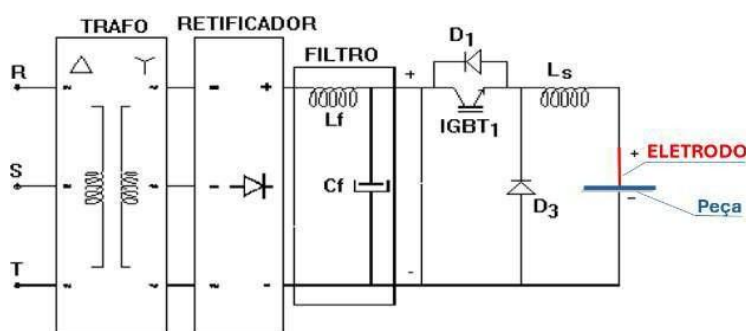


Figura 5 - Diagrama representando um circuito fechado (em curto) [41].

Para o caso do curto incipiente, no entanto, há evidências de que o arco não se apaga completamente durante o breve contato da ponta líquida do arame com a poça, isto é, não há desionização completa no breve tempo de duração do curto-circuito incipiente, se configurando dois ramos paralelos do circuito, sendo que o ramo através do líquido é extremamente breve. Videografia de alta velocidade permite observar arco aberto mesmo quando se detecta eletronicamente o curto-circuito, conforme Figura 6. Nela, é possível observar que a atuação do arco elétrico impediu o fechamento da poça de fusão, apesar de o registro de uma queda abrupta e expressiva da tensão.

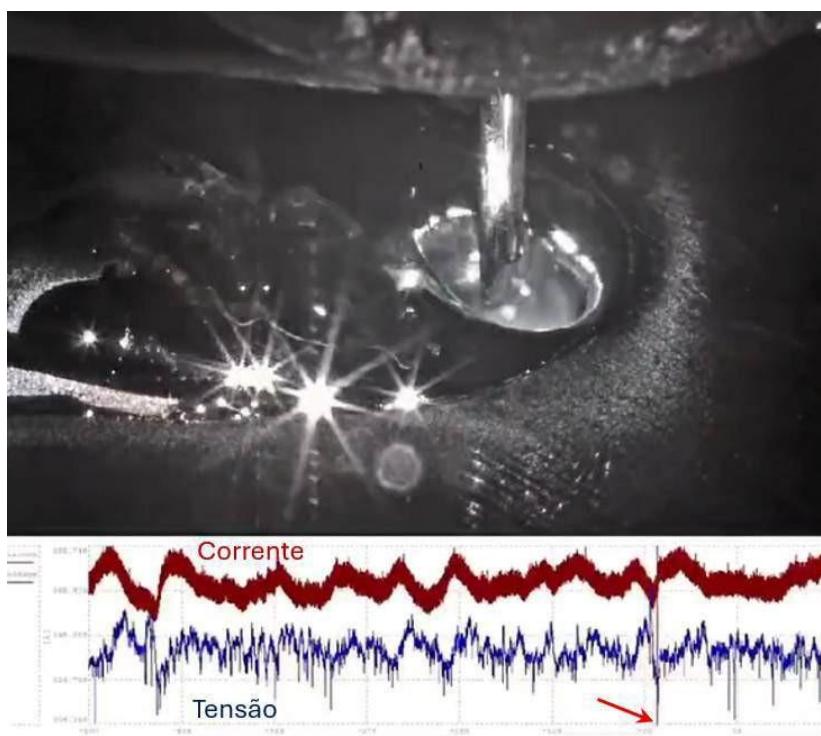


Figura 6 - Frame -00199, DynaFlex-Arc, arco aberto com queda de tensão. Fonte: O autor.
 Videografia disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=3EmkVwGfLIA>>

A investigação deste estado transitório, no entanto, não foi conduzida no presente trabalho. De maneira geral, no momento do contato, o valor de tensão cai abruptamente, fazendo com que a fonte reaja em forma de um surto de corrente até que seja desfeita a ponte metálica e reacendido o arco elétrico. Em outras palavras, o fechamento do circuito é uma condição inicial para o estabelecimento da transferência por curto-circuito que, depende ainda de uma série de condições e segue uma sequência de etapas e estados para seguir a sua evolução até um possível destacamento da gota do eletrodo, situação que não ocorre em curtos-circuitos incipientes, a exemplo do *DynaFlex-Arc*, nos quais não ocorre a transferência metálica (o material em *streaming* é repelido), ou ocorre uma transferência mais rápida, sem as etapas do modo de transferência por curto-circuito.

Seguindo neste raciocínio, especificamente, quanto à primeira condição, em modo de transferência por curto-circuito, seu conceito serve para descrever como deve ocorrer uma transferência completa por contato, ou seja, em uma transferência onde se forma transitoriamente uma ponte metálica e, assim, reforçando o que foi dito anteriormente, referenciar uma situação absolutamente indesejável no modo em *spray em streaming*, mas que contribui para o entendimento do conceito de curto-circuito incipiente.

De acordo com Silva [42], a transferência em curto-circuito deve atender alguns requisitos para ocorrer de forma estável e periódica, conforme Figura 7.

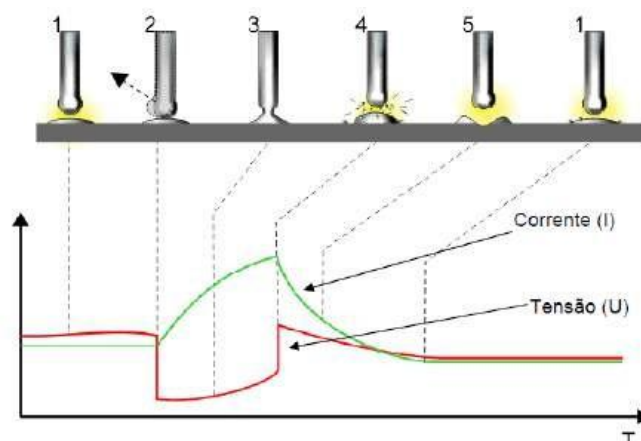


Figura 7 - Transferência metálica em curto-circuito em MIG/MAG convencional, estável.

Quando uma transferência metálica ocorre em curto-circuito, é possível observar que, após a formação da gota com uma geometria esférica na ponta do eletrodo, ocorrem três fases distintas, sendo elas: estabelecimento da ponte metálica, transferência do material de adição e, finalmente, o rompimento da ponte metálica. No curto-circuito convencional, estas fases podem variar, dentre outros fatores, em função de, por exemplo: o diâmetro do arame e, principalmente, do valor da corrente de operação. Dada a importância dos valores de corrente neste modo de transferência que, em operações de soldagem em controle de corrente, como no Curto-Circuito Controlado (CCC), os tempos e os valores de corrente de base e de pulso podem ser parametrizados para otimizar a transferência, em função de sua aplicação [43, 44, 45].

Em se tratando de curto-circuito convencional, a Teoria do Equilíbrio de Forças Estáticas atende satisfatoriamente para a descrição das relações das forças atuantes. Porém, quando se trata do curto-circuito forçado, há uma predominância do efeito “*Pinch*”, devido ao fato deste modo de operação ocorrer em faixas de corrente acima da transição e, devido a utilização de faixas de velocidade de arame que tornam o arco elétrico mais curto, a ponto de estabelecerem os contatos regulares característicos de uma transferência em curto-circuito, não há tempo para que ocorra o afilamento da ponta do arame, tão pouco, o aumento do diâmetro da gota. Ou seja, os curtos-circuitos, mesmo sendo programados para que ocorram, ocorrem em uma faixa de corrente considerada mais propícia para uma transferência em *spray*.

Uma outra opção de destaque para estabelecer uma correlação com esta tese, que serve para controlar os tempos de curto-circuito, é a influência do efeito indutivo sobre a corrente média. Conforme comentado por Silva [42], diferentes efeitos indutivos, provocados por diferentes valores de K_s e K_d ¹, influenciam na corrente média resultando em diferentes tempos de curto-circuito. Em outras palavras, de forma mais específica, valores de di/dt menores (rampa de corrente mais lenta, associados a valores de K_s e K_d menores), refletem em valores de corrente média maiores e, conseqüentemente, maiores tempos de curto-circuito.

Quanto à segunda condição, conhecida como curto-circuito incipiente, esta é caracterizada pelo estabelecimento de uma ponte metálica ínfima que não consegue alcançar as três fases características de uma transferência por curto-circuito, de maneira razoável. Apesar do estabelecimento ínfimo desta ponte metálica, esta situação é considerada, em determinadas condições, uma ocorrência aceitável no modo em *spray* em *streaming*. Afinal, mesmo que este tipo de ocorrência eventual seja entendido como uma situação de instabilidade do arco, ele não descaracteriza este modo de transferência metálica operado com o *DynaFlex-Arc*, conforme resultados apresentados no Subitem 5.1.

Nesta etapa da tese, vale levantar a seguinte questão: qual o tempo mínimo de curto-circuito necessário para que possa ocorrer a descaracterização de uma transferência metálica em *spray* em *streaming* e que, conseqüentemente, cause um evento de instabilidade durante este processo de soldagem?

Em vista desta questão, é importante balizar qual a diferença entre um curto-circuito de uma transferência metálica por curto-circuito, como caracterizado na revisão bibliográfica, e curtos-circuitos incipientes durante transferência por *spray* *streaming*, com ou sem transferência metálica, uma vez que a ocorrência de curtos-circuitos é considerada aceitável durante o processo de soldagem com o *DynaFlex-Arc*. Mesmo considerando que, ainda não é possível observar se há ou não transferência nesses curtos, pois ocorrem no fundo da poça de fusão / cavidade, apenas parcamente visualizada nas filmagens, em uma perspectiva parcial da poça.

Assim, o curto-circuito incipiente pode ser caracterizado pelo estabelecimento da ponte metálica, na maioria das vezes, sem tempo para que ocorra a transferência da gota (tempos abaixo de 2 ms), mas caso ocorra, não é por atuação predominante

¹ K_s e K_d , parâmetros de entrada da fonte DigiPlus IMC que atuam sobre os efeitos indutivos, conforme explicados no APÊNDICE A.

da tensão superficial [46], em eventos que é possível esta observação. Em alguns casos, principalmente, quando a corrente sobe rapidamente, a gota chega a ser repelida da poça de fusão [47], mesmo após o estabelecimento do contato, conforme Figura 8. Esta imagem serve apenas para ilustrar uma forma de ocorrência deste fenômeno ao leitor, em curto-circuito convencional, o regime não é *spray streaming*, não há a formação de um filamento líquido alongado na ponta do arame, o que configura diferente balanço de forças sobre a gota.

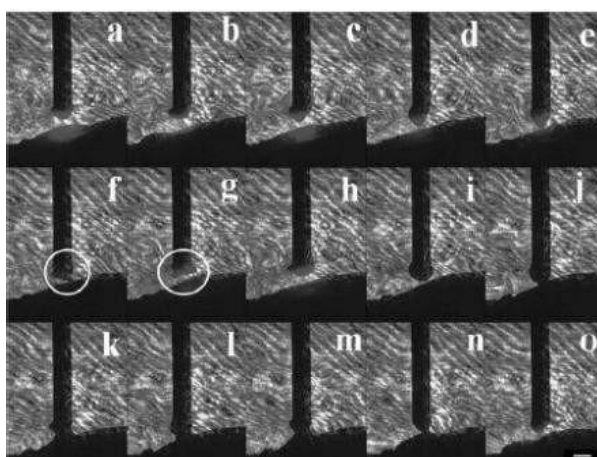


Figura 8 - Situação em que a gota foi repelida do encontro com a poça de fusão, mesmo após o contato da ponta fundida do arame (*frames f e g*) [47].

Conforme apresentado por Silva [43] e demonstrado por Poloskov [44], a transferência por curto-circuito pode ser estratificada em três fases: estabelecimento da ponte metálica, transferência da gota e rompimento da ponte metálica. Ou seja, do ponto de vista analítico, é preciso de um determinado tempo para que cada uma destas três fases se estabeleça para que todo o evento da transferência ocorra sem interrupções. Assim, pode-se dizer que no caso do *DynaFlex-Arc*, em uma situação aceitável de curto-circuito, do ponto de vista da estabilidade, a ocorrência do contato do material de adição fundido com a poça de fusão, não chega a ter tempo de estabelecer uma ponte metálica. Assim, esta primeira fase é interrompida pela dinâmica da fonte, quando em operação normal, em menos de 1 ms, sem causar instabilidade ao processo, conforme pode ser visto na Figura 9 [19] (frame A, entre 34 ms e 36 ms), em que a ponta do arame toca a poça de fusão, há a queda de tensão seguida de uma alta abrupta, mas sem transferência metálica significativa, ou seja, sem o estabelecimento das demais fases características de uma transferência em curto-circuito.

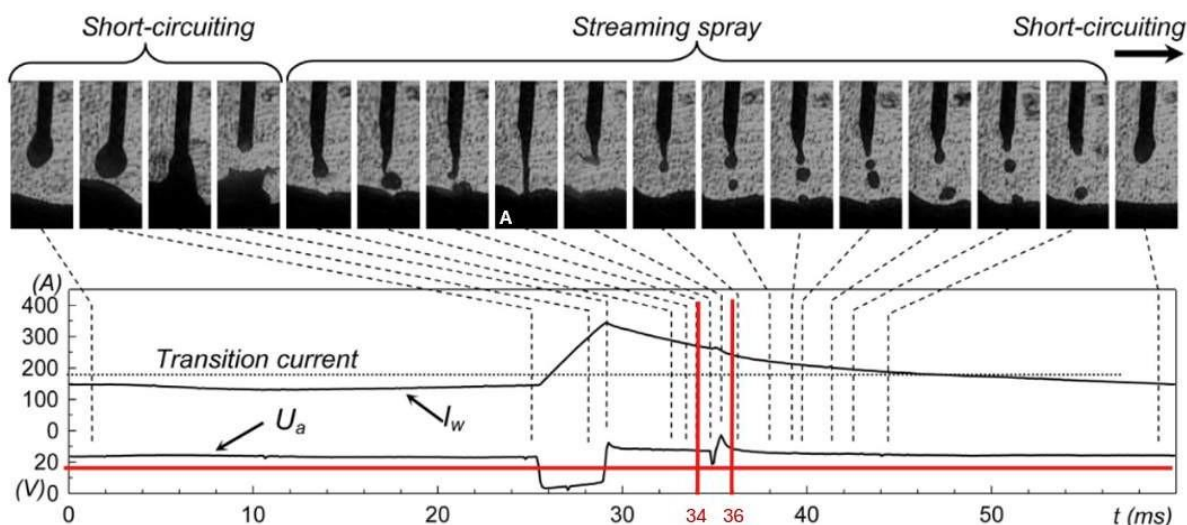


Figura 9 - Curto circuito incipiente durante uma transferência em *spray* em *streaming* [19].

Para finalizar este subitem, cabe um breve comentário. Considerando que os modos controlados são descritos por processos operados em modo de corrente [19], o *DynaFlex-Arc* surge como uma alternativa de processo controlado operado em modo de tensão.

3.3.3 Transferência metálica em *spray* em *streaming* com controle refinado dos efeitos indutivos

Considerando que a transferência metálica do *DynaFlex-Arc* ocorre em *spray* em *streaming*, em uma condição crítica de arco extremamente curto, e ainda mais crítica quando em condição de *buried arc*, ou seja, com arco enterrado abaixo da superfície do material de base, em uma cratera de metal fundido que se mantém aberta durante o processo em uma condição metaestável, graças, principalmente, à dinâmica da fonte, se percebe que a controlabilidade dos efeitos indutivos sobre as variações de di/dt de subida e de descida devem ser ainda mais explorados. Isso porque o arranjo transferência / cratera está sujeito às instabilidades no arco que podem causar perturbações, de forma a comprometer a transferência metálica do eletrodo para a poça, além do fechamento da cratera.

3.4 VARIANTES MIG/MAG DE ALTA PERFORMANCE

No contexto apresentado, tornou-se possível criar condições para o desenvolvimento de processos conhecidos como de alta performance ou processos avançados. O desenvolvimento destas variantes foi viabilizado graças a refinamentos tecnológicos em eletrônica, mecânica e computação (especialmente o aumento na velocidade dos processadores e a utilização de sistemas de análise baseados em inteligência artificial, como algoritmos genéticos e redes neurais). O objetivo principal consiste em promover maior penetração, taxas mais altas de deposição de material, maior controle na transferência de metal e, assim, garantir geometrias de solda específicas previstas em determinados projetos e normas de engenharia, com mais produtividade [21, 48]. Ao longo desse movimento evolutivo, muitas empresas comercializam seus processos MIG/MAG de alta performance com nomes que sugerem alta potência ou alta penetração, como *ForceArc*, *Deep Arc* e *DeepMIG*, entre outros.

3.4.1 Aspectos relevantes sobre os processos MIG/MAG AP

De acordo com a *Deutscher Verband für Schweißen* (DVS) [49, 50], são consideradas variantes MIG/MAG de alta performance aquelas que, quando operadas com equipamentos que utilizam tochas com apenas um arame, com diâmetros de 1,0 ou 1,2 mm e velocidades de alimentação de arame a partir de 15 m/min, ou, ao utilizar diâmetros maiores de arame, atinjam taxas de deposição superiores a 8 kg/h. De maneira indissociável a esta premissa e, para a evolução do estudo do mérito desta tese, cabe abordar o Boletim Técnico DVS 0973 [5], que trata da definição de dez famílias de variantes de controle MIG/MAG caracterizadas, não apenas de acordo com os controles da fonte, mas focando em diferentes métodos de controle do comportamento do arco elétrico e da transferência metálica, visando benefícios específicos tanto em termos do processo quanto da solda.

Conseqüentemente, cabe destacar que velocidades de alimentação de arame e correntes altas devem estar condizentes com a velocidade de soldagem, devido ao efeito de interposição da poça que, de acordo com Scotti [19], conforme Figura 10, possuem uma região de operação ótima quanto à penetração, considerando uma velocidade de alimentação constante. Podendo até mesmo, a depender da combinação de parâmetros, contribuir para a formação de *humping*, conforme experimentos apresentados no Subitem. 4.2.2.

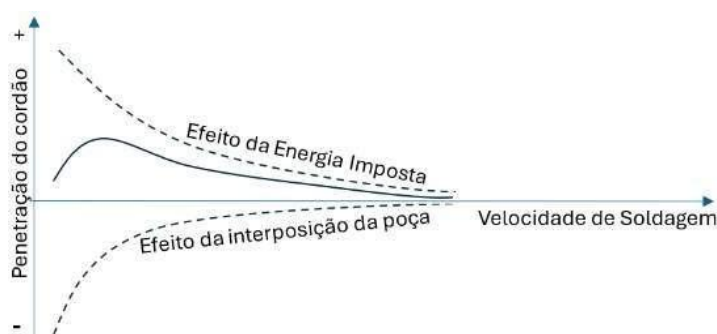


Figura 10 - Relação de penetração em relação à velocidade de soldagem [19].

Concomitante ao que tange este assunto, de acordo com a AWS, Volume 2 de seu *Handbook* [10], o processo MIG/MAG é abordado com base nos modos de controle das fontes e nos modos de transferência metálica. Contudo, ele também descreve maneiras de melhorar o desempenho da soldagem, incluindo regulagens da indutância (via *hardware*, diferente da proposta desta tese, que consiste na ajustagem do efeito indutivo via *software*). No entanto, diferentemente da DVS, a AWS não classifica ou estabelece uma categorização para as variantes de alta performance.

Vale destacar, porém, que grande parte das linhas de pesquisa demonstram que os processos de alto desempenho não visam apenas alcançar altas taxas de deposição, mas também, maior penetração, capacidade de soldar chapas espessas, entre outras. Um exemplo notável são os experimentos recentes conduzidos por Zhifeng e Xia [51], onde eles testaram o processo MIG/MAG utilizando uma configuração de *buried arc*, que eles denominaram de *Super Spray MAG Welding*, para unir chapas com espessura de 40 mm.

Mais recentemente, em março de 2025, foi apresentado por Kudla [52] um artigo que trata da variante MIG/MAG AP, intitulada *GMAW Rapid HF process (GRHF, HF-high Frequency)*. Apesar de ele afirmar, categoricamente, que, devido à robotização, as soldagens MIG/MAG AP são realizadas praticamente de forma

exclusiva na posição plana e, assim, é possível utilizar parâmetros mais elevados de corrente e tensão, em outras palavras, risco de escorrimento devido à alta energia, afirmação superada pelos avanços demonstrados por esta tese, conforme resultados apresentados no Subitem 5.2.2. Contudo, este artigo serve para mostrar aplicações às inovações implementadas à atuação de novas fontes, com expectativa de soldagem em alta performance.

Os experimentos foram realizados utilizando uma fonte de soldagem CLOOS, *Qineo Pulse 601 Pro 2021*, em que foram comparadas soldagens realizadas com o processo convencional, que Kudla chamou de *GMAW convencional constant voltage (GCCV)*, e o processo em modo de corrente pulsada em uma frequência de 5.000 Hz (*GRHF*). As soldagens foram executadas na posição plana, de depósito sobre chapa, para demonstrar o efeitos das diferenças entre determinados tipos de misturas de gases, em que foram mantidos os seguintes parâmetros de soldagem: para o GCCV: $V_a = 11$ m/min, $I = 340$ A, $U = 31,5$ V; e para o *GRHF*: $V_a = 11$ /min, $I = 330$ A, $U = 28,5$ V, frequência de pulso = 5000 Hz, tempo de pulso = 0,1 ms, corrente de pulso = 380 A, corrente de base = 280 A e $di/dt = 1000$ A/ms. Estas soldagens resultaram em penetrações de 4,75 e 6,25 mm, respectivamente, conforme Figuras 11 e 12.

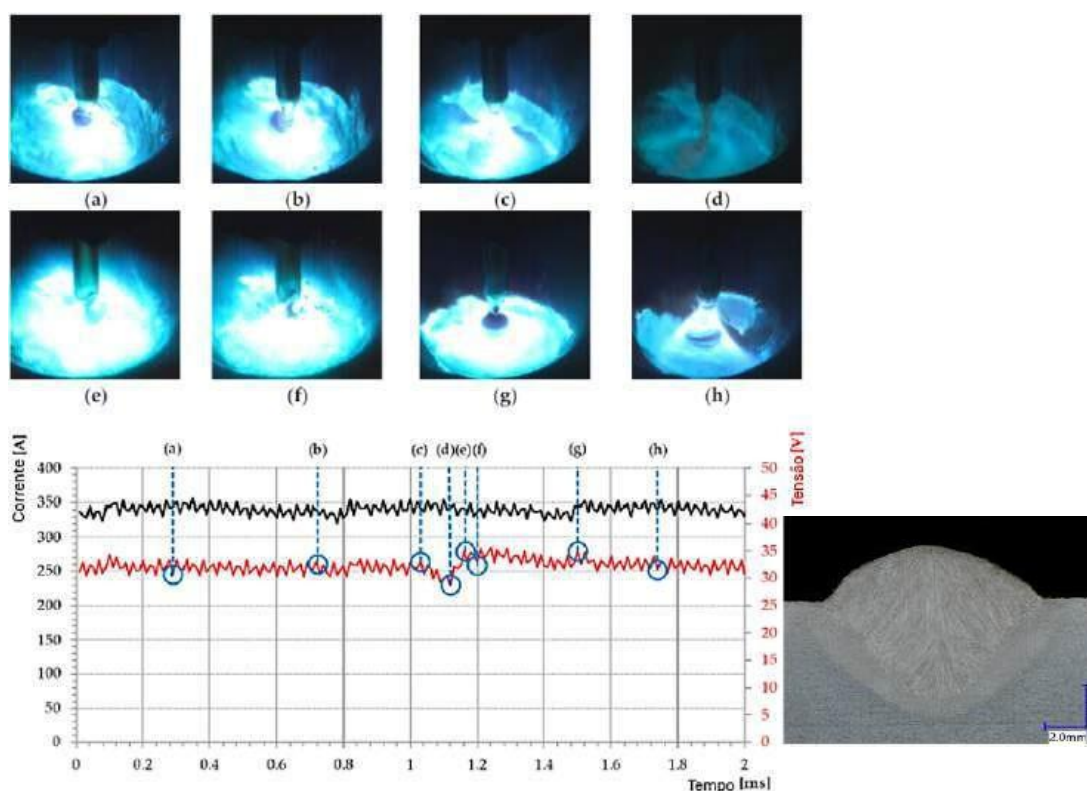


Figura 11 - Resultados com o processo GCCV.

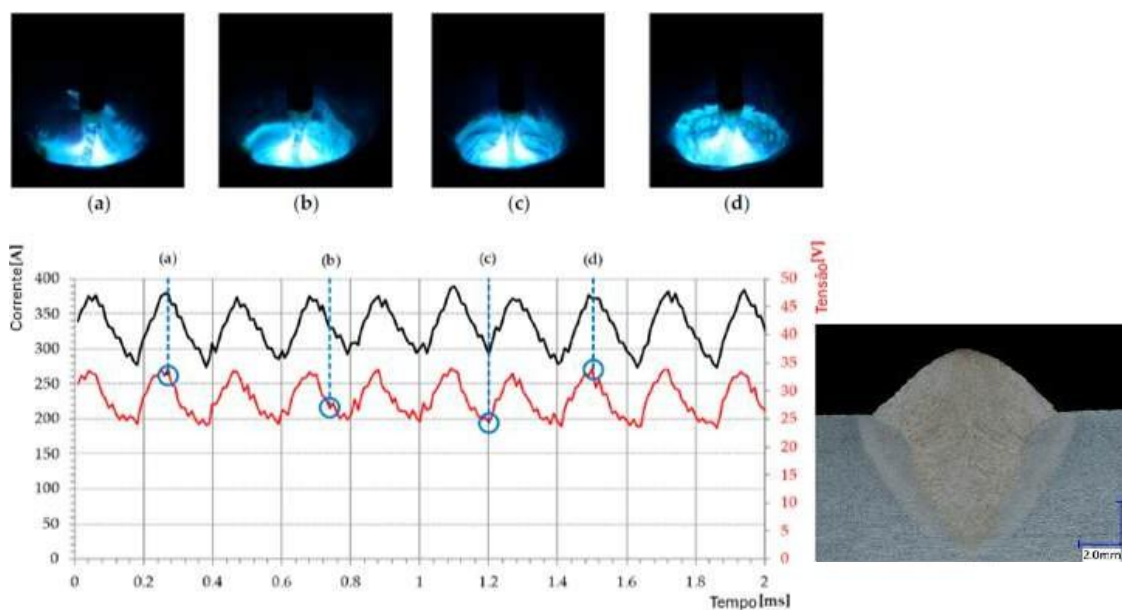


Figura 12 - Resultados com o processo *GRHF*.

De acordo com o Kudla, este aumento de penetração é resultado de uma soldagem controlada, com alta frequência de variação de corrente.

Por outro lado, experimentos conduzidos por Silva et al. [53], utilizando uma fonte de energia CLOOS da década de 1970 baseada em tiristores, conforme Figura 13a, demonstraram a possibilidade de realizar soldas com velocidades de arame em torno de 15 m/min em uma condição de *buried arc*, conforme Figura 13b, em modo de tensão, sem refinamentos significativos de controle do processo. Embora este tipo de fonte de energia possa operar nestas condições, mas, conforme pode ser conferido nos resultados desta tese, com menos estabilidade, quando adotado o critério de variação de corrente, e com menos robustez em comparação com as fontes comerciais modernas, ela não se enquadra na categoria de variante de alto desempenho, pois não foi concebida para este propósito. Neste sentido, outro exemplo pode ser citado, em que uma condição semelhante foi descrita por Dreveck et al. [54], onde uma fonte transistorizada (não concebida para alta performance), em modo de tensão, operou em *buried arc* com transferência em *spray* em *streaming*, atingindo altas taxas de deposição, mas limitada a uma faixa de velocidade de soldagem de 1,0 m/min devido à formação de defeitos acima deste valor.

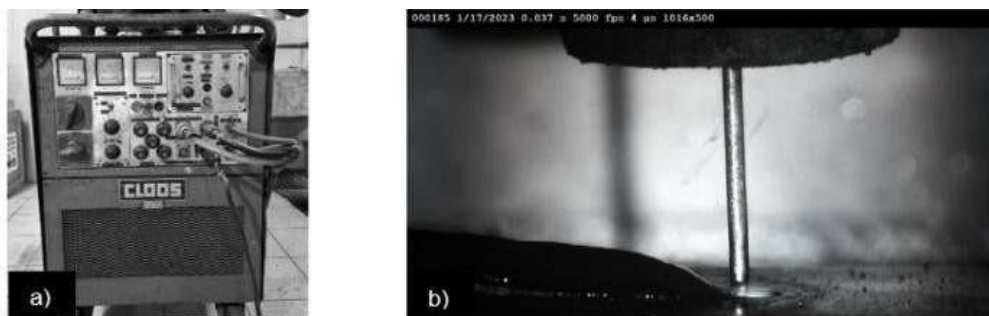


Figura 13 – Experimento com fonte tiristorizada. Fonte: O autor. Em a) Fonte CLOOS; b) Soldagem em condição de buried arc [45]. Filmagem disponível em: <https://youtu.be/3kJyAdYBYY>

Apesar das vantagens do MIG/MAG AP mencionadas anteriormente, vale notar que sua utilização, embora abrangendo uma gama de aplicações na indústria, ainda apresenta certas limitações inerentes ao MIG/MAG convencional. Por exemplo, a logística para o uso de cilindros de gás para reparos em campo representa um desafio, como é o caso na indústria de petróleo e gás, quando comparado com processos de soldagem como o *Eletrodo Revestido* ou o Arame Tubular. Em uma situação dessas, ainda cabe destacar que a presença de escória também proporciona a estes dois últimos processos um desempenho aprimorado contra contaminantes superficiais, sob certas condições. Contudo, espera-se que a maior produtividade geral e os custos mais baixos do MIG/MAG AP, considerando, a facilidade de soldar em chanfros mais estreitos (menos volume de material necessário) e o fato de não precisar remover escória, sejam um incentivo para superar as possíveis limitações citadas. Além disso, apesar de o Eletrodo Revestido e o Arame Tubular ainda serem amplamente utilizados devido à sua robustez em condições externas com vento, é esperado que a altura extremamente curta do arco do MIG/MAG AP em *buried arc* funcione tão bem quanto. De qualquer forma, mais estudos são necessários a esse respeito.

3.4.2 Características das variantes de controle, de acordo a DVS

Considerando que, para caracterizar o *DynaFlex-Arc*, é utilizada a classificação da DVS, sempre buscando alinhamento com as definições da AWS, segue abaixo uma contextualização desta classificação.

Tendo em vista que, as variantes de controle MIG/MAG que promovem a alta performance são enquadradas pela DVS devido, principalmente, à ampliação das faixas operacionais de tensão e corrente, como mostrado no gráfico da Figura 14, com o objetivo de promover melhorias de controle de processos, taxas de deposição mais altas e geometrias de soldas específicas [5].

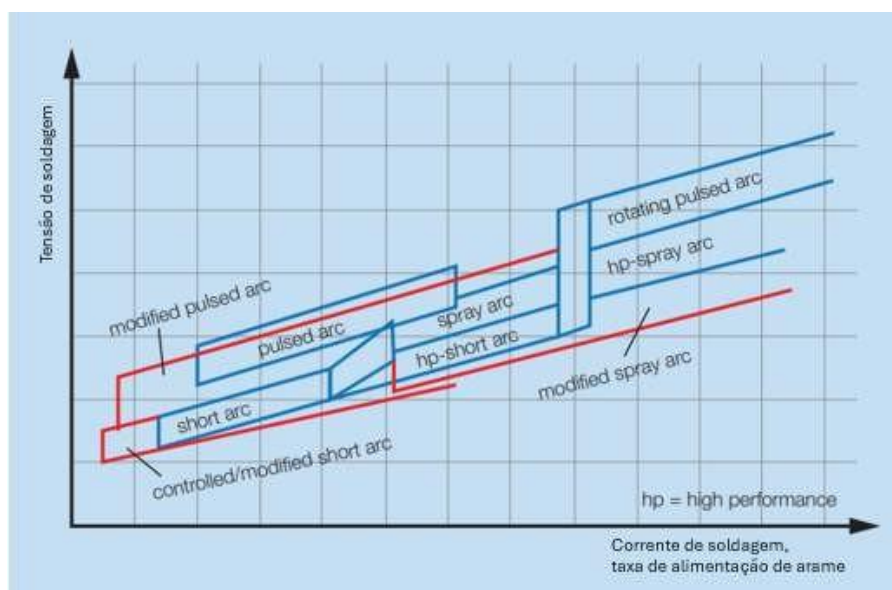


Figura 14 - Gráfico destacando nas linhas em vermelho a ampliação das faixas de operação promovidas pelas variantes de alta performance do processo MIG/MAG [5].

Ou seja, mesmo tipos de arco já fundamentados pela literatura, como, por exemplo: arco curto, arco misto, arco *spray* e arco pulsado, podem ser classificados como alta performance, desde que, controlados eletronicamente e com o objetivo de alterar as características do processo. Assim, com base nas inovações de cada variante, foram definidas dez famílias, conforme Boletim Técnico DVS 0973 [5] e *DVS media Process Control Variants for GMAW* (poster de variantes disponível no ANEXO A), elencadas, com exceção da *Modified spray arc* que será abordada no próximo Subitem, e brevemente comentadas a seguir:

Controlled/modified short arc, consiste em variantes do processo MIG/MAG que utilizam o controle da fase de arco e de curto-circuito de forma balanceada e separada. Fazem parte desta família: *ColdWeld*, *ControlWeld*, *coldArc*, *rootArc*, *CMT Advanced*, *CMT*, *LSC*, *WiseRoot*, *WiseThin*, *newArc*, *SpeedArc*, *SpeedCold*, *SpeedRoot*, *SpeedUp*, *ColdMIG*, *HighUP*, *SSA*, *FOCUS.ARC*, *POWER.ARC*, *CMA*, *HC MAG* e *pipeSolution*.

Low-spatter short arc, variantes baseadas em um sistema de controle que mantém a corrente abaixo de valores críticos no momento de reignição do arco. Fazem parte desta família: *ControlWeld, coldArc, rootArc, CMT Advanced, CMT, LSC, WiseRoot, newArc, SpeedCold, SpeedRoot, ColdMIG, SSA, CMA, HC MAG e pipeSolution*.

Energy-reduced short arc, variantes especialmente parametrizadas para garantir um baixo aporte térmico. Fazem parte desta família: *ColdWeld, coldArc, rootArc, CMT Advanced, LSC, WiseThin, SpeedCold, ColdMIG, SSA, FOCUS.ARC, POWER.ARC, CMA e HC MAG*.

High-performance short arc, variantes em que a taxa de alimentação de arame são elevadas, em faixas que seriam características de arco misto, graças à determinados controles (a DVS deixou aberta a definição devido à quantidade de formas de controle aplicadas, utilizando como referência a transferência metálica) sobre a corrente durante as fases de curto-circuito e de arco. Fazem parte desta família: *CMT, newArc, SSA e pipeSolution*.

Pulsed arc, variantes em que a forma de onda de corrente é bem controlada, no sentido de promover uma formação definida da gota e transferência específica. Fazem parte desta família: *SpeedPulse, SpeedUP, HighUP, PowerPulse, coldArc puls, rootArc puls e Soft Silence Puls*.

Modified pulsed arc, variantes em que os parâmetros do pulso são combinados com outros efeitos para que então características específicas da soldagem sejam otimizadas. Fazem parte desta família: *CMT Pulse, PMC, SpeedPulse, SpeedUP, FOCUS.PULS, ForceArc puls, Cold Double Puls, Soft Silence Puls e Spray Modal*.

Alternating current process, variantes que atuam com mudanças controladas da polaridade durante certas fases da soldagem, favorecendo a introdução de menos energia e diluição. Fazem parte desta família: *ColdWeld, CMT Advanced e HC MAG*.

Combined process variants, variantes que combinam parâmetros de forma controlada a fim de apresentar características especiais. Fazem parte desta família: *CMT Advanced, CMT Pulse, SpeedUP, HighUP, ProSWITCH, Superpuls, Advanced SeQuencer, Cold Double Puls e SeQuencer*.

Cyclic wire movement, variantes que a alternância do sentido e da velocidade de alimentação de arame promovem um melhor controle da transferência metálica e menor aporte térmico. Fazem parte desta família: *CMT Advanced, CMT, CMT Pulse, SpeedUP e PowerPulse*.

Face ao exposto, apesar de bastante resumido e, independente da forma de controle, é possível observar que há uma divisão entre as transferências por contato e sem contato (mesmo que, em alguns casos possam ocorrer eventuais contatos, mas sem o estabelecimento de uma transferência significativa de material, conforme abordado no Subitem 3.3.2), além de que, as características que definem cada família são bastante específicas, motivo pelo qual alguns processos estão incluídos em mais de uma. Logo, devido à abrangência das variantes com transferência metálica por contato, algumas delas, operadas predominantemente com esta característica, são comentadas nos próximos parágrafos, com o objetivo de ilustrar melhor os efeitos que estes avanços tecnológicos provocam no arco elétrico e, conseqüentemente, no refinamento da transferência. Em seguida, para facilitar o encadeamento de ideias, no próximo subitem são abordadas variantes com característica de transferência sem estabelecimento de ponte metálica.

Antes de algumas das principais destas variantes serem abordadas, a fim de destacar as principais características que estabelecem esta aproximação entre elas sob o ponto de vista tecnológico, especialmente no que se refere à arquitetura de fonte e à controlabilidade do processo, convém chamar a atenção do leitor para que seja feita uma observação criteriosa sob estes aspectos. Afinal, embora por vezes novas tecnologias sejam promovidas como vantajosas por alguns fabricantes, nem sempre são convertidas em resultados com a eficiência esperada. Além disso, algumas variantes, que, apesar de os fabricantes não divulgarem informações mais detalhadas sobre as formas pelas quais a controlabilidade do arco é exercida, também merecem serem mencionadas, com o objetivo de reforçar a abrangência deste trabalho.

Quanto às variantes com transferência por contato, inicialmente, devido a sua alta controlabilidade, o processo *CMT Advanced* pode ser considerado bastante representativo neste cenário [55, 56]. Outrossim, estudos conduzidos por Galeazzi et al. [57], em que foram comparados os processos MIG/MAG convencional ao MIG/MAG com tecnologia *CMT* (padrão, *Advanced* e *Pulse*), aplicados à manufatura aditiva de paredes delgadas. Ao final, os resultados obtidos com o *CMT Advanced* foram destaque em relação aos demais. Foi utilizado arame AISI 420, material de base ASTM 36, gás de processo 95% Ar, 3% CO₂ e 2% N₂, os parâmetros utilizados foram os seguintes: $V_a = 1,7$ m/min, $V_s = 30$ cm/min. Os transientes elétricos podem ser conferidos nos oscilogramas da Figura 15, onde é possível verificar a

controlabilidade das variantes *CMT* em face do *MIG/MAG* convencional. Inicialmente, quando analisados o *MIG/MAG* convencional e o *CMT*, as diferenças entre a precisão das frequências de destacamento, além de uma diferença na potência instantânea no momento de reabertura do arco 75% menor no processo *CMT*. Na sequência, é possível observar a forma de onda do processo *CMT Pulse*, que reflete dois tipos de transferência metálica, uma transferência em curto-circuito (devido à alimentação dinâmica) e a outra em modo de transferência pulsado (em que o destacamento ocorre durante a corrente de base). Em última análise, é possível observar o *CMT Advanced*, em que a variação de polaridade é aplicada e, nas duas fases ocorre transferência por curto-circuito associada ao movimento de recuo do arame.

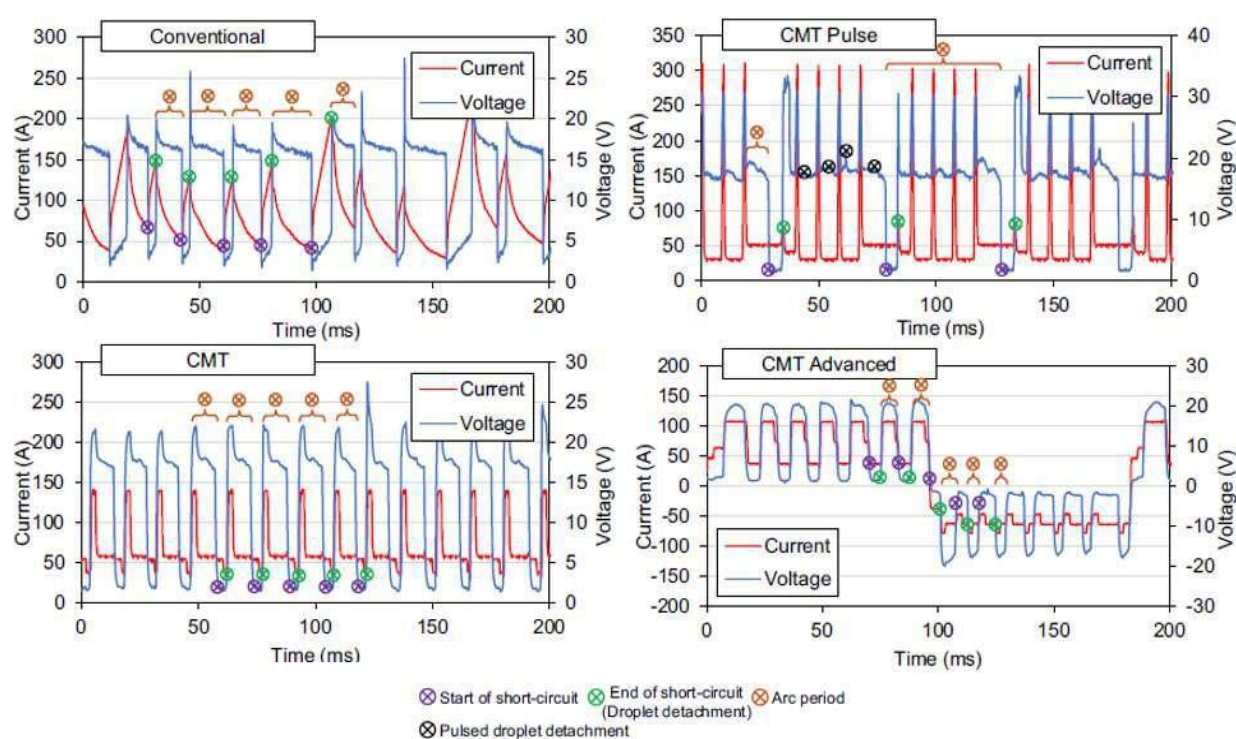


Figura 15 - Resultados obtidos por Galeazzi [22].

Outro exemplo que pode ser mencionado é o *RapidArc*. Diferente do *MIG/MAG* pulsado, no *RapidArc* foram implementadas mudanças na bateria de capacitores e nas capacidades de indutância [58]. Estes fatores contribuíram para que a transferência metálica pudesse ser realizada com uma controlabilidade mais apurada sobre a transferência metálica em curto-circuito pleno (não incipiente), com um arco mais curto, menos respingos e com maiores velocidades de soldagem [59, 60],

conforme ilustrado na Figura 16. Devido à sua alta controlabilidade, aliada à característica de *short arc* e ao modo pulsado, o fabricante recomenda o seu uso até mesmo em soldagens fora de posição.

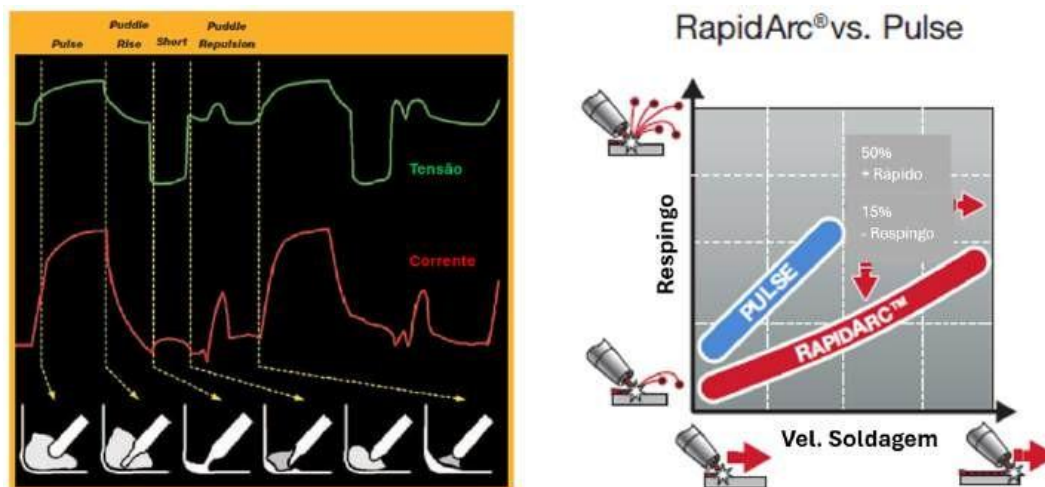


Figura 16 - Características do *RapidArc*, quanto à forma de controle da transferência metálica e a faixa de operação [59, 60].

De acordo com resultados de experimentos comparativos realizados por Rajan [61], é possível observar diferenças mais detalhadas entre os oscilogramas de uma soldagem com o MIG/MAG pulsado e outra com o *RapidArc*, conforme Figura 17.

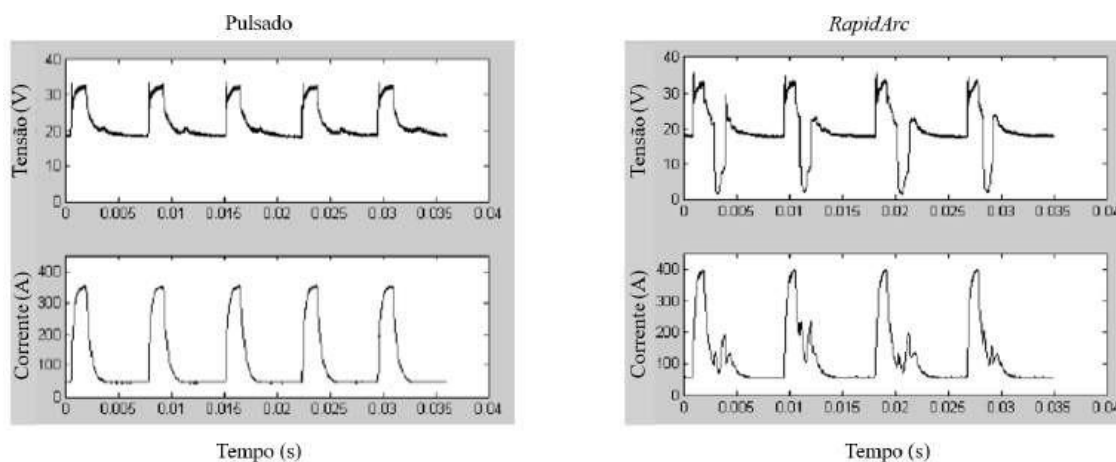


Figura 17 - Comparação entre o MIG/MAG pulsado e o *RapidArc* [61].

Graças a uma função chamada de *plasma boost*, a transferência metálica na fase de separação entre o eletrodo e a gota fundida ocorre de uma forma mais estável e regular. Em outras palavras, um leve jato plasma, programado, empurra a poça de fusão, garantindo sua separação em relação à ponta do eletrodo, de tal forma que a

formação da próxima gota possa ocorrer sem interferências de uma possível superfície irregular da poça. Além disso, o sistema chamado *UltimArc*, não detalhado por parte do fabricante, tampouco sua investigação faz parte do escopo desta tese, completa o refinamento do processo, diminuindo o nível de respingos, conforme pode ser visto na Figura 18.

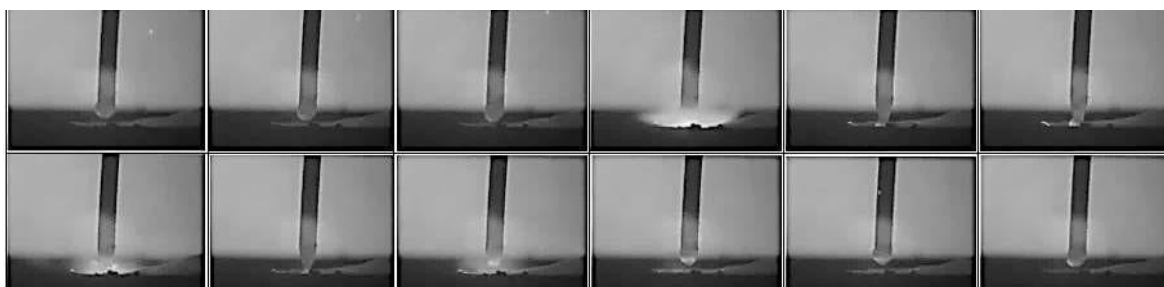


Figura 18 - Evolução de uma transferência metálica com o *RapidArc* [62].

Assim, estas inovações permitem a realização de soldas em chapas relativamente finas, conforme dados apresentados na Figura 19.

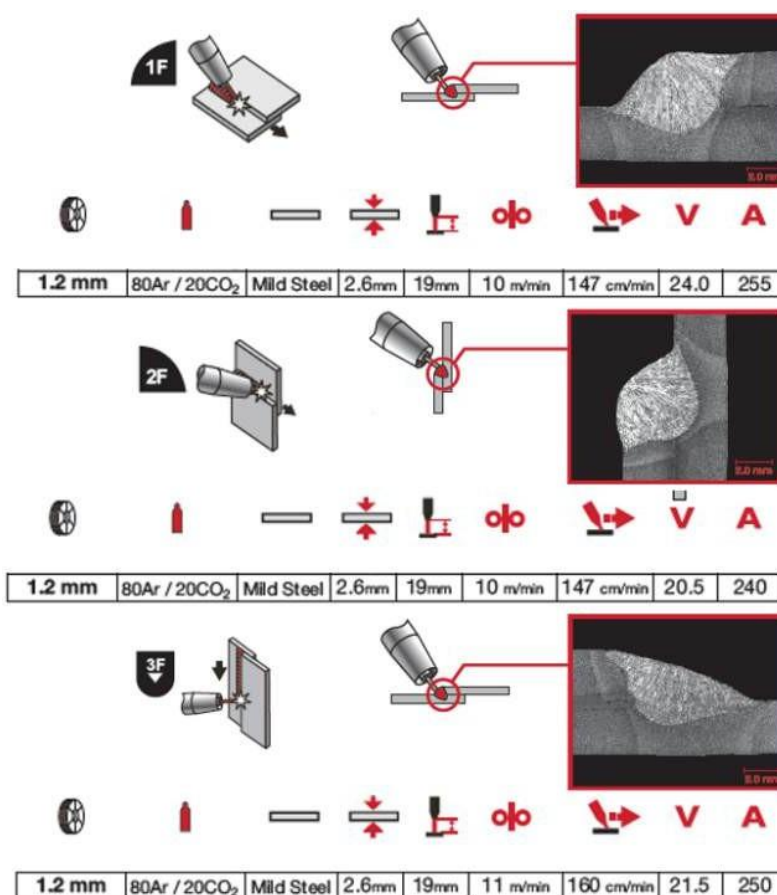


Figura 19 - Soldas feitas com o *RapidArc* [60].

Conforme descrito pelo fabricante [60], esta variante abrange uma faixa de espessuras de chapas, que vão desde 1,5 mm até 12,7 mm. Esta flexibilidade de aplicações é promovida, inclusive, devido ao controle preciso do comprimento do arco. Um exemplo desta flexibilidade foi demonstrado por Dutra et al. [7], conforme Figura 20, em que é possível observar um comportamento de transferências sem contato.



Figura 20 - Atuação do *RapidArc* [7].

Em seguida, pode ser citado como exemplo de inovação como variante de controle, o MIG com Alimentação Dinâmica (MIG-AD), que consiste, principalmente, num aumento da controlabilidade da transferência por curto-circuito, devido à otimização da forma de onda de corrente e da precisão do destacamento da gota via movimentação cíclica mecânica de avanço e recuo do arame [63]. O desenvolvimento desta variante por parte do LABSOLDA, foi motivada pela necessidade de remodelar formas de onda de corrente, que, do ponto de vista comercial das empresas que fornecem este tipo de solução, geralmente são determinadas por equações sinérgicas, que não permitem alterações em seu formato. Experimentos realizados por Pereira et al. [64] demonstraram que o sistema de controle desenvolvido para esta variante permite modelar a forma de onda de corrente de forma escalonada, variando seus períodos e suas amplitudes, conforme Figura 21, aumentando assim, a controlabilidade sobre a altura do arco elétrico, a formação de material transferido e, conseqüentemente, a formação de respingos e a geometria da solda.

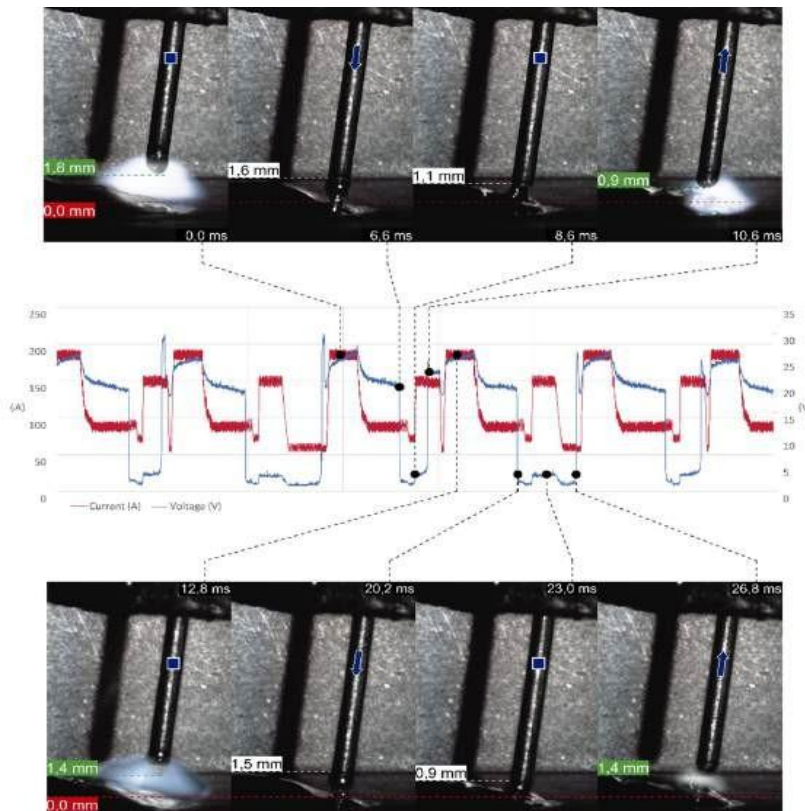


Figura 21 - Forma de onda de corrente modelada e seus efeitos [64].

Continuando, cabe comentar sobre a variante denominada Curto-Circuito Controlado (CCC) [42], com destaque para a forma de onda da corrente, a qual foi desenvolvida e patenteada pelo LABSOLDA [65], e cuja controlabilidade é baseada na monitoração da resistência do contato, a partir da qual são gerados parâmetros para determinar o início da ponte metálica e a iminência do destacamento. Assim, com estes dados, são estabelecidos pontos de alteração dos valores de corrente, em função de uma modelagem já pré-determinada, a fim de controlar a onda de corrente, objetivando otimizar a transferência metálica, conforme Figura 22 [66].

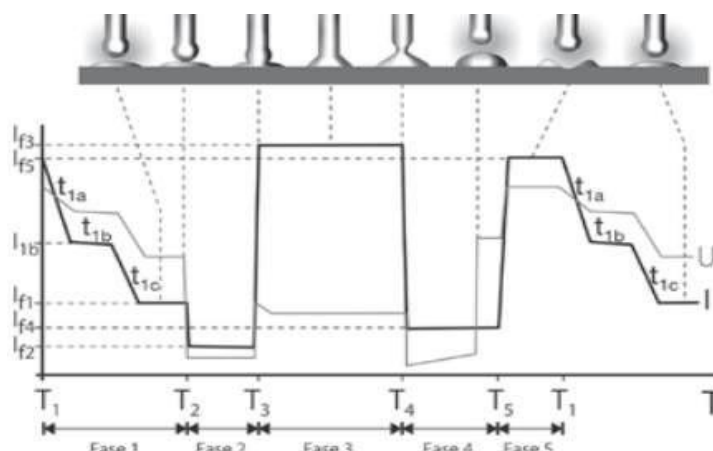


Figura 22 - Oscilograma esquemático do CCC [66].

Experimentos realizados por Filho et al [67], demonstraram as diferenças entre o curto-circuito convencional, o STT e o CCC, conforme Figura 23.

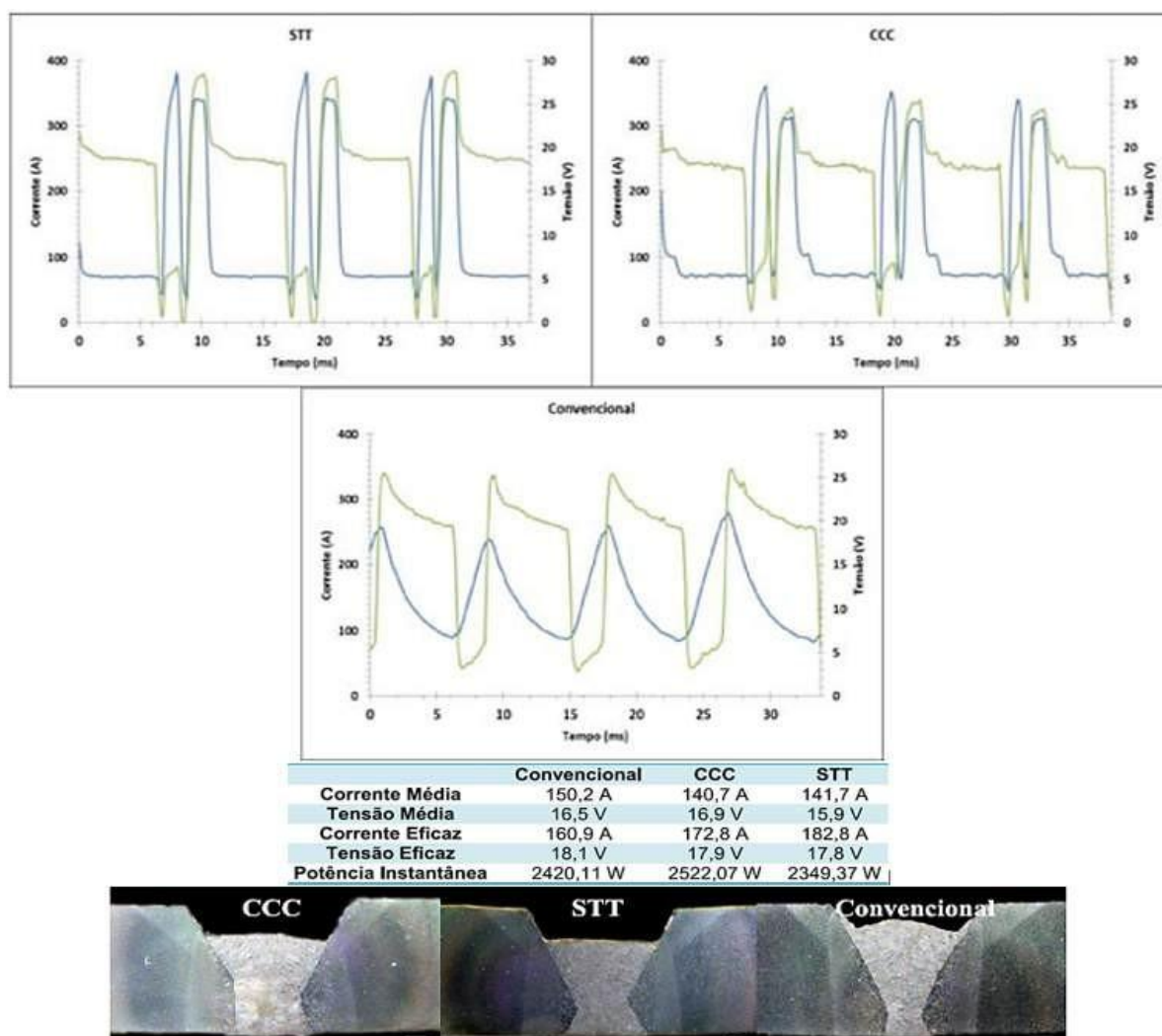


Figura 23 - Resultados dos experimentos obtidos por Filho et al. [67]

Para finalizar este Subitem, considerando a relação de seu trabalho como parte fundamental desta tese, convém abordar o artigo publicado pelo prof. Dutra [35], mais especificamente, quanto a parte que trata da relação entre os efeitos indutivos e os fatores que atuam na transferência metálica. Em seus experimentos, Dutra demonstrou, utilizando uma fonte operando em modo de tensão, em uma operação de soldagem MIG/MAG por curto-circuito, que é possível melhorar o controle da forma de onda de corrente ajustando os efeitos indutivos sobre as variações de di/dt de subida e de descida - cada um deles de forma independente - via parametrização eletrônica da fonte de soldagem, conforme oscilogramas e histogramas apresentados na Figura 24. Assim, é possível melhorar a estabilidade do arco, modificar a

frequência de destacamento e, conseqüentemente, alterar o tamanho da gota, a fim de otimizar a transferência metálica, sem a necessidade de utilizar soluções “miraculosas”, sob nomes comerciais, oferecidas pelo mercado.

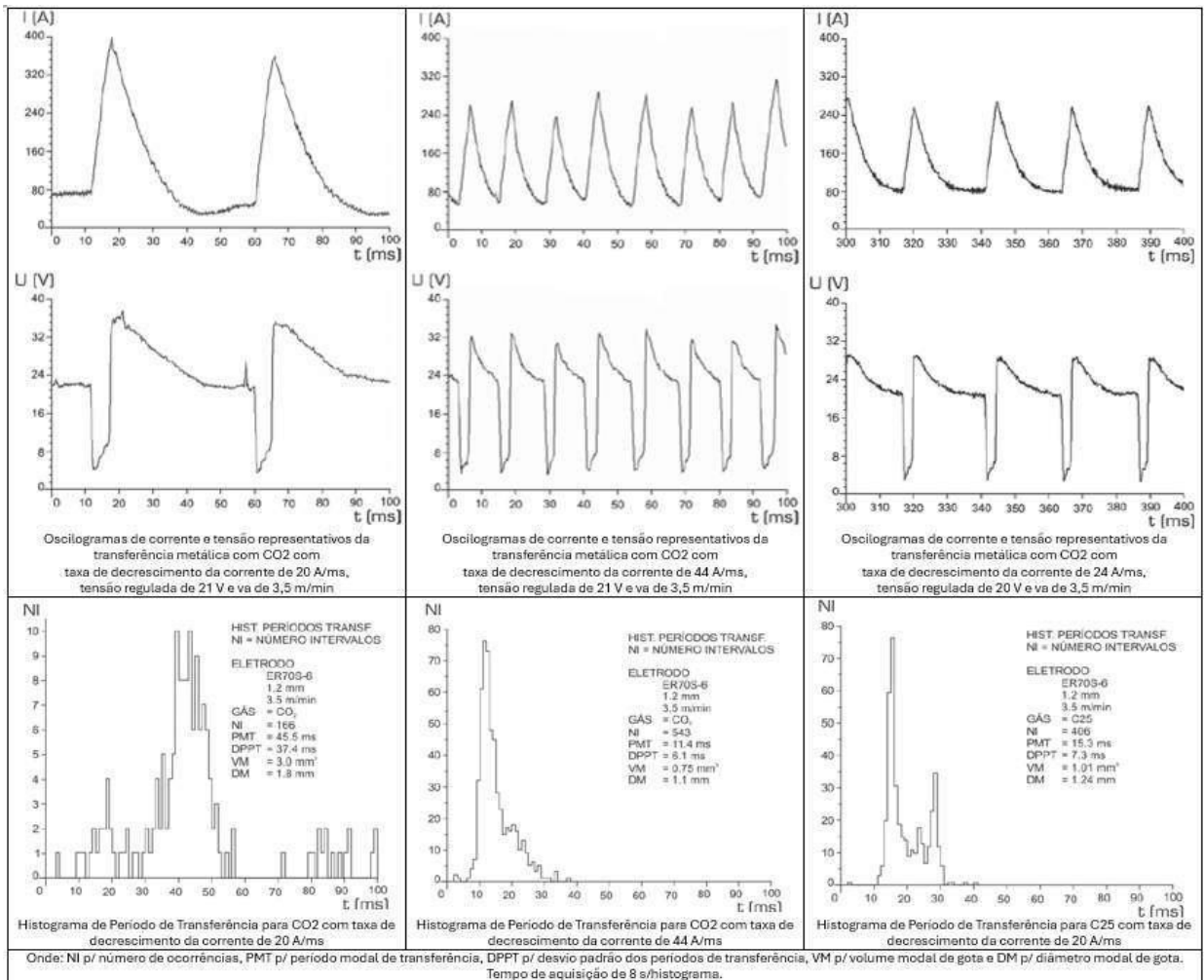


Figura 24 - Resultados dos experimentos realizados por Dutra [35].

3.4.3 Características das variantes *Modified Spray Arc*

Esta família de variantes é descrita principalmente pela atuação controlada de um arco curto com transferência metálica em *spray* de elevada pressão, promovida por uma maior densidade de energia [5], diferente de uma condição de arco mais longo e com menor densidade de energia, promovida em uma transferência em *spray* realizada por um processo MIG/MAG convencional. De acordo com a DVS, essa

condição de arco curto é alcançada por meio de controles “especiais” das características estáticas e dinâmicas das fontes de soldagem. Observa-se, neste caso, portanto, o caráter mais generalista adotado pela DVS em sua descrição, de modo a abranger todas as formas de operação das fontes (independente, se em modo de corrente ou de tensão), que viabilizem a atuação deste modo de transferência. Assim, utiliza-se como critério de classificação apenas o modo de transferência metálica, deixando para cada fabricante detalhar as características de seus conjuntos de *hardware* e de *software* empregados.

Do ponto de vista deste autor, agora tratando de maneira mais específica a definição, as formas de controle podem ser configuradas com base em uma fonte, quando operando em modo de tensão, baseada em uma dinâmica robusta e com uma otimização do chamado controle interno da fonte. Destaca-se que, este último refere-se ao comportamento de estabilização do arco, em uma fonte operando em modo de tensão, onde, devido às características elétricas internas, estáticas e dinâmicas, o circuito elétrico tende a se manter em uma faixa de corrente ideal a fim de manter estável a transferência metálica em função da tensão e da velocidade de alimentação de arame programados. Em função destas características, o resultado esperado é o de uma solda com mais penetração e um perfil geométrico delgado (maior razão de aspecto, P/L), recomendado para juntas de filete em T e juntas de topo com chanfros em menores ângulos.

Esta classificação é dada, a exemplo do *DynaFlex-Arc*, não apenas devido às características estáticas e aos componentes eletroeletrônicos, mas principalmente à dinâmica das variações das variações de corrente da fonte, respondendo de maneira eficiente a ocorrências iminentes de instabilidade e mantendo o processo em um regime operacional estável. Em outras palavras, essa configuração permite que o processo opere em correntes mais altas e velocidades de soldagem maiores, em relação ao *spray* convencional, promovendo uma transferência metálica em *spray* em *streaming*, conforme experimentos conduzidos por Dutra et al. [7].

Nesta família, estão classificadas as variantes sob os seguintes nomes comerciais: *RapidWeld*, *ForceArc*, *Puls Controlled Spray Arc (PCS)*, *NewArc*, *SpeedArc*, *DeepArc*, *FOCUS.ARC*, *Rapid MIG/MAG Technology (RMT)* e *High Penetration Speed (HPS)*.

Na sequência são apresentados exemplos destas variantes, com a expectativa de demonstrar as principais características entre a atuação do modelo de sistemas baseados em controle de corrente e o em controle de tensão.

Como primeiro exemplo, pode-se apontar o *RapidWeld*, que é caracterizado por um arco curto, com transferência metálica por *spray* em *streaming*, com condições de soldar chapas espessas a partir de 6 mm. O fabricante não descreve a forma de controle, apenas comenta que “controles especiais” e “parâmetros elétricos especiais” permitem altas velocidades de alimentação de arame [68, 69, 70].

Seguindo com os exemplos, o *Pulse Controlled Spray Arc (PCS)* que, de acordo com a descrição do fabricante [71, 72], consiste em um processo que combina as vantagens do modo pulsado e do modo *spray*, com uma transição suave entre eles, conforme representação esquemática apresentada na Figura 25 [73]. Também pode ser descrito como um processo pulsado modificado, que opera em uma faixa de potência mais elevada a fim de promover uma transferência em *spray* com arco curto. Assim, correções dinâmicas (não detalhadas pelo fabricante) viabilizam a adaptação de uma modulação de pulso para uma transferência em *spray* [74].

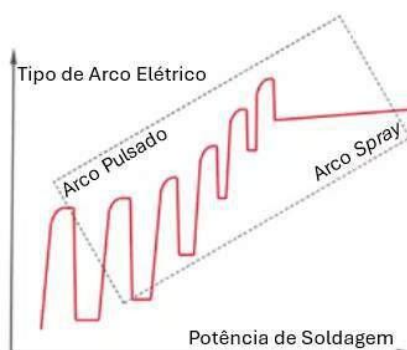


Figura 25 –Transição entre o Arco Pulsado e o *Spray* Arc no processo *PCS* [73].

Um exemplo de oscilograma, para demonstrar o comportamento das curvas de corrente e tensão desta variante pode ser conferido na Figura 26 [75].

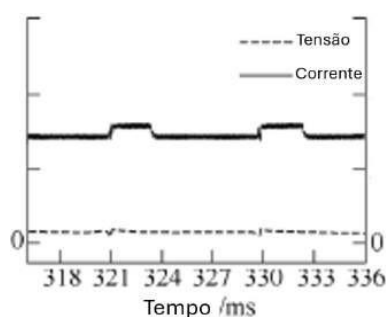


Figura 26 - Exemplo de oscilograma de uma soldagem com o *PCS* [75].

As diferenças entre uma transferência em modo pulsado e o *PCS* e o perfil da solda realizada podem ser conferidas nas Figuras 27 e 28, respectivamente. Na Figura 27 é possível observar que a distância entre a poça de fusão e a ponta fundida do arame segue uma tendência predominantemente curta com uma transferência em *spray streaming*, já o modo pulsado apresenta uma distância maior entre a ponta do arame e poça de fusão, o que permite a formação de gotas maiores e bem definidas.

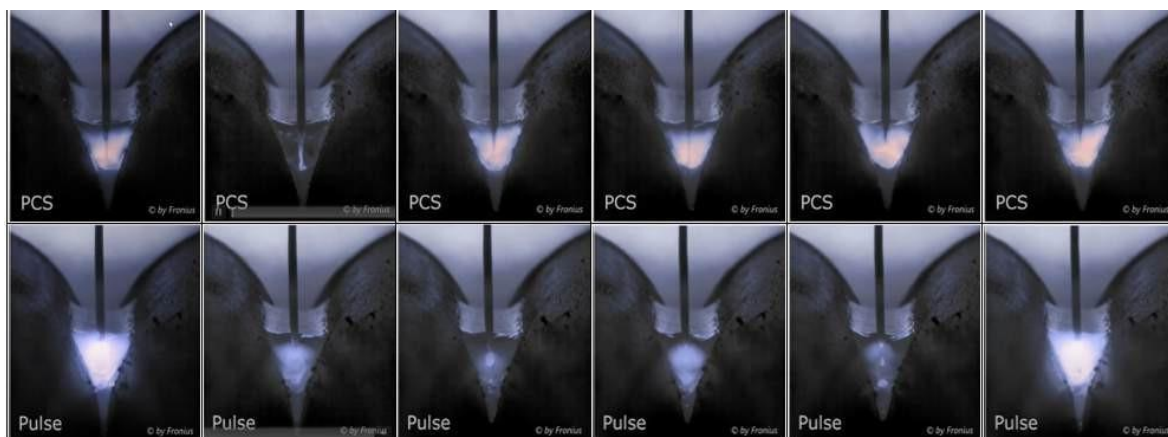


Figura 27 - Diferenças entre os modos pulsado e *PCS* [72].

Quanto às macrografias, é possível observar, na Figura 28, que as características da transferência metálica do *PCS* promovem uma pressão maior do arco e, conseqüentemente, mais penetração com menos energia em relação ao Pulse, seguindo, assim, a eficiência esperada dos processos MIG/MAG AP.

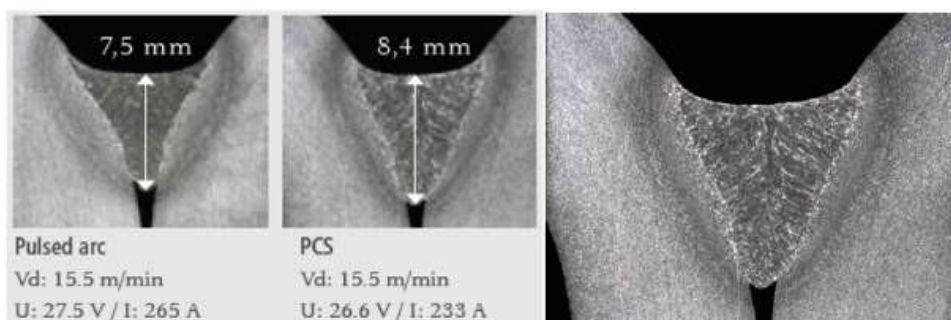


Figura 28 - Perfil das soldas realizadas, em ambas, com velocidade de alimentação de arame (Vd) de 15,5 m/min, no Pulsed com tensão de (U) de 27,5 V e corrente (I) de 265 A e no *PCS* com U de 26,6 V e I de 233 A [74].

A próxima variante abordada é o *SpeedArc*. Trata-se de um processo sinérgico que atua em faixas de operação com transferência em *spray* em *streaming*, mantendo o arco extremamente curto. Esta característica é devida à capacidade de controle dinâmico [76, 77, 78], que permite alcançar ótima penetração com estabilidade, conforme Figura 29. Dentro do pacote do *SpeedArc*, o fabricante também oferece uma versão “melhorada”, o *SpeedArc XT*, com as mesmas características favoráveis à alta penetração, porém, com “excepcional” (termo conforme fabricante) estabilidade via controle dinâmico (infelizmente, o fabricante não passa detalhes sobre este controle).

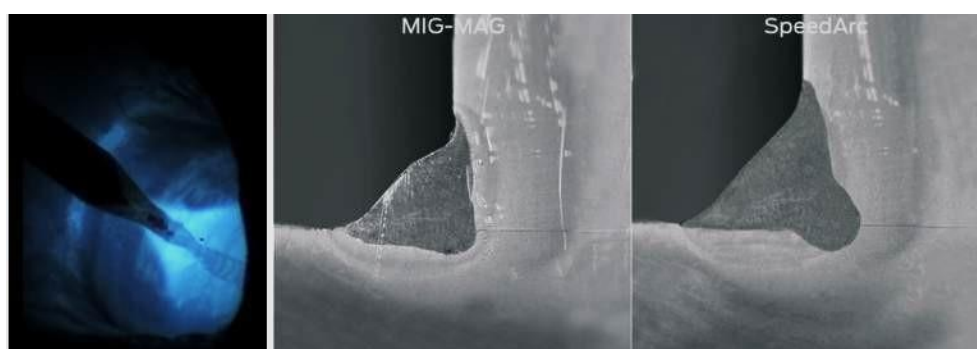


Figura 29 - Características do processo *SpeedArc* [76, 79] (o fabricante não informa os parâmetros utilizados como corrente ou tensão, justificado por ser um processo em que os principais parâmetros estão embutidos nas curvas sinérgica memorizadas na fonte).

Vídeo disponível em:

<<https://www.lorch.eu/en/solutions/innovations/speed-processes/speedarc-xt>>

Contudo, esta variante, assim como o *PCS*, opera em faixas de potência que viabilizam diferentes formas de transferência metálica. Assim, a DVS também classificou esta variante na família “*Controlled Short Arc*”, pois, conforme comentado anteriormente, o critério de classificação da DVS é a transferência metálica, e não as formas de controle das fontes. Assim, diferente de sua aplicação para alta penetração, Wu et al. [80] demonstrou que, graças a sua alta controlabilidade do arco elétrico, é possível realizar soldagem aplicada à manufatura aditiva com o *SpeedArc XT*. Em seus experimentos, Wu demonstrou que é possível soldar em uma condição de arco curto, porém, sem ocorrências de curto-circuito, conforme oscilograma e parâmetros adquiridos, apresentados na Figura 30 e Figura 31 respectivamente, em que é possível constatar uma clara operação em modo pulsado.

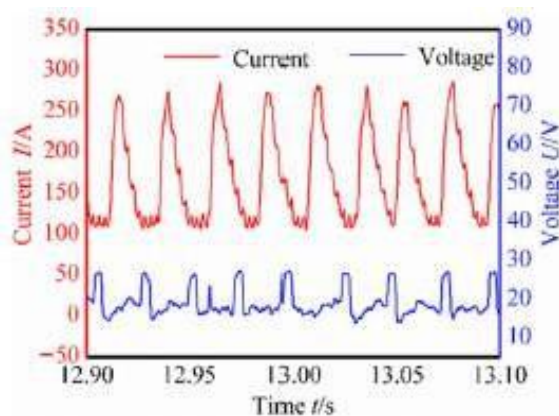


Figura 30 - Oscilograma de soldagem realizada com o *SpeedArc XT* [80].

Modo de Soldagem	Camadas	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (m/min)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Taxa de deposição (kg/h)	Potência (W)	Energia (J/mm)
Speed Arc XT	30	171	4.8	19.1	60	0.924	3266	326.6

Figura 31 - Parâmetros aquisitados nos experimentos de Wu et al. [80].

Para finalizar este Subitem, é abordado o processo *ForceArc*, que, devido às suas similaridades, serve como base para o próximo Subitem, o qual trata exclusivamente do *DynaFlex-Arc*.

De acordo com a *EWM* [81], a norma DIN 1910-4 [82], que trata da soldagem a arco sob proteção de gás, foi atualizada em 1990 no ponto que trata da transferência em *spray*, alterando a definição de “*Der Werkstoffübergang ist feinsttropfig und kurzschlussfrei.*” [83] para “*Der Werkstoff ist feinsttropfig und praktisch kurzschlussfrei.*” [82], ou seja, foi incluído o termo “praticamente isenta de curtos-circuitos”. Esta alteração foi motivada devido a estudos da época que demonstraram que também era possível operar com um arco *spray*, porém curto e firme (mais resistente a desvios causados por sopros magnéticos), utilizando uma tensão ligeiramente menor. Contudo, esta nova configuração de parâmetros, e consequentemente de alteração do arco, causava o estabelecimento de eventuais curtos-circuitos. Assim, com a evolução das fontes inversoras com uma dinâmica mais robusta e um controle digital que permite o ajuste eletrônico do efeito indutivo, ou mesmo a desativação deste em determinados momentos do processo, foi possível desenvolver versões comerciais que atendessem de maneira satisfatória determinadas aplicações na indústria.

Diante deste cenário, foi desenvolvido o *ForceArc* que, pode ser descrito como uma variante que opera em modo de transferência por *spray*, operando em faixas de tensão abaixo do usual, promovendo assim um arco mais curto (até mesmo em *buried arc*), conforme esquema apresentado na Figura 32. A poça de fusão é considerada muito estável e promove poucos respingos, pois devido à alta dinâmica da fonte a maior parte dos curtos-circuitos são evitados e, mesmo que ocorram, são rapidamente estabilizados, graças ao monitoramento em tempo real dos valores de tensão e de um controle dinâmico instantâneo da fonte, mantendo-se predominante a transferência em *spray* [81, 84, 85].

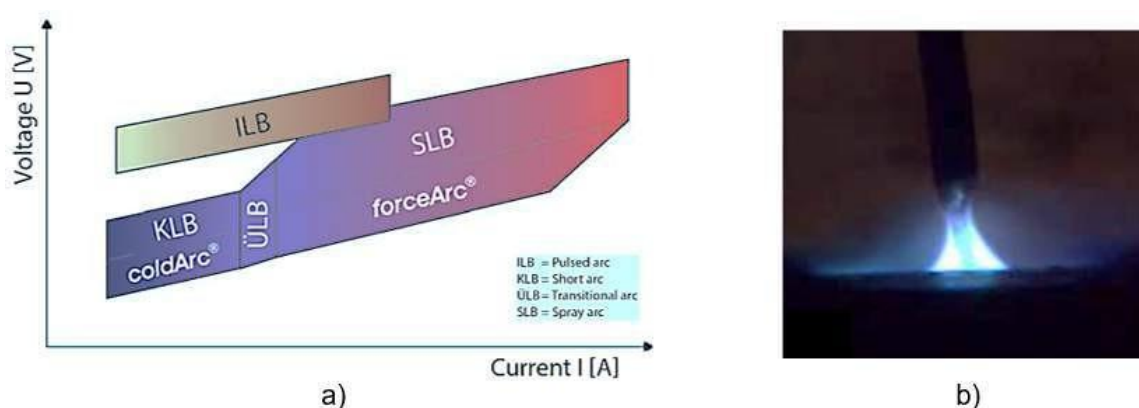


Figura 32 – Em a) Região de atuação do *ForceArc* em comparação com demais processos [86]; b) Atuação em *buried arc* [65].

Em operações com transferência em *spray* convencional é possível observar, diante de um curto-circuito, mesmo que breve, uma forte queda da tensão e um aumento súbito da corrente, condição que, sem uma dinâmica apropriada e as devidas correções impostas por parte da eletrônica da fonte, independentemente de quais sejam, podem causar respingos e até mesmo descaracterizar a transferência metálica. Este comportamento é diferente do processo *ForceArc*, que, mesmo operando com um arco tão curto, apresenta faixas estreitas de variação de tensão e de corrente, quase desprezíveis quando comparadas ao processo convencional, conforme ilustrado na Figura 33.

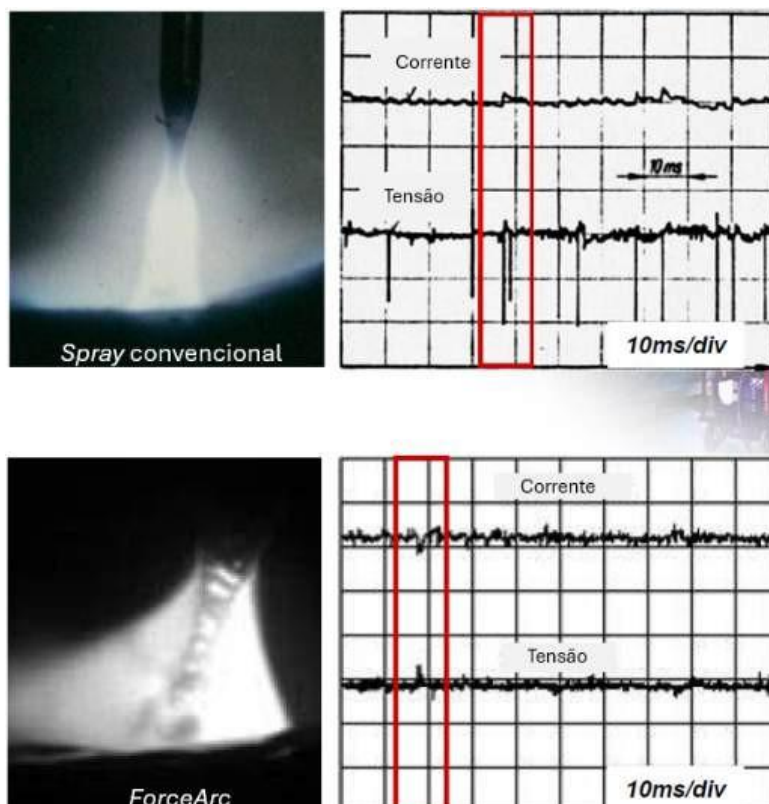


Figura 33 - Comparação entre o *Spray* convencional e o *ForceArc* [81].

Cabe destacar que, em vista da descrição apresentada acima e, conforme experimentos realizados por Chen et al. [84], este processo tem capacidade de atuar em uma condição de *buried arc*, conforme Figura 34.

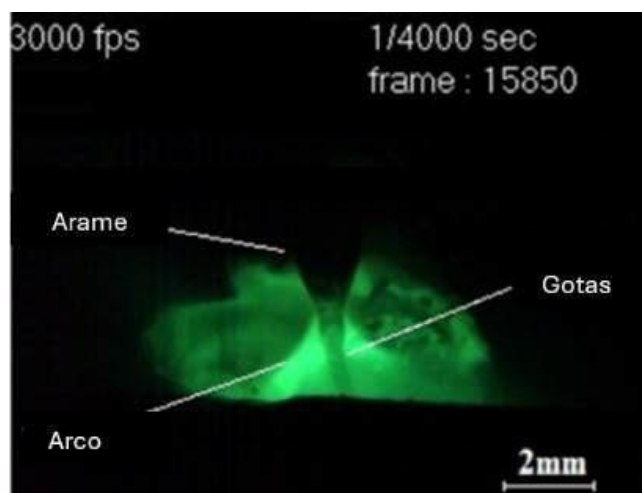



Figura 34 - Transferência metálica do *ForceArc* [84].

Assim, conforme comentado anteriormente, este processo serve para aplicação em juntas de filete em T, pois tem boa penetração devido à pressão do arco, conforme Figura 35. Apesar de os catálogos comerciais referidos não apresentarem todas as informações das soldagens realizadas, como por exemplo o valor do *stick-Out* utilizado, além de não justificarem as diferenças entre os valores médios de corrente aquisitados (lembrando que o processo opera em modo de tensão), ainda assim, as imagens das macrografias servem para demonstrar sua aplicação em juntas de filete “T”.



Processo	ForceArc	ForceArc	ForceArc	Spray convencional
Tensão média (V)	29,4	29,8	29,8	31,5
Corrente média (A)	375	302	320	285
Va (m/min)	13	11	12,5	12,5
Vs (cm/min)	0,45	0,51	0,51	0,35
Material base	Aço CrNi	Aço estrutural 260 MPa	Aço estrutural 260 MPa	Aço estrutural 260 MPa
Ø Arame (mm)	1,2	1,2	1,2 G3Si	1,2 G3Si
Gás	-	-	80%Ar10%CO ₂	80%Ar10%CO ₂
Stick-Out (mm)	-	-	-	-
DBCP (mm)	-	-	-	-

Figura 35 - Comparação de soldas em junta de filete T [81, 87],(adaptado).

Apesar de as empresas apresentarem descrições de suas versões comerciais de seus processos, ainda faltam mais detalhes sobre as inovações tanto de *hardware* quanto de *software* que justifiquem o uso de suas fontes. Afinal, determinadas formas de controlabilidade sobre o arco podem ser executadas de forma mais assertiva e menos dispendiosas, quanto às tecnologias empregadas, a exemplo dos experimentos apresentados por Dutra [35], no Subitem anterior.

3.5 DYNAFLEX-ARC

3.5.1 Breve alinhamento histórico

O *DynaFlex-Arc* foi desenvolvido para realizar, com flexibilidade e adaptabilidade (para pesquisa e desenvolvimento), a soldagem em uma configuração de *buried arc*, como mostrado na Figura 36a, para a união de chapas espessas com alta penetração, sem a necessidade de programas sinérgicos complexos ou dispositivos para monitoramento e integração de sistemas adaptativos, conforme experimentos realizados por Dutra et al. [7, 8] e Bernardi et al. [88]. Não obstante, testes realizados por Silva et al. [3], assim como estudos em andamento no LABSOLDA, demonstraram a sua flexibilidade com potenciais aplicações em soldagem orbital para reparos de tubos API em operação. Além disso, recentemente foram realizados experimentos para avaliar sua capacidade na execução de soldagem de revestimento (*cladding*), como ilustrado na Figura 36b, utilizando arame Inconel 625 na posição vertical com movimento oscilatório descendente, conforme estudo apresentado por Schaeffer et al. [89].

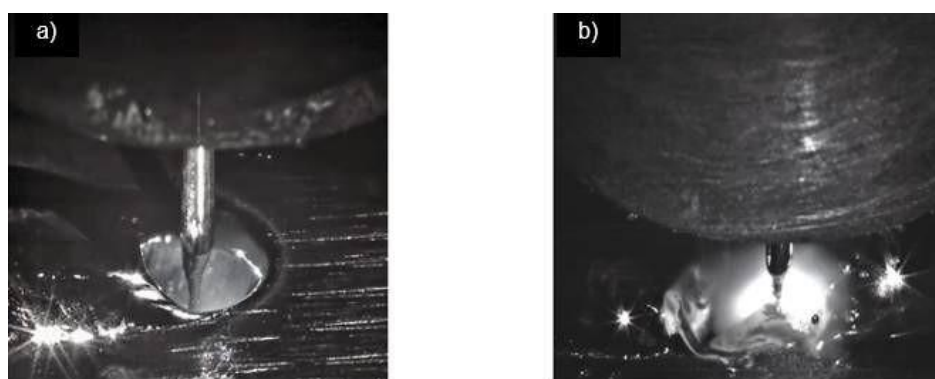


Figura 36 –*DynaFlex-Arc*. Fonte: O autor. Em a) *Buried arc* com $U = 30 \text{ V}$, $I = 430 \text{ A}$, $V_a = 15 \text{ m/min}$ e $V_s = 170 \text{ cm/min}$; b) Revestimento com $U = 32 \text{ V}$, $I = 270 \text{ A}$, $V_a = 13,5 \text{ m/min}$ e $V_s = 60 \text{ cm/min}$.

3.5.2 Antecedentes e resultados com aplicações do *DynaFlex-Arc*

Dutra et al. [7] demonstraram que, com a controlabilidade dos efeitos indutivos, é possível operar com taxas de subida de corrente (di/dt) em torno de 70 A/ms combinadas com di/dt s de descida em torno de 0,3 A/ms e, assim, realizar uma soldagem MIG/MAG AP em uma condição de *buried arc*, com uma transferência em *spray* em *streaming*, de uma maneira mais estável e com menos respingos, consequentemente uma solda com melhor qualidade. Nesta mesma linha de pesquisa, Bernardi et al. [88], Dutra et al. [8] e Silva et al. [9] demonstraram, respectivamente, o perfil da solda em uma soldagem de depósito sobre chapa, conforme Figura 37a, a possibilidade de unir chapas com 9,52 mm com chanfro em V, conforme Figura 37b, e junta de filete em "T" (sem preparação de chanfro), conforme Figura 37c.

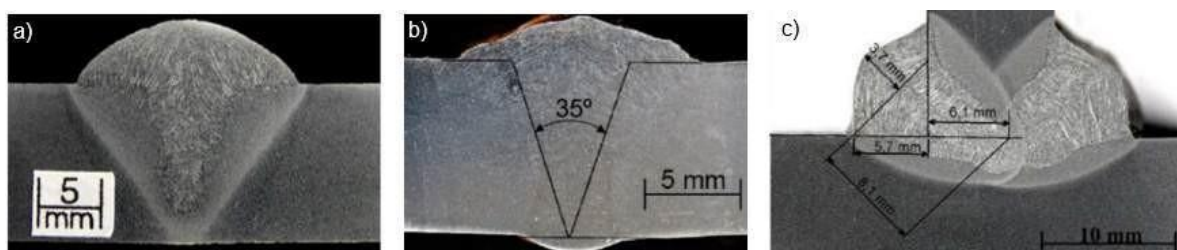


Figura 37 - Exemplos de soldas realizadas com o *DynaFlex-Arc*: Em a) Depósito sobre chapa [88]; b) Solda de topo em chanfro V [8]; c) Junta de filete em "T" [9].

Além disso, Dutra et al. [7] também realizaram experimentos, para demonstrar as diferenças causadas pelos gases de processo, com a utilização de 100% Argônio, Argônio com 8% CO₂, Argônio com 25% CO₂, Argônio com 50%CO₂, 100% CO₂ e uma mistura quaternária de Ar, He, CO₂ e O₂, utilizada no processo *Transferred Ionized Molten Energy (T.I.M.E.)*. Conforme Figura 38a, na soldagem de filete, foi possível verificar que a transferência foi mais estável com a utilização da mistura de Argônio com 8% de CO₂. Porém, na soldagem de topo, a mistura de Argônio com 25% de CO₂ e a mistura quaternária, foram as que apresentaram uma queda de corrente mais suave, após a reação frente a iminências de curtos-circuitos, conforme Figura 38b.

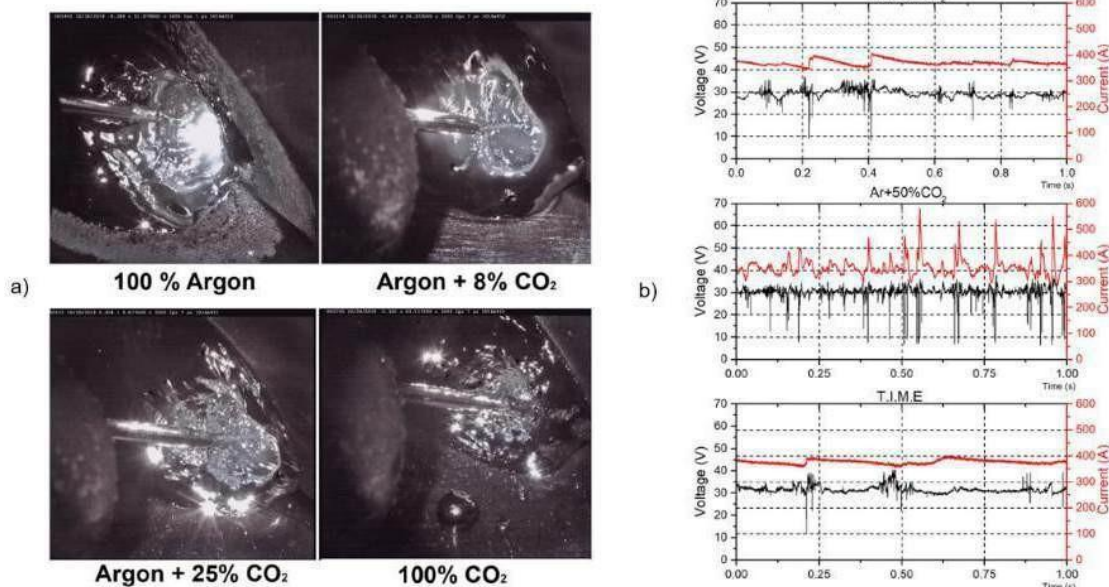


Figura 38 - Estudo do efeito de diferentes gases no processo [7]. Em a) Efeito na transferência metálica em uma junta de filete com velocidade de alimentação de 15 m/min; b) Resultado dos oscilogramas com as misturas de gases testadas na junta de topo.

3.5.3 Conceito e funcionamento

Inicialmente, o *DynaFlex-Arc* foi caracterizado pela atuação do arco enterrado na poça de fusão, ou seja, o arco permanece abaixo da linha da superfície da peça, conforme Figura 39a, formando uma poça de fusão que sofre uma elevada pressão do jato plasma e, assim, mantém uma condição de equilíbrio dinâmico metaestável, promovendo uma transferência em *spray* em *streaming*, conforme Figura 39b. Para que essa condição seja mantida, devido principalmente ao fato de a ponta fundida do arame estar muito próxima da poça de fusão, é fundamental que iminências de curto-circuitos ou mesmo curto-circuitos incipientes sejam anulados, idealmente, sem causar perturbações que possam gerar respingos ou até mesmo o fechamento da poça de fusão. Esse controle, para que esses possíveis eventos de instabilidade sejam anulados de forma eficiente, é realizado pela alta dinâmica de resposta da fonte e pela funcionalidade de modulação dos efeitos indutivos, de forma independente através dos fatores de divisão de subida (K_s) e de descida (K_d), que viabilizam combinações de valores de di/dt de subida com diferentes valores de di/dt de descida, conforme APÊNDICE A e explicações posteriores.

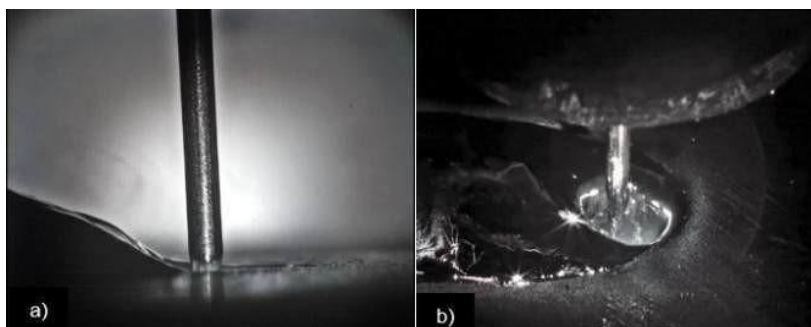


Figura 39 - *Frames* de uma filmagem em alta velocidade. Fonte: O autor. Em a) Arco atuando abaixo da superfície da peça; b) O equilíbrio metaestável da poça de fusão do *DynaFlex-Arc*.
 Filmagem disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=maRSxr2fHn8>

Além da condição de arco enterrado promover uma certa proteção à transferência metálica, principalmente em relação a possíveis perturbações por vento ou contaminações por ar atmosférico ou sopro magnético, esta condição também aumenta a penetração e ajuda a minimizar a ocorrência de defeitos de mordedura, pois dificulta o contato do arco com a junta quando comparado ao processo MIG/MAG convencional, conforme esquema apresentado na Figura 40.



Figura 40 - Atuação do arco [8]. Em a) MIG/MAG convencional; b) *DynaFlex-Arc*.

Um dos principais fatores que promovem essa condição de cratera permanente durante uma soldagem em *buried arc* é a pressão do arco [8]. Contudo, cabe destacar que, no caso do processo MIG/MAG, o momentum das gotas, quando em colisão com a poça de fusão, também contribui com o aprofundamento desta cratera e, conseqüentemente, com a penetração final da solda. Como exemplo, a fim visualizar detalhadamente o fenômeno descrito e, considerando isolar as forças que compõem exclusivamente a pressão do arco e a tensão superficial, sem interferência das forças inerciais de movimentação da gota, pode-se citar a técnica de *Keyhole* aplicada com o processo TIG, conforme Figura 41 [91]. Em suma, de acordo com Schwedersky [90], a pressão do arco tem papel relevante na penetração gerada em processos a arco elétrico, sendo causada pelo fluxo de plasma que vai concorrer com a tensão superficial do metal fundido sobre o material de base, a fim de estabelecer, de forma dinâmica, as características topográficas da poça de fusão.

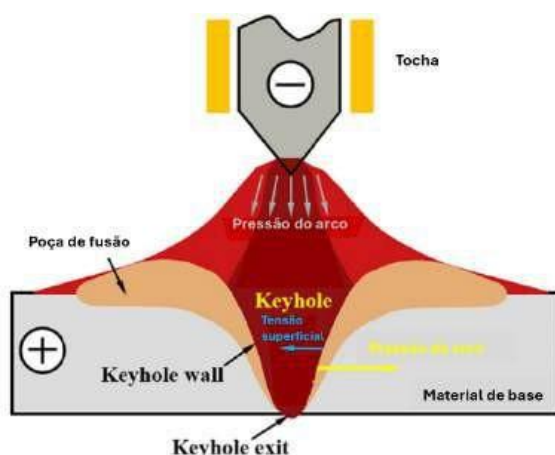


Figura 41 - Esquema do balanço de forças na formação do *Keyhole* [91].

Em uma análise, agora da perspectiva da transferência metálica do processo MIG/MAG, estudos realizados por Sato et al. [92], em que a alteração da geometria do arco elétrico, em função da distância bico de contato peça (DBCP), *contact tip to work distance (LCTWD)*, e da distância inter-cátodos (conforme experimento descrito no artigo), causou efeitos que alteraram o modo de transferência metálica executada, conforme Figura 42. Também foi possível constatar que para os mesmos parâmetros regulados, a transferência metálica passa de goticular para *streaming*, aumentando o comprimento do *stream* (filete líquido, também chamado de unduloide). Além disso, foi evidenciando que quanto maior o comprimento do filete, maior a chance de se estabelecer contato com a poça, ou seja, maior ainda a necessidade e a importância de um controle de eventos de curto-circuitos.

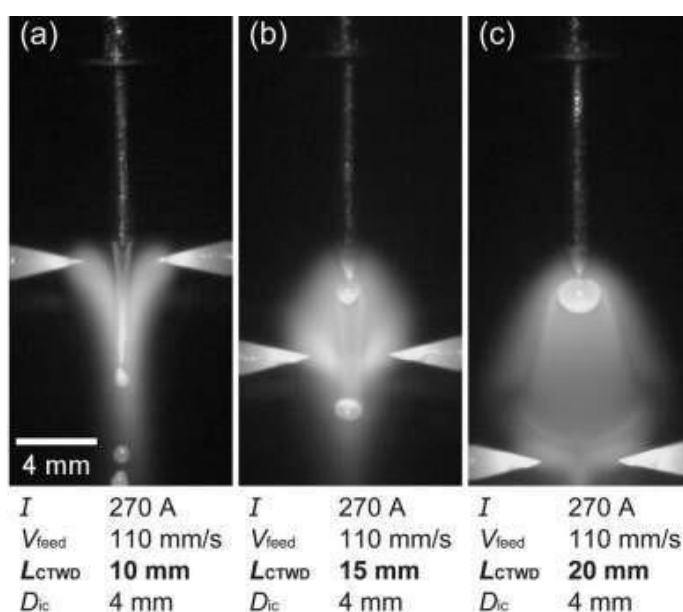


Figura 42 - Influência da DBCP sobre a transferência metálica [92].

De acordo com Hayato et al. [93], nos últimos anos, os estudos e aplicações referentes ao controle, estabilização e otimização de processos com utilização de arco enterrado, têm ganhado atenção devido à sua característica de alta penetração. Cabe acrescentar que esta característica representa benefícios tanto na soldagem de chapas grossas e juntas de filete em “T”, devido às altas correntes e velocidades de alimentação de arame, quanto aplicações em alta performance. Além disso, o processo MIG/MAG, quando utilizado em uma condição de arco enterrado, também representa uma opção para compor processos híbridos, como por exemplo, em atuação com laser, com o objetivo de promover penetrações ainda maiores [94]. Logo, questões relacionadas à pressão do arco, intrinsecamente ligadas à alta penetração, como os defeitos gerados por *humping* e *burn through*, que basicamente podem ser evitados com a ajustagem correta de parâmetros, seguem como objeto de estudos em experimentos relacionados ao *buried arc* [53, 54, 95].

Neste ponto, cabe uma menção especial ao fenômeno de *humping*, pois é um dos defeitos geométricos mais comumente observados em altas velocidades e altas correntes de soldagem. Bradstreet [96] foi o primeiro a documentar esse defeito em cordões de solda com transferência metálica em *spray*, sugerindo que o defeito é fortemente influenciado pela presença de oxigênio durante a soldagem. Outros autores como Savage [97], Dutra [8] e Wang [98] mencionam a alta pressão do arco de soldagem, que provoca o alongamento gradual da poça de fusão e o movimento forçado do metal líquido na direção oposta à da soldagem, como fatores responsáveis pelo defeito.

Diante do exposto, o *DynaFlex-Arc* se estabelece com um arco em uma condição extremamente crítica, oferecendo um risco alto e constante de ocorrência de curtos-circuitos. Para que esta condição seja possível, é necessário aplicar técnicas e tecnologias para manter a estabilidade da poça. Uma forma para isso é utilizar uma fonte de soldagem em modo de comando de tensão com um controle dos efeitos indutivos que garantam, na iminência de um evento de curto-circuito inesperado, o aumento rápido da corrente seguido de uma redução suave à condição de trabalho parametrizada [7, 99]. Os ajustes destes efeitos indutivos são programados na fonte de forma independente, os efeitos indutivos sobre as taxas de subida de corrente são delimitados através da parametrização do fator K_s e sobre as taxas de descida de corrente através do fator K_d .

A parametrização destes é feita com valores adimensionais em uma escala que vai de 1 a 600 com resolução unitária inteira, considerando que 1 representa o efeito total da indutância disponível na ponta do circuito elétrico e 600 representa o menor efeito indutivo, tendendo a zero, conforme detalhado no APÊNDICE A. Este ajuste do efeito indutivo é promovido a partir de valores virtuais de indutância de subida (L_s) e de valores virtuais de indutância de descida (L_d), que são definidos pela indutância de referência (L_r) de entrada do *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT), resultado dos valores de entrada do divisor de subida (K_s) e do divisor de descida (K_d), conforme equações (1) e (2).

$$L_s = \frac{L_r}{K_s} \quad (H) \quad (1)$$

$$L_d = \frac{L_r}{K_d} \quad (H) \quad (2)$$

Assim, graças, principalmente, à atuação da fonte de soldagem com dinâmica robusta e modulação dos efeitos indutivos, via parametrização dos valores de K_s e K_d , que atuam de forma independente e permitem o estabelecimento de combinações de valores de di/dt de subida diferentes de valores de di/dt de descida, é possível manter estável a transferência metálica ao longo do regime de trabalho. Portanto, cabe salientar que é a regulação do efeito indutivo, com diferentes valores entre a subida e a descida de corrente, que promove este desempenho durante a soldagem.

Com base nestas definições, experimentos realizados por Bernardi et al. [88], com a utilização do *DynaFlex-Arc*, demonstraram o comportamento da curva de corrente com três configurações diferentes de K_s e K_d , conforme Figura 43, e comprovaram que, para os parâmetros utilizados, a condição mais estável ficou por conta da relação $K_s = 100$ e $K_d = 1$, conforme Figura 10c. Apesar de terem utilizado uma fonte IMC, com a mesma arquitetura eletrônica para controlar o efeito indutivo, o artigo não apresenta valores de di/dt . Ainda assim, seus resultados são de grande valia para demonstrar os efeitos provocados pela parametrização dos valores de K_s e K_d , e justificam a necessidade do aprofundamento deste assunto.

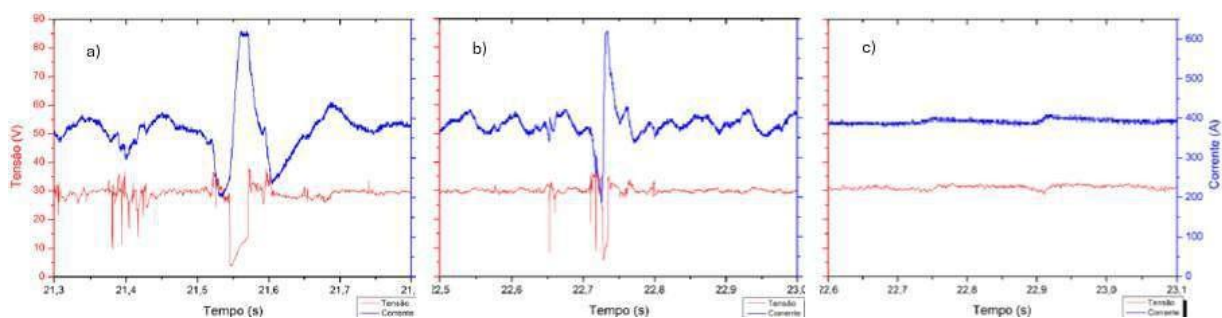


Figura 43 - Oscilogramas mostrando o comportamento causado por diferentes valores de K_s e K_d [88]. EM a) $K_s = 25$ e $K_d = 100$; b) $K_s = 100$ e $K_d = 100$; c) $K_s = 100$ e $K_d = 1$.

Nestes experimentos preliminares, foi possível observar que, em uma soldagem com uma combinação de $K_s = 100$ e $K_d = 100$, ocorreram situações de contato em que a poça de fusão fechou, a transferência metálica foi descaracterizada, chegando a entrar em modo de transferência em curto-circuito e, em seguida, em *spray* rotacional, além de ocorrências de respingos nas tentativas de restabelecimento do regime em *spray* em *streaming*. Ou seja, uma transferência instável e irregular, conforme Figura 44.

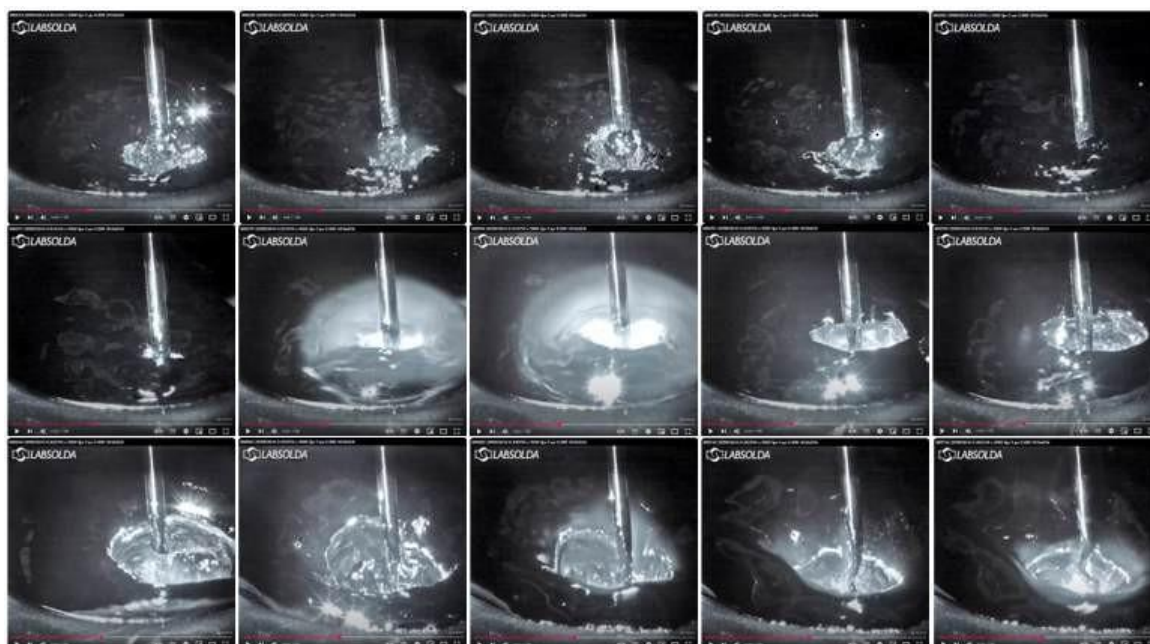


Figura 44 - Soldagem com a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 100$ [88]. Vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zCr5lmyf4fM>

Quanto à soldagem com a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 1$, foi possível observar que a transferência se manteve regular no modo *spray* em *streaming*, demonstrando a eficácia de uma parametrização correta desta combinação, conforme Figura 45.



Figura 45 – Soldagem com a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 1$ [85]. Vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=RkpVX2cv1qc>

A fim de facilitar a descrição deste conceito, cabe a apresentação de um modelo que estabeleça a relação de causa e efeito entre a taxa de descida da corrente, após a eliminação de um curto-circuito incipiente ou iminência de curto-circuito, e a manutenção da abertura da cratera fundida, em uma situação de descida abrupta da corrente, conforme Figura 46, e em uma situação descida suave da corrente conforme Figura 47. Assim, uma explicação plausível consiste no fato de que, inicialmente, o processo está em regime estável de operação, conforme Figura 46a, em seguida, ocorre o contato da ponta fundida do arame com a poça de fusão, causando o apagamento do arco elétrico, queda abrupta de tensão e, conseqüentemente, uma subida abrupta da corrente, conforme Figura 46b. Essa descrição representa a reação da fonte diante de uma queda abrupta da tensão, na tentativa de restabelecer o regime de trabalho, baixando o valor da corrente à uma taxa rápida, conforme figura 46c, o que faz com que a cratera perca pressão do jato plasma abruptamente, fazendo com que ocorra uma tendência de fechamento ou, até mesmo, o seu fechamento, favorecendo a descaracterização da transferência em *spray* em *streaming*, conforme Figura 46d.

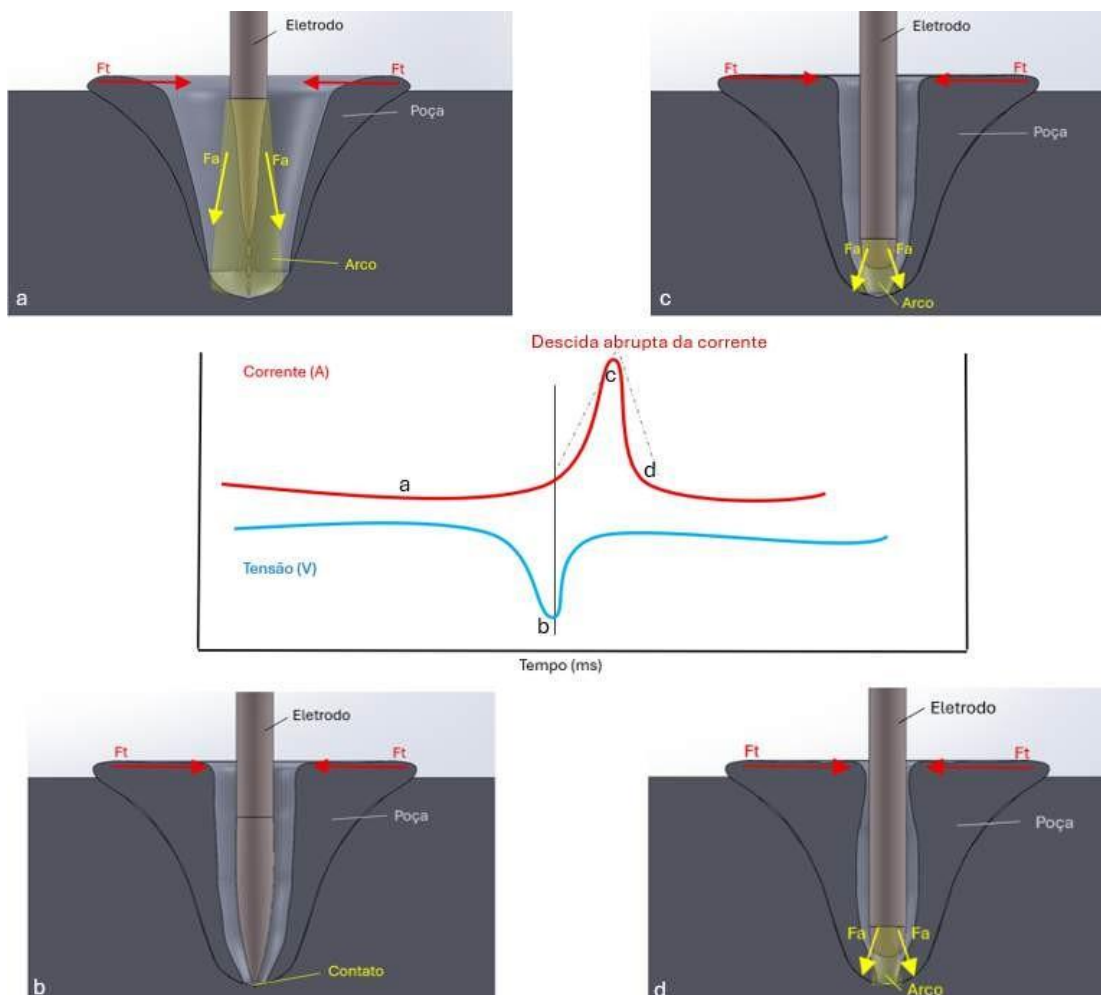


Figura 46 - Comportamento da poça considerando dl/dt de descida abrupta.

De outra forma, uma taxa de descida da corrente mais lenta suaviza esta queda de pressão do jato plasma, mantendo o equilíbrio dinâmico com as forças proporcionais à tensão superficial do material fundido, de tal forma que a cratera consegue se manter em uma condição metaestável de manutenção de sua abertura, conforme Figura 47.

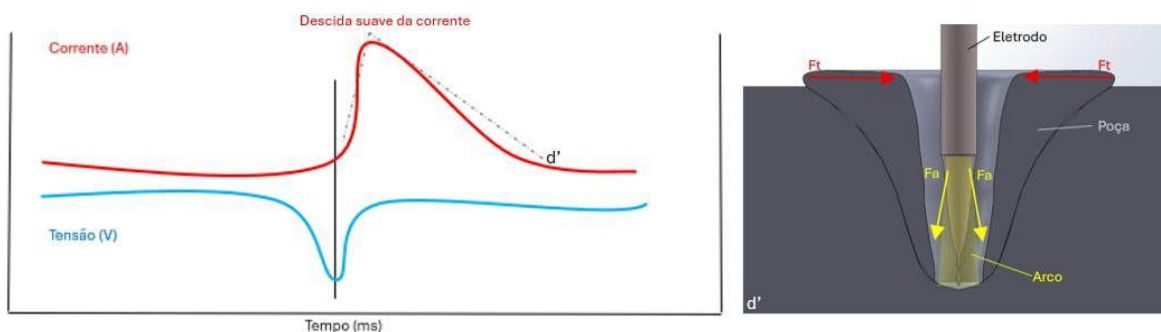


Figura 47 - Comportamento da poça considerando dl/dt de descida suave.

Semelhante a esta vantagem do *DynaFlex-Arc*, quanto à controlabilidade dos efeitos indutivos aplicados ao restabelecimento suave do regime de trabalho, pode-se citar a função *TAIL-OUT* do processo *Surface Tension Transfer (STT)*, em que a sua missão é a de suavizar a descida dos níveis de corrente, observável no instante T_1 da Figura 48, a fim de evitar a sua queda abrupta, com o objetivo de promover uma poça de fusão mais estável, com sua dinâmica mais controlada e precisa, na fase logo após a reabertura do arco elétrico [42, 43, 100].

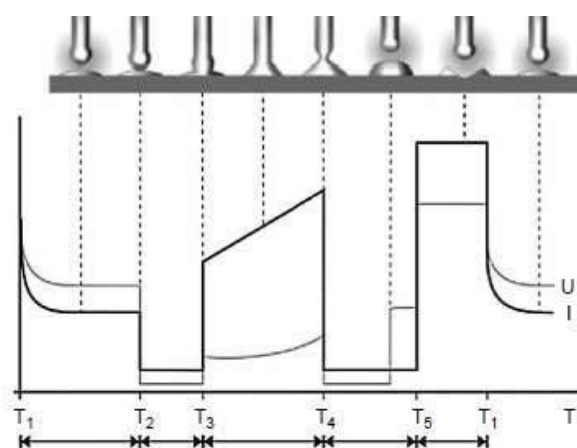


Figura 48 - Esquema do oscilograma ideal do STT [100].

Quanto à estabilidade do processo, considerando que a transferência ideal do *DynaFlex-Arc* ocorre sem contato, qualquer situação de curto-circuito, mesmo sem transferência significativa de material, é considerada um evento de instabilidade. Porém, quando testes de soldagem são comparados, é importante fazer uma ponderação, considerando um mesmo processo com base em uma matriz de ensaios, em que idealmente apenas um parâmetro é variado, pode-se dizer que uma soldagem foi mais ou menos estável que outra. Ou seja, eventos de instabilidade que não descaracterizam a transferência metálica a ponto de causar uma descontinuidade ou defeito que comprometam o cordão de solda, não representam problemas de execução, mas servem como quantitativos para fins comparativos entre soldagens realizadas [43, 54].

Neste contexto, ferramentas de aquisição e tratamento de dados podem ser utilizadas para determinar quais soldagens tiveram mais curtos-circuitos, ou curtos-circuitos mais demorados [35]. Mesmo em soldagens sem ocorrência de curtos-circuitos é possível definir e comparar quais foram mais estáveis, com base na análise de ciclogramas, no sentido de avaliar menores faixas de variação de tensão e

corrente, que representam uma evolução mais regular destes transientes [101]. Além disso, desvios padrões de picos de corrente também podem ser considerados como um índice para comparar a estabilidade entre soldagens realizadas, pois quanto menor o seu valor, melhor a estabilidade [42].

Outro critério importante a ser considerado para analisar questões de estabilidade de uma soldagem, baseia-se na comparação entre ciclogramas de tensão e corrente, pois quanto menor a área abrangida pelas curvas geradas pelos registros de variação destes transientes, conforme Figura 49, ou com padrões de ciclos mais próximos, conforme Figura 50, maior a sua regularidade e, conseqüentemente, a sua estabilidade, desde que, a transferência metálica se mantenha predominantemente com suas características esperadas [54, 102, 103].

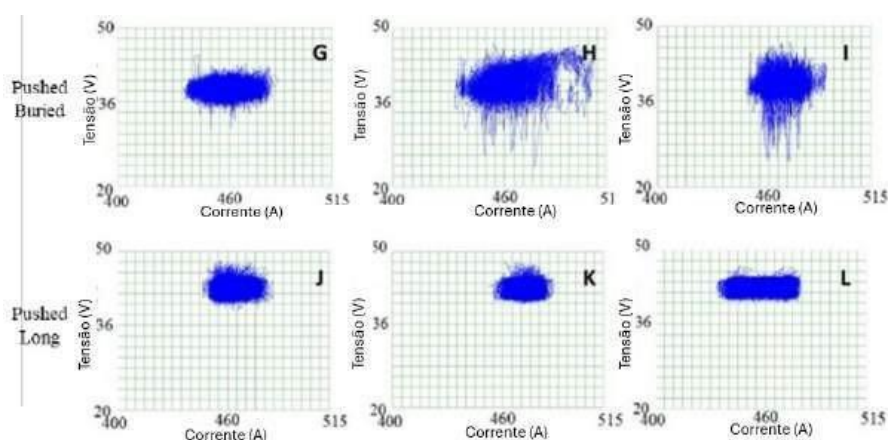


Figura 49 - Exemplo de análise de ciclogramas em função da variação de área. [54].

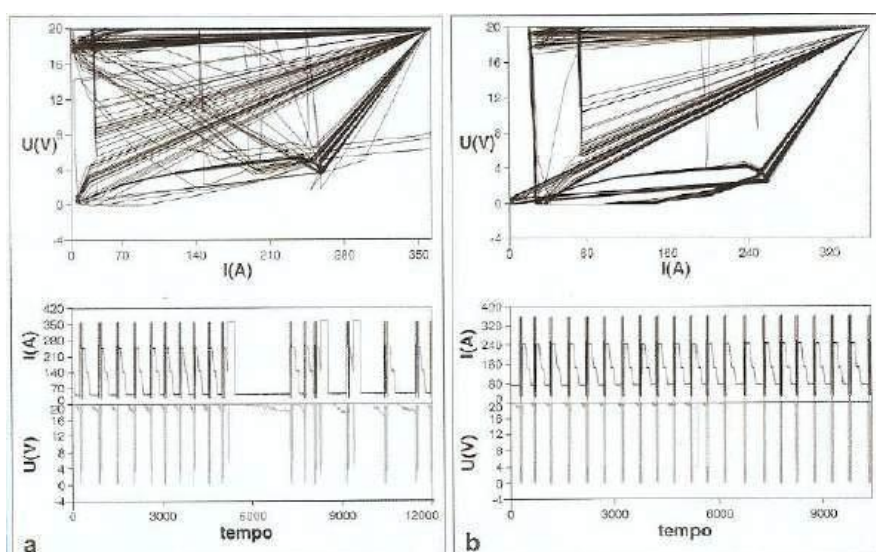


Figura 50 - Exemplo de ciclograma em função da repetibilidade de ciclos [102].

Apesar de os critérios apresentados acima, para avaliar a regularidade de variação dos transientes, cabe lembrar que o *DynaFlex-Arc* deve operar idealmente em uma transferência metálica predominantemente sem contato, por isso o principal critério de avaliação de sua estabilidade deve ser baseado nas variações das amplitudes de tensão e de corrente. Para esta análise, quanto menores os valores de desvios-padrão da amplitude do picos, melhor é a estabilidade do período analisado, de tal forma que a quantidade de picos não interfere na estabilidade do processo. Ou seja, mais especificamente do ponto de vista da variação de corrente, não é a frequência de ocorrência de picos, mas sim a amplitude e o tempo de duração destes, assim como a sua taxa de decrescimento, em função das perturbações da poça de fusão, que estão diretamente relacionadas à estabilidade do processo [35].

Para finalizar este subitem, com o intuito de situar o leitor quanto às grandezas de dl/dt , cabem alguns comentários.

Neste sentido, as fontes de soldagem transistorizadas inversoras possuem dinâmicas que permitem altas taxas de variação de corrente (dl/dt), conforme experimentos realizados por Niz [104], que demonstrou taxas em torno 190 A/ms, operando o processo MIG/MAG em modo de transferência por curto-circuito. Ele também demonstrou que, apesar deste desempenho, existem faixas de operações de dl/dt de subida, entre 30 A/ms e 70 A/ms, que resultaram em transferências metálicas mais estáveis e, principalmente, mais eficientes quanto às taxas de deposição de material. Além dele, estudos realizados por Souza [105] também demonstraram os efeitos de diferentes dl/dt na regularidade da transferência metálica em operações MIG/MAG em curto-circuito, cujos resultados apontaram para valores de dl/dt de subida em torno de 80 A/ms e de descida em torno de 65 A/ms. Para completar este tópico, em um estudo mais refinado, Dutra [35] concluiu que para realizar uma soldagem mais estável, também utilizando o processo MIG/MAG em curto-circuito, o fator mais importante para este fim é a regulação da intensidade do efeito indutivo de descida, que resultou em valores entre 20 A/ms e 40 A/ms, combinados uma taxa de subida de 60 A/ms.

Quanto aos efeitos indutivos sobre o modo de transferência em *spray* em *streaming*, cabe salientar que, quando este tipo de transferência ocorre de forma estável, a faixa de variação da corrente é tão pequena que os valores de dl/dt representam, principalmente, uma questão de refinamento do processo.

3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE APLICAÇÕES INOVADORAS DO PROCESSO MIG/MAG AP

Devido às suas características, o processo *DynaFlex-Arc* representa, naturalmente, uma alternativa tecnicamente viável não apenas para a soldagem de juntas específicas, devido à sua alta penetração, como por exemplo juntas de filete em T, mas também devido às suas altas taxas de deposição, para a soldagem de enchimento de juntas espessas de topo. Este tipo de junta demanda processos que devem realizar o enchimento da junta com o menor número de cordões possível, garantindo qualidade e eficiência [51, 106].

Em uma perspectiva mais específica, devido à sua alta controlabilidade e flexibilidade, esta variante figura como uma opção para a soldagem fora de posição, com destaque para a soldagem sobrecabeça, representando até mesmo uma quebra de paradigma para este tipo de aplicação. Afinal, referências como a *AWS Welding Handbook Vol. 2* [10] abordam as dificuldades da soldagem com o processo MIG/MAG com transferência em *spray* fora da posição plana ou horizontal plana e, por isso, não recomendam o seu uso neste tipo de aplicação. O principal fator apontado consiste nos valores de corrente que, por estarem acima da região de transição, são considerados altos, de tal forma que a energia resultante promove poças de fusão maiores, devido à maior quantidade de material fundido, quando comparadas com uma transferência em curto-circuito, além deste material demorar mais para solidificar, ele ainda pode sofrer a perturbação de um jato plasma mal direcionado, promovendo ainda mais o escorrimento. Mesmo em se tratando de uma transferência em *spray* em *streaming*, que a potência de operação é ainda mais alta que o *spray*, as recomendações são as mesmas para a soldagem fora de posição, sendo preferível, pelos motivos já citados, a aplicação da transferência em curto-circuito, devido, principalmente, à rápida solidificação da poça de fusão [19]. Ainda neste contexto, algumas alternativas ao uso do curto-circuito convencional seguem sendo pesquisadas, com o objetivo de aumentar as taxas de deposição de material, como é o caso do pulsado, mas que requerem parametrizações mais complexas de formas de onda em operações em modo de corrente [107].

Em uma última abordagem de destaque de suas características, a sua controlabilidade promove a possibilidade de ser utilizado em soldagem de revestimento. Esta aplicação serve para proteger e aumentar o tempo de vida útil de

superfícies de peças expostas a processos industriais que causam abrasão, corrosão e até mesmo a própria cavitação. São exemplos de setores industriais que demandam melhorias nesta área: química, geração de energia elétrica, extração e transporte de petróleo, entre outros [108].

Para isso, é necessário procurar algumas características associadas ao processo e ao respectivo procedimento para cumprir os requisitos técnicos especificados. A geometria da secção transversal do cordão, conforme Figura 51, serve como referência para as medições que irão qualificar a solda. No caso de aplicações de revestimento além da ausência de defeitos nos cordões de solda e em suas sobreposições, a penetração e a diluição, equação (3), devem ter níveis mínimos, pautados por normas ou de acordo com a necessidade de cada empresa, para garantir a qualidade pretendida [109].

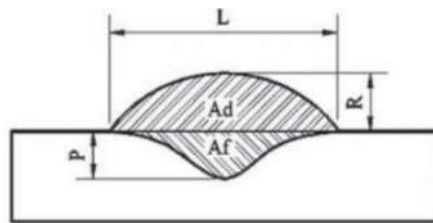


Figura 51- Esquema de geometria de cordão de solda para fins de cálculo de diluição [109].

Onde:

L=Largura média (mm);

P=Penetração (mm);

R=Reforço (mm);

Sendo:

$$D = \frac{A_f}{(A_d + A_f)} 100 \quad (3)$$

Onde:

D=Diluição (%);

A_f=Área fundida (mm²);

A_d=Área depositada média (mm²);

Atualmente, os diferentes procedimentos de revestimento competem entre si, possibilitando ao setor de engenharia das empresas demandantes de revestimento selecionar o que possui a melhor relação custo/benefício. Com este foco, a Figura 52 apresenta, de maneira genérica, as informações quanto à produtividade e à qualidade de alguns dos principais processos de revestimento utilizados.

Processo	Vs (cm/min)	TD (kg/h)	Fe na primeira camada (%)	Fe na segunda camada (%)
Eletrodo Revestido	-	1,40	17,20	5,81
GMAW Pulse Argon	60,00	3,81	13,53	2,98
TIG Hot wire	25,00	1,61	7,35	1,34
Plasma	25,00	1,44	8,01	1,34
Laser Hybrid	210,00	5,19	16,37	3,96
CMT Ni 10	60,00	4,61	2,38	0,37
Time Twin Ni 10	60,00	10,72	15,69	3,60
SAW Fita	13,00	17,00	11,91	3,28

Figura 52- Exemplos de processos de soldagem de revestimento [109].

Os revestimentos podem ser feitos com uma ou várias camadas. Ao se analisar um revestimento feito com uma única camada observa-se uma tendência de diminuição da resistência à corrosão com o aumento da diluição [110, 111]. Por outro lado, observa-se uma tendência de aumento da resistência ao arrancamento com o aumento da diluição, desde que haja fusão do substrato [112]. O aumento de penetração também resulta em maiores deformações. Dessa forma, encontrar o equilíbrio da resistência à corrosão e ao arrancamento em função da diluição consiste no desafio de determinar qual o melhor processo a ser utilizado.

Em vista de suas características de alta taxa de fusão e deposição, além de estudos que testam altas faixas de corrente, o processo de soldagem MIG/MAG tem sido explorado para revestimentos, tanto em suas versões convencionais quanto avançadas [113, 114]. Carvalho et al. [115] obtiveram resultados adequados para revestimentos na faixa de *spray*, na posição vertical descendente e oscilação da tocha, em que foram testadas frequências de até 5 Hz e amplitude 8 mm. Estes resultados, no entanto, como dito, foram em *spray*, com comprimento de arco longo, quando comparado ao *DynaFlex-Arc*. Já Craig [116] descreve um processo MIG/MAG modificado, com intervenções em indutância (na direção do que se propõe para o *Dynaflex-Arc*), para revestimentos no setor de energia, com baixo comprimento de arco. Apesar de mostrar bons resultados, Craig não apresenta discussões sobre modos de transferência metálica ou efeitos do tipo de controle do processo sobre sua estabilidade.

Portanto, neste contexto, considerando a relativa complexidade da soldagem de revestimento e a flexibilidade característica do *DynaFlex-Arc*, a sua abordagem nesta tese se justifica, a fim de demonstrar seu potencial neste segmento, além de demonstrar, assim, a sua controlabilidade tanto da poça de fusão quanto da penetração.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 EXPERIMENTOS-BASE COM O PROCESSO *DynaFlex-Arc*

De acordo com Dutra [117], não há critério comparativo único e definitivo que ajude a descrever a condição de estabilidade de um determinado processo de soldagem. Em acordo com esta assertiva, antes de descrever as metodologias utilizadas para a realização dos experimentos a seguir, é importante ressaltar o modo de transferência metálica do *DynaFlex-Arc* e em que condições ele se estabelece. Com esta clareza frente à transferência associada à atuação da dinâmica da fonte, será mais fácil ao leitor estabelecer as relações de causa e efeito entre os fenômenos físicos que compõem este processo.

Considerando que a transferência metálica do *DynaFlex-Arc* ocorre, predominantemente, em *spray* em *streaming*, estabelecida em *buried arc*, ou seja, em uma condição crítica de arco extremamente curto, caracterizada peloafilamento constante da ponta do arame durante a sua fusão, promovendo uma transferência metálica de gotas menores que o diâmetro do arame, com a ocorrência eventual de curtos-circuitos, mas sem transferência significativa de material, é possível afirmar que qualquer outra situação que perturbe ou descaracterize esta condição, deve ser considerada uma instabilidade ao processo.

Além disso, em uma outra perspectiva, quando determinados períodos são comparados e considerados estáveis, em vista da afirmação do parágrafo anterior, a condição de maior ou menor estabilidade entre eles, pode ser mensurada em função, entre outros critérios, mas principalmente, das faixas de variação dos transientes de tensão e corrente, seus valores médios e desvios-padrão de picos, assim como o tempo de restabelecimento da condição esperada de trabalho, destas faixas de variação, diante da iminência ou ocorrência de um curto-circuito incipiente.

Diante deste contexto, o principal método utilizado para a realização destas análises foi o registro dos transientes elétricos dos experimentos com o uso do Sistema Portátil de Monitoração de Processo de Soldagem (SAP) e, em seguida, com base nos dados aquisitados, extraídos os valores de interesse e feitas as

ponderações necessárias e comparados os valores de maior relevância, conforme critérios justificados.

Por isso, dada a relevância deste método, cabe destacar a lógica em que os dados são processados no SAP, a partir da forma com que ele considera a ocorrência de um pico no gráfico de tensão ou corrente, além do que, em função de quais valores e premissas ele considera a ocorrência de um curto-circuito.

Assim, a análise de períodos aquisitados funciona considerando que a lógica de processamento do SAP depende de um valor de referência limiar, a fim de orientar o sistema para registrar quando um movimento de curva de gráfico é de subida ou de descida, em função das variações dos transientes analisados. Com base neste limiar, é possível padronizar um “horizonte” de dados e identificar os pontos de pico de corrente e tempos de curto-circuito ou de arco aberto, conforme Figura 53, em que podem ser verificados os seguintes dados: a linha amarela representa o valor médio de cada transiente, pico de corrente (I_p), derivada de subida (D_s), derivada de descida (D_d), pico de tensão (U_p), período de transferência (T), período de arco aberto (T_a) e período de curto (T_c). Por *default*, o sistema considera como limiar os valores médios do corrente ou de tensão do período especificado para realizar esta varredura e processar os dados [103].

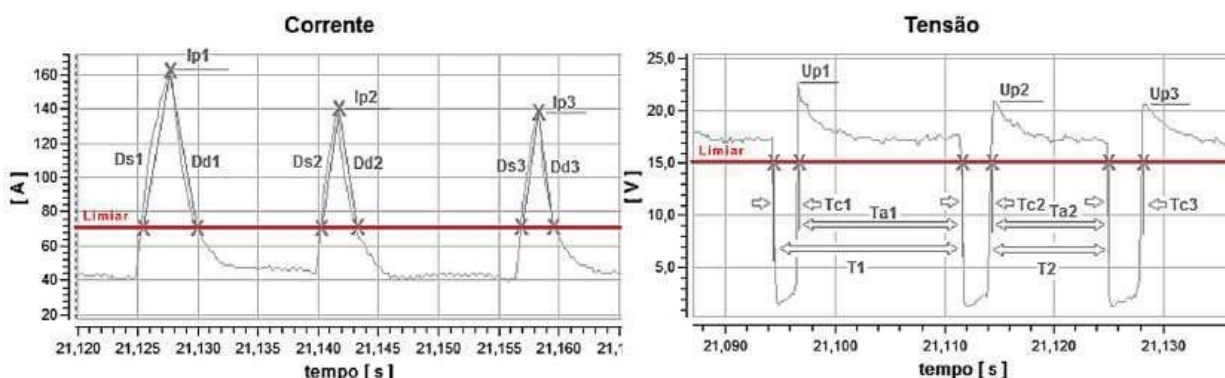


Figura 53 - Ilustração de como são extraídos os dados dos oscilogramas [103].

Porém, conforme citado no próprio manual do SAP [103], critérios para verificar ou comparar a estabilidade entre períodos aquisitados, depende de uma análise por parte da pessoa que está utilizando a ferramenta, em função da transferência metálica predominante, experiência e percepção em relação à aplicação de cada funcionalidade do *software*.

Por isso, no caso do *DynaFlex-Arc*, em se tratando de um processo com transferência predominantemente em *spray*, quanto à análise do ponto de vista da variação de tensão e de corrente, o número total de picos apresentado pelo SAP, que deveria significar o registro destes picos nos oscilogramas, não pode ser considerado, sozinho, um critério válido para a análise de estabilidade, pois o limiar adotado pelo sistema como sendo o valor médio não faz a varredura correta de alguns períodos aquisitados, conforme exemplo da Figura 54, em que vários picos de corrente e de tensão ficaram abaixo do limiar. Além disso, a lógica para a leitura de tempos de arco aberto e de curto-circuitos, via variação de tensão, também fica comprometida, inviabilizando este critério, pois não estabelece um horizonte claro para que o limiar estratifique dados representativos para este modo de transferência, em *spray*, pois ficam picos de tensão abaixo da linha limiar e, assim, não atendem a uma variação ideal para o SAP, conforme ilustrado anteriormente na Figura 53.

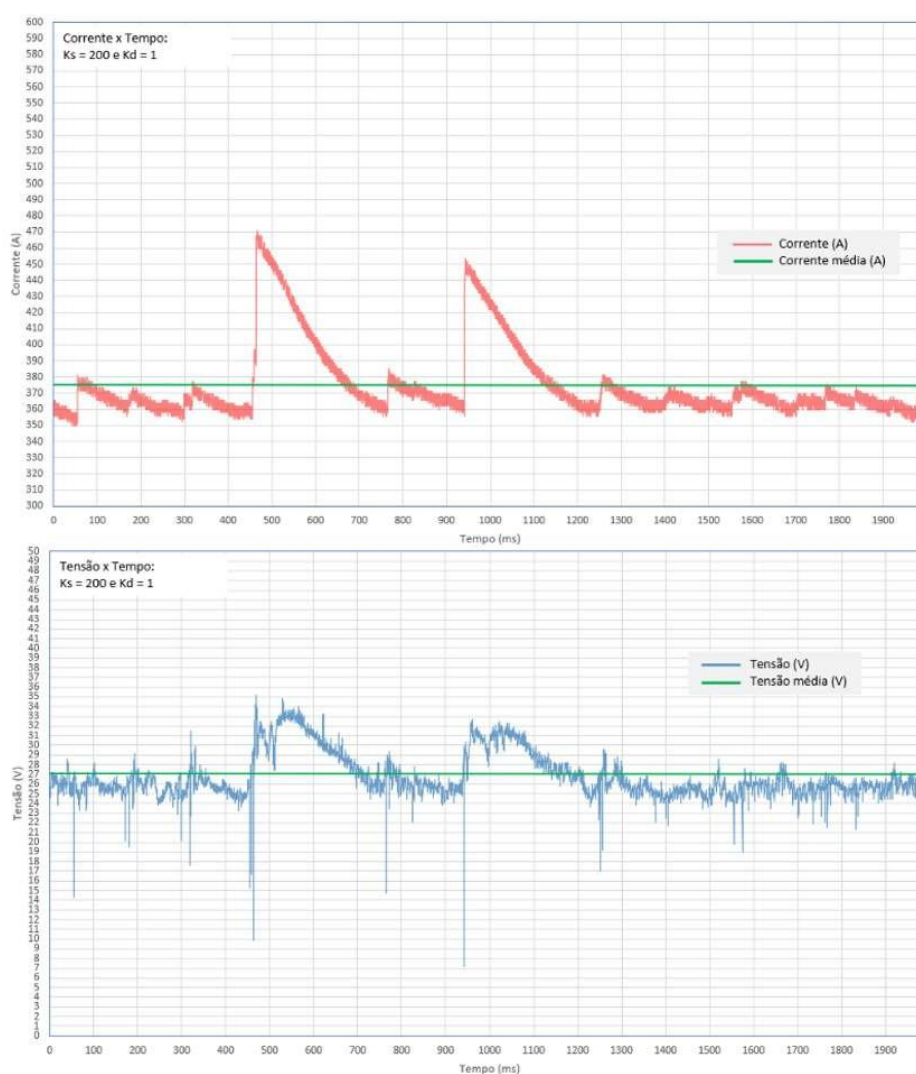


Figura 54 - Situação que o limiar do SAP não extrai a realidade de dados. Fonte: O autor.

O que significativamente representa uma opção de valor a ser comparado entre aquisições para este processo é a média da tensão e, principalmente, o desvio padrão desta, além dos ciclogramas de tensão e corrente. Assim, é possível determinar qual dos períodos analisados teve a menor faixa de variações da tensão e, conseqüentemente, maior regularidade, reflexo de uma transferência metálica estável.

Para este processo, outra observação é pertinente, com base em sua programação operacional, a fonte IMC *DIGIplus A7* [41], utilizada nestes experimentos, reage às quedas de tensão com o aumento da corrente a fim de tentar manter a potência resultado da parametrização, porém devido à sua configuração de fábrica, quando os valores de tensão caem abaixo de 8 V por mais de 1 ms (denominado como tempo morto pelo fabricante), a fonte considera que foi estabelecido um curto-circuito e a corrente dispara até chegar em valores que desfaçam o curto-circuito, baseado no restabelecimento da tensão em regime de trabalho, de acordo com valores de di/dt resultantes da programação do K_s e K_d e da resistência dinâmica do arco elétrico. Contudo, conforme visto na Revisão Bibliográfica, curtos-circuitos que ocorrem em tempos inferiores a 2 ms não transferem material significativo, que descaracterizem a transferência, principalmente devido ao fato de a força de atuação predominante em uma transferência incipiente não se estabelecer por tensão superficial. Ou seja, esta situação não gera perturbações significativas no modo de transferência em *spray* em *streaming*, porém quanto menor o número deste tipo de ocorrência, menor será a faixa de variação de tensão e, conseqüentemente, maior a estabilidade da soldagem analisada.

Quanto à repetição dos ensaios realizados, além dos cordões exploratórios, que serviram para delimitar faixas de parâmetros que resultaram em soldas com potencial de refinamento devido à aparente distribuição regular do cordão, todas as soldas que foram consideradas de interesse para este trabalho foram repetidas, a fim de demonstrar a robustez e a repetibilidade do processos em tais condições. Após constatar a repetibilidade, procederam-se às aquisições com o SAP. Esses dados foram posteriormente processados e analisados com maior rigor, considerando que cada cordão executado representa uma varredura amostral, com uma frequência de 5 kHz de aquisições, ao longo dos ciclogramas dos transientes de tensão e corrente.

Portanto, estes experimentos-base tiveram o objetivo de explorar certos parâmetros e condições em que o processo parece ocorrer de forma estável, para que, então, seja testado nas aplicações de engenharia propostas por esta tese.

4.1.1 Estudo dos efeitos de diferentes combinações de Ks e Kd e suas relações com as taxas de variação de subida e de descida de corrente

Conforme descrito na revisão bibliográfica, considerando uma dinâmica de resposta da fonte, a controlabilidade do efeito indutivo, sobre as variações de descida e de subida da corrente, é o principal fator que viabiliza a execução do *DynaFlex-Arc*. Apesar de alguns experimentos já terem sido realizados anteriormente, que delimitaram uma faixa efetiva de combinações de valores de Ks e Kd, é de bom alvitre, do ponto de vista científico, no sentido de demonstrar esta relação de causa e efeito, que também sejam realizados testes para demonstrar as diferenças em relação a algumas combinações-chave de Ks e Kd, cujos resultados possam ser analisados com base em critérios estatísticos.

Logo, os experimentos realizados nesta etapa da tese, demonstraram os efeitos de sete combinações de Ks e Kd, a fim de buscar uma delimitação de valores para uma atuação mais eficiente na manutenção do arco elétrico.

Assim, foram executados testes na posição plana de depósito sobre chapas de aço SAE 1020, com a utilização arame ER70S-6 de 1,2 mm, gás de processo com Ar + 8% CO₂ com vazão de 15 l/min, utilização de uma fonte Digiplus 7 IMC, sistema de aquisição de dados SAP 3 IMC (com taxa de aquisição de 5 kHz), filmagens de alta velocidade com a câmera I4S2 IDT (com taxa de aquisição de 5.000 *fps*) com uma posição da tocha com ângulo 0°, tanto com relação ao ângulo de ataque como de trabalho, DBCP de 15 mm, em que foram utilizados os parâmetros de soldagem de acordo a matriz de ensaios, conforme Tabela 1:

Tabela 1 - Matriz de ensaios com os parâmetros utilizados. Fonte: O autor.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
U (V)	29	29	29	29	29	29	29
Vel.A (m/min)	13	13	13	13	13	13	13
Vel.S (cm/min)	45	45	45	45	45	45	45
Ks (adimensional)	1	1	1	100	200	100	200
Kd (adimensional)	1	100	200	100	200	1	1

Estas imagens e os dados adquiridos foram processados junto ao SAP e utilizados a fim de demonstrar visual e numericamente critérios que justifiquem a escolha de uma determinada combinação de Ks e Kd.

4.1.1.1 Verificação dos efeitos da combinação $K_s = 100$ e $K_d = 20$

Conforme demonstrado no Subitem anterior, o valor de $K_s = 100$, apesar de menos estável em relação ao uso do $K_s = 200$, foi considerado satisfatório quanto à estabilidade. Assim, pode-se dizer que não são valores fixos de K_s ou de K_d , associados a parâmetros de soldagem fixos, que promovem uma soldagem estável e, conseqüentemente, uma solda satisfatória, mas, sim, faixas de valores de K_s e K_d associados a determinados conjuntos de parâmetros, conforme cada situação.

Por isso, em vista dessas constatações e, considerando, que os valores de efeito indutivo estão distribuídos em uma curva exponencial em função da escala e resolução de valores de K_s e K_d , conforme apresentado no APÊNDICE A, foi testada a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 20$, a fim de demonstrar seus efeitos na estabilidade do processo. Assim, esta combinação foi testada nas mesmas condições e parâmetros dos ensaios do Subitem anterior, 4.1.1, e, em seguida comparada com a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 1$, com a mesma metodologia adotada, a fim de demonstrar suas diferenças do ponto de vista, principalmente, das faixas de variação de corrente e tensão.

Em razão desta distribuição exponencial dos valores do efeito indutivo em função dos valores K e, para delimitar e racionalizar os ensaios, considerando que foram realizados outros experimentos, os quais podem ser conferidos na sequência desta tese, em outras aplicações, condições e parâmetros de soldagem, foi determinado, neste momento, apenas o teste do valor de $K_d = 20$. Assim, outras combinações de K_s e K_d podem ser verificadas em outras condições de interesse nos próximos desdobramentos.

4.1.2 Soldagens de união de chapas espessas de aço com junta de topo com chanfro V

Neste contexto, cabe comentar que este tipo de junta é largamente utilizada na indústria. Além disso, justificam-se estes ensaios, considerando que esta tese representa parte dos estudos promovidos pelo projeto Petrobras Processos de Reparos Alternativos: Soldagem em Operação de Reparo por Abraçadeira Aparafusada Soldável [118] e, que, para a aplicação deste tipo de reparo, é necessária a soldagem de junta de topo com um chanfro em V na posição horizontal (junta similar existe também na técnica de reparo de dupla calha tipo B). Além dessa, a posição sobrecabeça também tem fundamental importância de aplicabilidade neste tipo de reparo. Logo, no sentido de levantar subsídios de informações, foram investidos testes a fim de demonstrar sua eficácia em uma condição tão crítica. Como último argumento, cabe lembrar que essa condição de soldagem, sobrecabeça, representa um trecho de junta desafiador na soldagem orbital, em que os tubos ficam fixos com seu eixo horizontal, aspecto que também é abordado nesta tese.

Da mesma forma que na metodologia dos experimentos anteriores, as imagens e os dados adquiridos dos transientes de tensão e de corrente dos experimentos realizados nos Subitens 4.1.2.1 e 4.1.2.2 também foram processados no SAP e utilizados para a construção, análise e comparação de oscilogramas, histogramas e ciclogramas, a fim de demonstrar visual e numericamente critérios que justifiquem a escolha de uma parametrização mais estável.

4.1.2.1 Posição horizontal

A investigação não posição horizontal baseou-se em ensaios realizados de forma mecanizada com um único passe na posição horizontal, em chapas de aço SAE 1020 com 9,5 mm de espessura, em junta em “V” com *backing*, configuração aplicada na instalação de reparos por dupla-calha tipo B em dutos. Os ensaios foram realizados em uma bancada constituída por um tubo API no qual foi fixado o corpo de

prova, um manipulador Tartílope V2, uma fonte de soldagem multiprocesso IMC modelo DigiPLUS A7, sistema de aquisição de dados SAP 3 (com taxa de aquisição de 5 kHz), e gás de proteção Ar + 8% CO₂, conforme Figura 55. Para completar, foram realizadas filmagens de alta velocidade com a câmera I4S2 IDT (com taxa de aquisição de 5.000 fps), a fim de verificar o comportamento da transferência metálica nesta posição e, assim, levantar subsídios de informações para orientar os próximos ensaios.



Figura 55 - Bancada utilizada para a realização dos ensaios na horizontal. Fonte: O autor.

Os parâmetros dos cordões exploratórios foram ajustados com base na experiência do soldador para este tipo de condição. Esses, convergiram para os seguintes valores: tensão de 32 V, velocidade de alimentação de arame de 14 m/min, velocidade de soldagem de 60 cm/min, distância bico de contato peça de 15 mm (medida a partir do fundo do chanfro, superfície do *backing*), ângulo total da junta em V de 20°, sem nariz e com um gap de 1 mm, ângulo de ataque da tocha de 70°, em relação a superfície da chapa, empurrando, e ângulo de trabalho de 80°, também em relação à superfície da chapa, com a bico da tocha apontando para cima, conforme Figura 56.

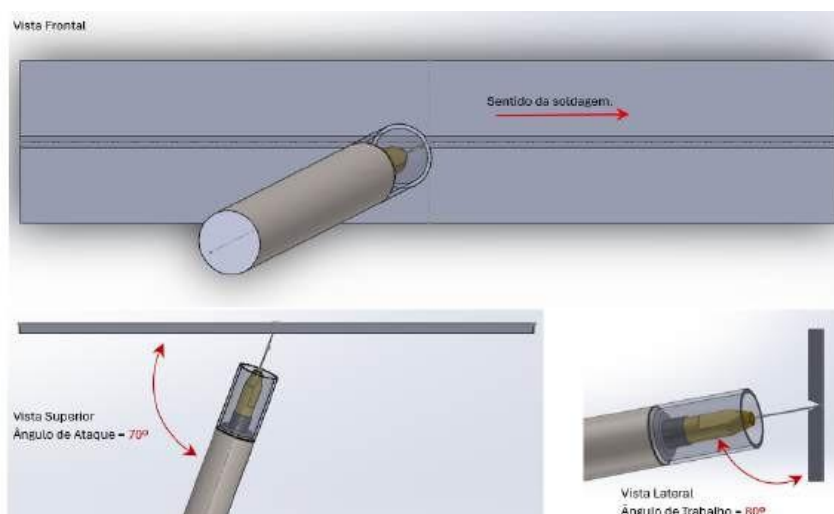


Figura 56 - Orientação da tocha, experimentos na horizontal. Fonte: O autor.

A fim ampliar a faixa de valores de K_s e K_d , em razão dos resultados experimentos do Subitem 4.1.1, que apontaram para uma relação de maior estabilidade para valores de K_s mais altos, limitados a 200, e em vista das ponderações apresentadas no Subitem 4.1.1.1 e seus resultados, que demonstraram que a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 20$ é mais estável que uma relação $K_s = 100$ e $K_d = 1$, e considerando que estes experimentos-base têm o objetivo de levantar subsídios para os testes de soldagem orbital, foi testada uma combinação de $K_s = 300$ e $K_d = 30$. Logo, considerando que esta combinação foi considerada exitosa, conforme resultados apresentados, decidiu-se por realizar novos experimentos, com esta mesma combinação de K_s e K_d , mesma posição, junta e chanfro, a fim de testar o processo em função do aumento da velocidade de soldagem. Assim, foi estabelecida uma velocidade de soldagem mais alta associada a um incremento na velocidade de alimentação de arame, conforme parâmetros apresentados na Tabela 2, sem prejuízos à qualidade da solda realizada.

Tabela 2 - Matriz de ensaios com os principais parâmetros. Fonte: O autor.

Ensaio	1	2
U (V)	32	32
Vel.A (m/min)	14	15
Vel.S (cm/min)	60	75
K_s (adimensional)	300	300
K_d (adimensional)	30	30

4.1.2.2 Posição sobrecabeça

Estes ensaios foram realizados na mesma bancada dos experimentos referentes ao Subitem 4.1.1, porém, os equipamentos foram dispostos de forma a viabilizar a soldagem na posição sobrecabeça, conforme Figura 57.

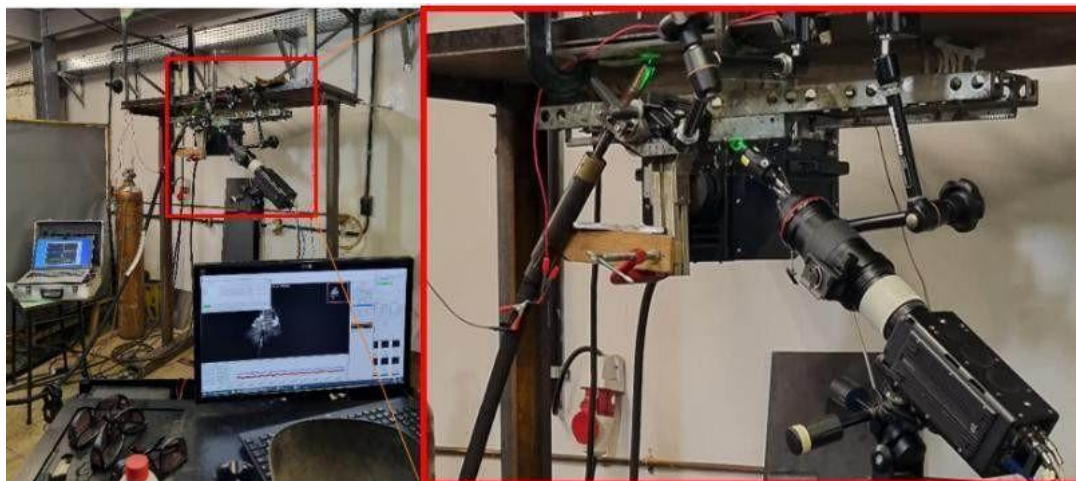


Figura 57 - Bancada de testes para os experimentos na sobrecabeça. Fonte: O autor.

Em vista das ponderações do Subitem 4.1.1.1, a fim de aumentar a abrangência da faixa de operação do fator K_d e considerando a racionalização dos ensaios, decidiu-se por adotar inicialmente, como parâmetro fixo, a combinação $K_s = 300$ e $K_d = 100$, para que então fossem ajustados (variados) os demais parâmetros, a fim de que fosse encontrada uma combinação de parâmetros que viabilizassem a obtenção desta solda na sobrecabeça. Ainda, lembrando das dificuldades e desafios, até mesmo de uma quebra de paradigma que esta soldagem representa, conforme tratado na Revisão Bibliográfica, Subitem 3.6, em que referências abordadas, a exemplo a *AWS Welding Handbook Vol. 2* [10], são categóricas quanto às críticas à aplicação da soldagem MIG/MAG em *spray* em posições forçadas, fora da plana, na horizontal ou na sobrecabeça, recomendando, pelas características já citadas, a transferência em curto-circuito. Considerando esta problemática e, após a realização de uma série de cordões exploratórios, utilizando como base os parâmetros da soldagem horizontal, percebeu-se que o ângulo total do chanfro V de 20° , utilizado nos experimentos anteriores, não permitia uma penetração total quando eram

utilizados parâmetros que geravam menos potência, conforme Figura 58, ou promovia o escorrimento, quanto eram utilizados parâmetros de maior potência, conforme Figura 59.



Figura 58 - Macrografia da secção transversal da solda realizada na sobrecabeça sem penetração total. Fonte: O autor.



Figura 59 - Soldas realizadas na sobrecabeça com escorrimento. Fonte: O autor.

Logo, com base na experiência do soldador, foram testados chanfros com 30° e 40° , ambos sem nariz com gap de 1 mm, este último demonstrou-se viável, considerando que houve penetração total e acomodou melhor a solda. Assim, os valores foram refinados e convergiram para uma tensão de 31 V, velocidade de alimentação de arame de 12 m/min, distância bico de contato peça de 15 mm, medido no fundo do chanfro (superfície do *backing*), velocidade de soldagem de 54 cm/min e ângulo de ataque da tocha de 35° , empurrando, conforme Figura 60.

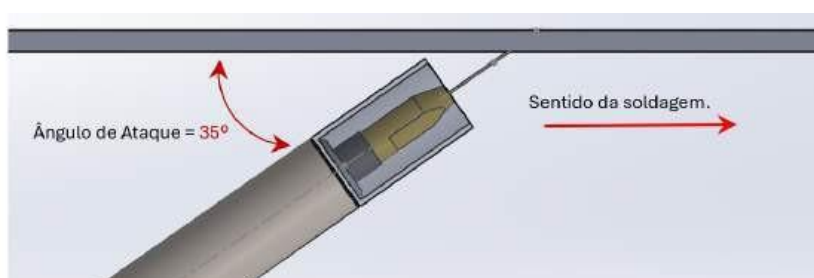


Figura 60 - Orientação da tocha, experimentos na sobrecabeça. Fonte: O autor.

4.2 EXPERIMENTOS COMPARATIVOS ENTRE O *DYNAFLEX-ARC* E O MIG/MAG CONVENCIONAL

Uma vez delimitados os parâmetros que caracterizam e promovem a soldagem com o *Dynaflex-Arc*, é possível comparar sua operação com o MIG/MAG convencional. Assim, neste Subitem, são apresentados experimentos que visam aprimorar o entendimento sobre as relações de causa e efeito da influência de taxas de variação de corrente (subida e descida) e de combinações destas taxas, com valores distintos entre elas, sobre o processo em transferência *spray* em *streaming* e poça de fusão em forma de cavidade, quanto à transferência metálica, ou seja, sobre a estabilidade do processo.

4.2.1 Estudo das diferenças entre os processos em condições similares de *buried-arc*

Como informado na revisão bibliográfica, fontes de soldagem convencionais são capazes de alcançar a condição de *buried arc*, sendo que a distinção com relação às tecnologias MIG AP seria a capacidade de manter a estabilidade do processo nesta condição [52]. Com base nestas constatações, pergunta-se: quais as diferenças em relação a uma soldagem *buried arc* realizada com uma fonte convencional, tiristorizada, executando o MIG/MAG convencional e uma transistorizada executando o *DynaFlex-Arc*?

Assim, para esclarecer esta questão nevrálgica, e destacar as diferenças entre uma soldagem com MIG/MAG convencional e o *DynaFlex-Arc*, foram realizados experimentos de depósito sobre chapa, conforme descrição a seguir. Além dos mesmos materiais, equipamentos e configuração de bancada dos experimentos realizados no Subitem 4.1.1, foi adicionada uma fonte de soldagem CLOOS tiristorizada da década de 1970, operando no modo convencional, imposição de tensão, de acordo com a posição 6F dos *taps*, conforme detalhe da Figura 61.



Figura 61 - Fonte CLOOS utilizada nos experimentos.

Os experimentos foram realizados com base na matriz de ensaios, conforme Tabela 3, em que é possível observar a utilização da combinação $K_s = 100$ e $K_d = 20$. Utilizou-se esta combinação, pois estes experimentos foram realizados antes da realização das soldagens horizontal e sobrecabeça. Portanto, na época não havia um entendimento tão aprofundado da influência destas combinações no processo e, por isso, optou-se por utilizar uma combinação mais conservadora, segura e que se demonstrou efetiva na soldagem de depósito sobre chapa, além disso, útil para comparar os processos, conforme pode ser conferido em Resultados. Como última observação, esta combinação de K_s e K_d também serviu para demonstrar a robustez do processo e a repetibilidade quanto aos efeitos dos parâmetros selecionados.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem regulados utilizados nos ensaios comparativos entre o DynaFlex-Arc e o MIG/MAG convencional. Fonte: O autor.

	<i>DynaFlex-Arc</i>		MIG/MAG conv.	
Cordão	A1	A2	B1	B2
U (V)	29	29	*6F	*6F
Vel.A (m/min)	13	13	13	13
Vel.S (cm/min)	45	60	45	60
K_s (adimensional)	100	100	-	-
K_d (adimensional)	20	20	-	-
DBCP (mm)	15	15	15	15

*Não efetivamente parâmetros regulados, apenas a posição da botoeira. O valor relativo à esta posição 6F é apresentado nos Resultados.

Da mesma forma que na metodologia dos experimentos anteriores, as imagens e os dados adquiridos dos transientes de tensão e de corrente destes experimentos também foram processados no SAP e utilizados para a construção, análise e comparação de oscilogramas, histogramas e ciclogramas, a fim de demonstrar visual e numericamente as diferenças entre os dois processos.

Além de demonstrar as diferenças entre estes dois processos, nestas condições de soldagem, estes experimentos também serviram como prelúdio do próximo tópico, que trata do limite da velocidade de soldagem, a fim de evitar a formação de *humping*.

Conforme abordado em seu *review*, Nguyen et al. [119] comenta que existe uma relação entre a potência e a velocidade de soldagem e, que nesta proporção, quando analisada do ponto de vista da velocidade, há uma área ideal de velocidade de soldagem na qual a estabilidade aumenta com o aumento da velocidade até um determinado limite que acaba comprometendo a qualidade da solda e iniciando a formação de *humping*, conforme gráfico apresentado na Figura 62.

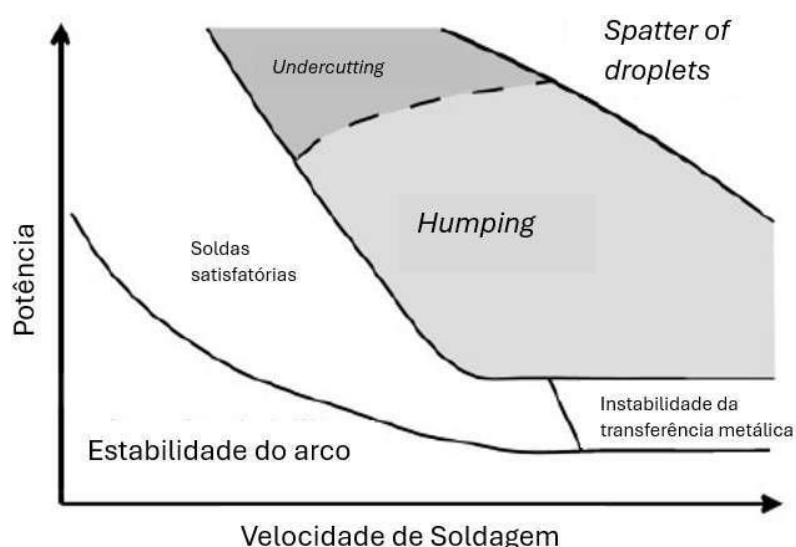


Figura 62 - Gráfico Potência x Velocidade de Soldagem [119].

Logo, em função da variação da velocidade de soldagem, conforme pode ser visto na Tabela 3, também foi possível constatar esta faixa de operação e verificar o seu aumento de estabilidade, conforme resultados apresentados no Subitem 5.3.

4.2.2 Estudo da formação de *humping* a fim de demonstrar o limite da velocidade de soldagem

Estes experimentos serviram para observar a ocorrência do fenômeno de *humping* relacionado a altas velocidades de soldagem nos processos MIG/MAG convencional e *Dynaflex-Arc*. Além disso, associados a este fenômeno, também foram analisadas as formações de outros defeitos geométricos, a morfologia das soldas, o comprimento do arco e a concentração térmica resultantes das diferenças entre os dois processos, buscando uma comparação para aplicação offshore.

Os experimentos foram realizados com duas configurações de bancada no LABSOLDA. A primeira para a soldagem MIG/MAG convencional, consistindo em uma fonte de soldagem tiristorizada CLOOS, um manipulador Tartílope V2F e um sistema de aquisição de dados IMC (SAP), que permite a aquisição de sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame com uma frequência de 5 kHz. A segunda configuração utilizou os mesmos equipamentos, com exceção da fonte de soldagem IMC DIGIPLUS A7 para a soldagem *DynaFlex-Arc*.

Os cordões de solda foram executados utilizando um arame ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, uma mistura de Ar+8%CO₂ foi utilizada como gás de processo com uma taxa de fluxo de 20~25 l/min, e chapas de aço SAE 1020 com dimensões de 12,7 mm x 75 mm x 200 mm. A superfície da chapa foi preparada com uma lixadeira ao longo de todo o comprimento, e cada peça foi resfriada em água após cada cordão. Os experimentos de soldagem foram realizados com a execução dos cordões sobre as chapas de aço, com a tocha posicionada a 90 graus da mesa e da trajetória de soldagem. Para cada condição, os cordões foram soldados com diferentes velocidades de soldagem. A velocidade inicial foi de 0,6 m/min, aumentando 0,1 m/min até que o fenômeno de *humping* ocorresse. Os parâmetros adotados podem ser vistos na Tabela 4 para ambas as fontes de alimentação e todas as condições de soldagem.

Tabela 4 - Principais parâmetros de soldagem. Fonte: O autor.

Parâmetros	Convencional	<i>DynaFlex-Arc</i>
Modo de transferência	<i>Spray</i>	<i>Streaming Spray</i>
Diâmetro do arame (mm)	1,2	1,2
Fonte de soldagem	CLOOS	IMC DIGIPLUS A7
DBCP (mm)	18	18
Tensão (V)	30	30
Corrente (A)	295	400
Vel. alm. arame (m/min)	15	15
Divisor (Ks/Kd)	-	100/1
Ângulo de trabalho da tocha	90°	90°
Potência (W)	9330	13000
Gás de trabalho	Ar+8%CO2	Ar+8%CO2

Após a soldagem e a determinação do limite de velocidade de soldagem em que o defeito de *humping* se formou, foram realizadas filmagens de alta velocidade com a câmera IDT MOTION PRO Y4-S2 e o sistema de iluminação LASER CAVILUX 500W e 800 nm para observar como o defeito se formou na condição de soldagem mais crítica. As imagens também foram utilizadas para comparar a altura entre os arcos. Posteriormente, imagens térmicas foram capturadas com a câmera FLIR SC 7000, buscando uma análise comparativa da energia na poça de fusão.

4.3 EXPERIMENTOS COM O PROCESSO *DYNAFLEX-ARC* COM VISTAS À SOLDAGEM APLICÁVEL À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS ONSHORE

Uma vez que o processo *DynaFlex-Arc* foi conceituado, desenvolvido e caracterizado sob condições experimentais padrão, cabe agora desenvolver, testar e, então, aprimorar procedimentos e parâmetros para a sua aplicação em condições de uso industrial real. Assim, neste subitem, são apresentados estudos e experimentos realizados em consonância com os objetivos específicos desta tese.

4.3.1 Estudo da viabilidade do processo na execução manual e mecanizada de reparo por calhas soldadas sobre dutos

Conforme elencado nos objetivos deste trabalho, e pelas justificativas já expostas, foi testado o processo *DynaFlex-Arc* replicando uma aplicação real, de soldagem de reparo do tipo abraçadeira, sobre duto, conforme Figura 63, caracterizada por calhas soldadas sobre a parede do duto, em uma condição da junta de filete sobreposta circunferencial.



Figura 63 – Exemplo de solda circunferencial para a realização de reparo de abraçadeira sobre duto, com potencial para a utilização do *DynaFlex-Arc*. Fonte: O autor.

Foi determinado, dentro das condições do presente trabalho, que o reparo soldável fosse de material compatível ao de um duto constituído de aço API 5L grau B com diâmetro externo de 305,8 mm e espessura de 9,52 mm, por isso, foram utilizados como materiais de base corpos de prova confeccionados a partir de seções do referido tubo. A composição química pode ser conferida na Tabela 5. Devido à compatibilidade dos materiais e disponibilidade comercial, foi utilizado o arame AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. Sua composição química também pode ser conferida na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química dos materiais de base e de adição [3].

Material	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Outros
Grade B	97,87	0,13	0,22	0,90	0,19	0,03	0,15	0,04	0,10	0,37
ER70S-6	97,53	0,11	0,40	1,10	0,01	0,03	0,15	0,10	0,15	0,42

Testes de soldagem com o *Dynaflex-Arc* conduzidos por Silva et al (2019), demonstraram que o Ar+8%CO₂ apresentou melhores resultados quanto à secção transversal da solda depositada. Portanto, este foi o gás definido para a utilização nos ensaios propostos.

Os experimentos foram realizados no LABSOLDA, em uma bancada, conforme Figura 64, reservada para estudos de soldagem em tubulações, constituída por uma fonte IMC DIGIPLUS A7, um manipulador Tartilope V4, uma câmera térmica FLIR SC 7000, um sistema de aquisição de dados (SAP) IMC e termopar do tipo K.



Figura 64 – *Setup* de laboratório. Fonte: o Autor. Em a) Bancada experimental; b) Detalhe do Tartilope e junta soldada.

Foram realizadas 2 etapas de experimentos simulando a soldagem de junta de filete sobreposta circunferencial em reparo de duto seco na horizontal. Na primeira etapa foram definidos os melhores parâmetros de soldagem com o processo *Dynaflex-Arc* manual e mecanizado executando apenas o primeiro passe. Já na segunda etapa os experimentos foram realizados com a deposição dos três passes necessários para preencher a junta, conforme Figura 65, com vistas à soldagem de abraçadeira no duto.

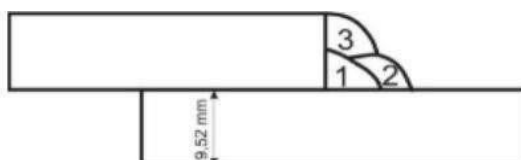


Figura 65 - Representação da sequência de soldagem. Fonte: O autor.

Experimentos iniciais demonstraram que a estabilidade da poça de fusão permanece em uma condição melhor quando o processo é realizado com a tocha movendo-se na progressão descendente puxando, com ângulo de ataque de 50° e ângulo de trabalho de 45° , conforme Figura 66. Por isso, as soldas deste trabalho foram realizadas ao longo de metade da circunferência do duto, entre 0° e 180° , no sentido descendente, conforme Figura 67a. Para analisar a geometria das soldas foram realizadas macrografias de amostras retiradas sempre de três posições específicas do corpo de prova. Para isso, a metade da secção transversal do tubo foi dividida em três setores de 60° cada, assim denominados como setor 1 (S1) entre 0° e 60° , setor 2 (S2) entre 60° e 120° e setor 3 (S3) entre 120° e 180° , cada um deles representando respectivamente as posições plana, vertical descendente e sobre-cabeça, conforme Figura 67a. Assim, na metade de cada setor em 30° , 90° e em 150° , conforme Figura 67b foram retiradas as amostras para fazer as macrografias.

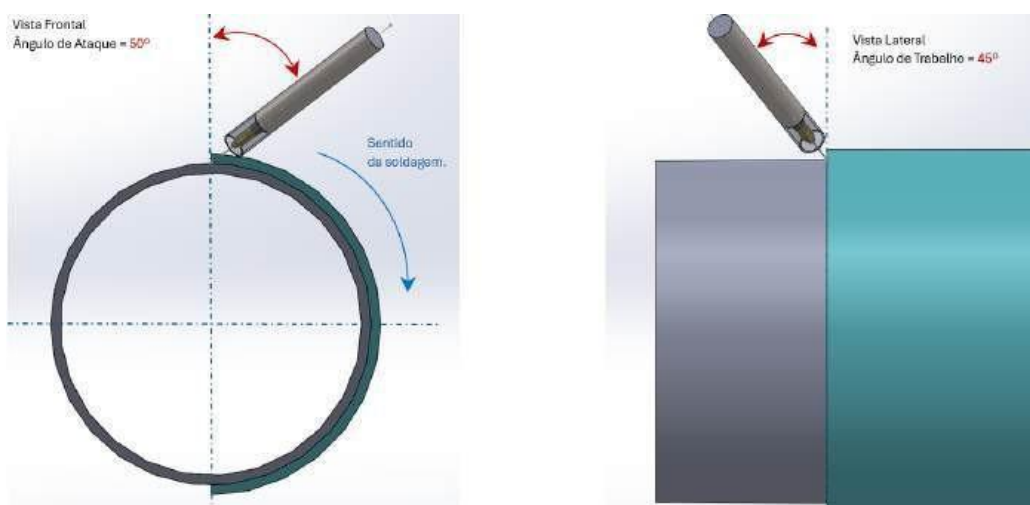


Figura 66 - Posição relativa da tocha em relação à junta. Fonte: O autor.

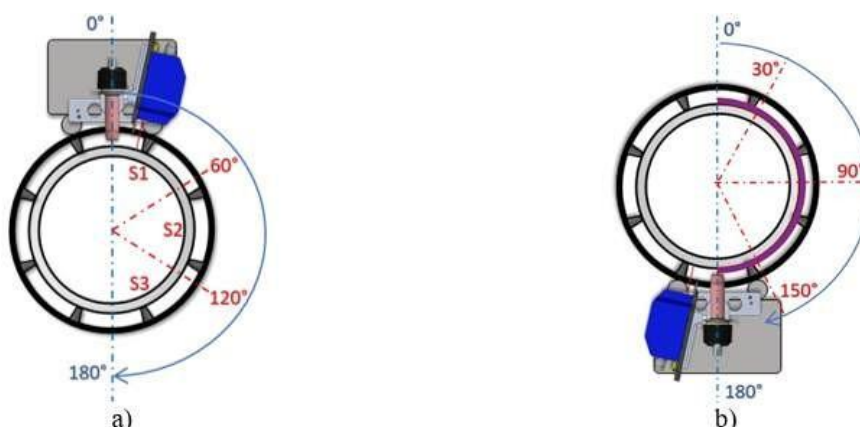


Figura 67 - Posições [4] (adaptado). Em a) Dos corpos de prova; b) Das macrografias.

Quanto à parametrização dos ensaios, inicialmente optou-se por uma combinação mais conservadora e já testada, $K_s = 100$ e $K_d = 1$. Logo, com base no *know-how* adquirido pelos experimentos realizados até o momento e com base na experiência pregressa do soldador, foi possível realizar soldagens exploratórias mais assertivas com um único passe, com o objetivo de delimitar os parâmetros que seriam usados. Assim que se obteve uma solda aparentemente satisfatória, sem escorrimento, defeitos superficiais e distribuição regular ao longo da união, resultados dos parâmetros utilizados, conforme registrado na primeira linha da Tabela 16 (denominada “soldagem com um único passe”), foi feita uma avaliação da penetração da solda e do preenchimento da junta, a fim de que novos ajustes pudessem ser realizados.

Então, para a realização do próximo teste, com a aplicação de três passes destinados ao preenchimento total da junta, e considerando os ensaios realizados no Subitem 4.1.1.1, que demonstraram uma maior sensibilidade do processo e um aumento da estabilidade à variação do parâmetro K_d , optou-se, no sentido de racionalizar o número de ensaios desta tese e de testar os efeitos e a sensibilidade do fator K_d , pela utilização de uma combinação $K_s = 100$ e $K_d = 5$, aliada à um aumento da DBCP a fim de diminuir a penetração, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados nos experimentos na junta circular de filete. Fonte: O autor.

Soldagem manual e mecanizada com um único passe						
U (V)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	K_s	K_d	DBCP (mm)	Posição Tocha
30,5	10,0	60,0	100	1	14	Puxando
Soldagem manual e mecanizada com três passes						
30,5	10,0	60,0	100	5	17	Puxando

Considerando a importância e os riscos envolvidos, devido às solicitações mecânicas, e por se tratar de um elemento que vai fazer parte de um reforço estrutural do duto, sujeito à carregamentos cíclicos, é de suma importância que a solda esteja dentro de padrões internacionais de qualidade e segurança [120]. Além disso, cabe ressaltar que, atualmente, não há norma da Petrobras que determine um critério de qualidade geométrica para solda de abraçadeira em duto, apenas norma para a soldagem de dupla-calha [2]. Por isso, as geometrias das secções transversais das soldas realizadas foram avaliadas de acordo com as seguintes normas, que

servem como referência para os projetos e procedimentos da Petrobras: a norma PCC-2 [121], que trata de critérios de pós construção de dutos; a norma B31-3 [122], que trata de dutos de pressão em operação; e a ISO 5817 [123], que trata das tolerâncias das geometrias de soldas.

De acordo com a norma PCC-2 [121], as soldas de filete em junta sobreposta orbital executadas neste tipo de reparo devem ter as seguintes características:

- Para as chapas da calha de reparo com espessura menor ou igual 1,4 vezes a espessura do tubo que está sendo reparado, a perna da solda de filete deve ter a medida da espessura da chapa de reparo mais a medida do gap conforme Figura 68.

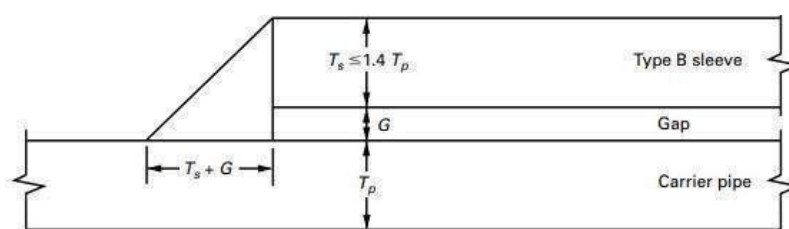


Figura 68 - Tamanho da perna da solda de filete (PCC-2) [120].

- Para as chapas da calha de reparo com espessura maior que 1,4 vezes a espessura do tubo que está sendo reparado, a perna da solda de filete deve ter 1,4 vezes a medida da espessura da chapa do tubo mais a medida do gap conforme Figura 69.

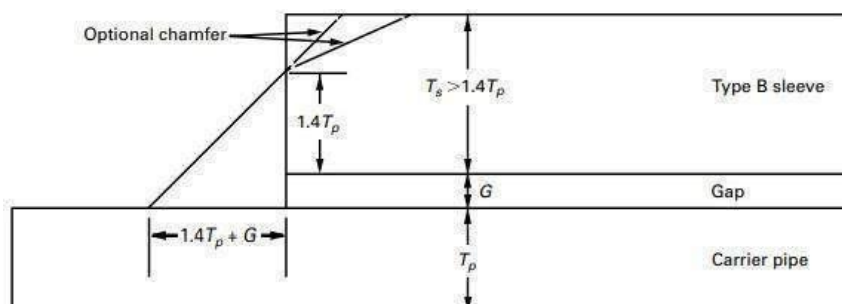
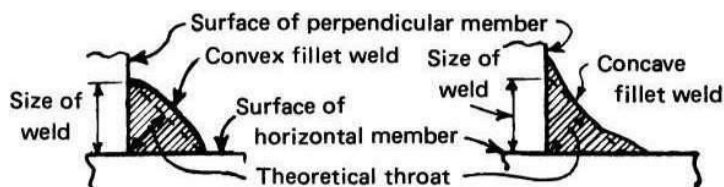


Figura 69 - Tamanho da perna da solda de filete, calha maior que 1,4 (PCC-2) [120].

Com relação ao tamanho da garganta teórica, conforme a norma ASME B31-3 [122], Cap. V, Art. 328.5.2, mais restritiva que a PCC-2 [121] para solda de filete, foi

adotado o critério de tamanho mínimo de 0,707 vezes em relação ao tamanho da perna da solda, conforme Figura 70. Ou seja, se considerarmos que a solda de filete ideal é um triângulo isósceles, a garganta teórica corresponde a sua bissetriz.



Equal Leg Fillet Weld

GENERAL NOTE: The size of an equal leg fillet weld is the leg length of the largest inscribed isosceles right triangle (theoretical throat = $0.707 \times \text{size}$).

Figura 70 - Garganta teórica mínima para solda de filete (ASME B31-3) [124].

A convexidade de uma solda de filete representa um reforço em termos de resistência mecânica, do ponto de vista da rigidez e de alívio quanto aos concentradores de tensão na junta. Porém há tolerâncias que devem ser respeitadas quando o excesso de convexidade se torna uma imperfeição da geometria da seção transversal da solda. Nos resultados deste trabalho se adotou como critério de avaliação a norma ISO 5817 [123], Item 1.10-503-B, que é subsidiária e referenciada por normas de reparo como a norma PCC-2 [121], e a norma B31-3 [122]. Este critério considera o valor máximo de 3 mm aceitável para a convexidade da solda, medido de acordo com o índice "h" na Figura 71 abaixo.

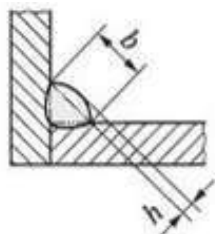


Figura 71 - Critério para medição da convexidade da solda de filete (ISO 5817) [122].

Com base nas premissas descritas acima, as geometrias foram analisadas, e os resultados podem ser conferidos no Subitem 5.5. As macrografias foram denominadas por amostras (A_n) para facilitar as referências dos comentários. Foram consideradas quatro medidas principais para realizar estas análises: a garganta teórica (G), a perna da solda (P), a penetração (p) e o *gap* entre o tubo e a calha (g).

Quanto ao monitoramento térmico, de acordo com o PRCI [124], para as soldagens em operação, a fim de evitar a diminuição da resistência mecânica, do ponto de vista metalúrgico, da região soldada no tubo, e consequentes rompimentos por *burn through*, a temperatura na parede interna da tubulação, em alinhamento com a raiz da junta soldada, deve ser de no máximo 982 °C. Em virtude desta normativa, foram fixados termopares na posição 30°, na parede interna do duto alinhados com a raiz da junta, para assim monitorar a temperatura da região com maior aporte térmico do interior do tubo, conforme a posição T₁ indicada na Figura 72a. Quanto à região externa do duto, foram fixados termopares na posição 30°, na quina da borda da chapa de reparo, conforme a posição T₂ indicada na Figura 72b, e assim comparados com as aquisições da câmera térmica, conforme Figura 72c.

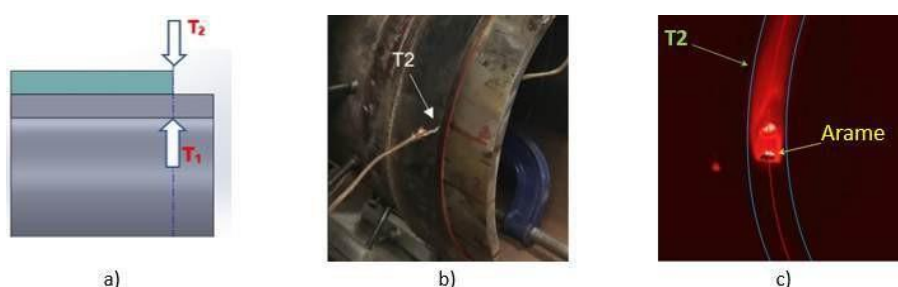


Figura 72 - Posição dos termopares. Fonte: O autor. Em a) Posição T₁, no interior do tubo alinhado com T₂, na calha; b) Imagem da fixação do termopar T₂, na borda da calha; c) Ponto T₂ de aquisição da câmera térmica durante a soldagem.

Nesta etapa da tese, o leitor mais atento já deve ter reparado que há uma diferença na variação de corrente quando medida baseada na média móvel, conforme Figura 73a, e na variação de corrente instantânea quando medida da perspectiva dos pontos aquisitados pelo SAP (5 kHz de taxa de aquisição), conforme Figura 73b.

Ao analisar o gráfico da Figura 73a, pode-se dizer que os valores de dl/dt calculados com base na média móvel de corrente representam o reflexo das variações de tensão provocadas pelas variações de comprimento do arco elétrico ao longo do processo e, que são controlados pelos valores de K_s e K_d , doravante chamados de *dl/dt m. sub.* e *dl/dt m. desc.*, definindo a estabilidade da transferência metálica, do arco e da poça de fusão.

Quanto ao gráfico da Figura 73b, considerando que **não** há ocorrências de quedas de tensão próximas a 8 V e que as variações do período de 100 ms parecem não ser uma reação da fonte às quedas de tensão, mas, sim, um “*ripple*” inerente à sua própria forma de controlar a corrente, estes valores, aqui chamados de *dl/dt*

efetiva m. sub. e di/dt efetiva m. desc., foram calculados a partir da média de um somatório de todos os pontos, picos de trechos ascendentes, e da média de um somatório de todos os pontos, picos de trechos descendentes, respectivamente.

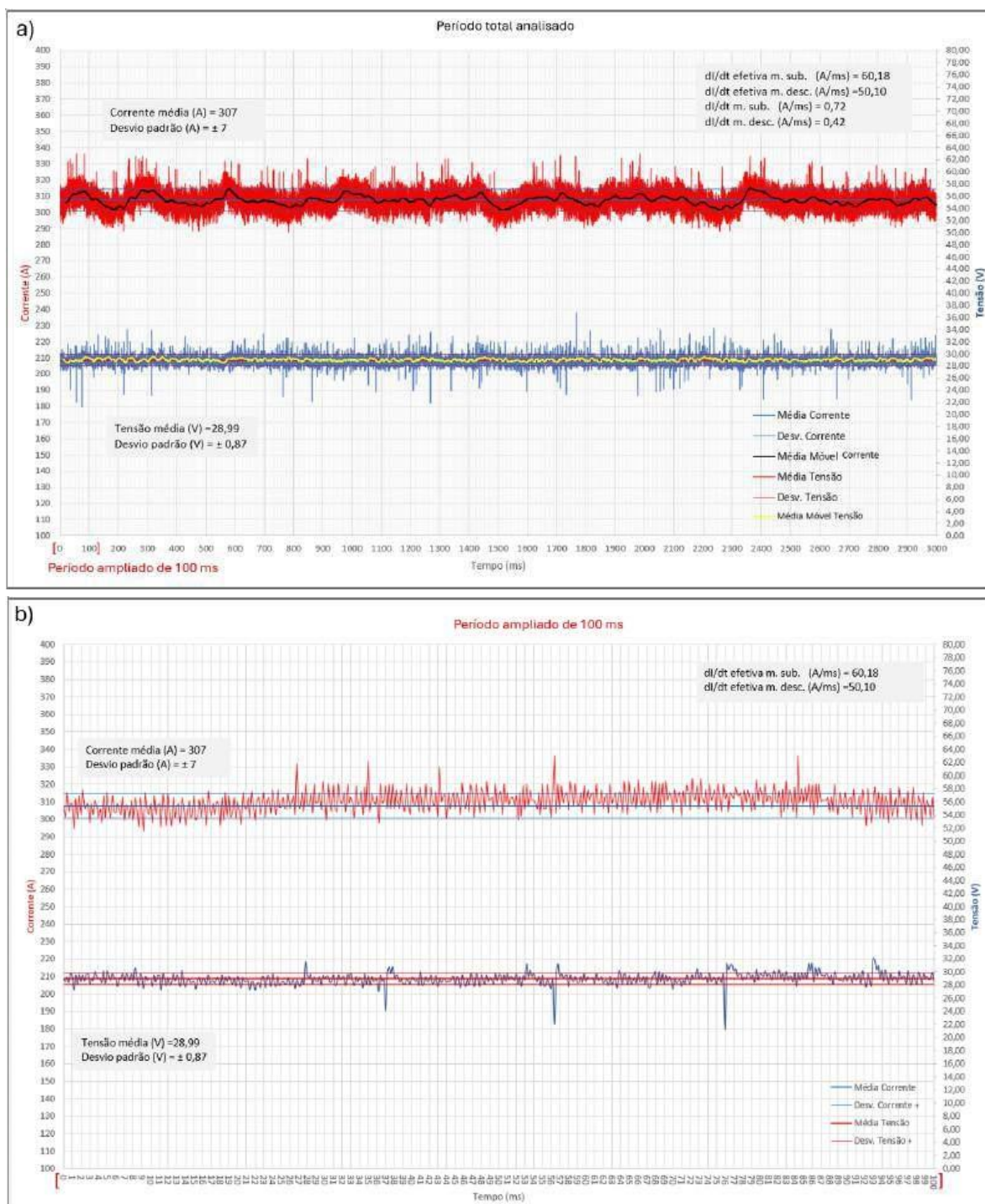


Figura 73 - Exemplo de análise de oscilograma para evidenciar as diferentes formas de medir os valores de di/dt . Em a) Período total; b) Trecho de 100 ms. Fonte O autor.

Os resultados obtidos com as duas metodologias de medição são apresentados nos desdobramentos desta tese.

4.3.2 Estudo prospectivo da utilização do *DynaFlex-Arc* para a soldagem de revestimento com Inconel 625

Atualmente, verifica-se que o processo MIG/MAG com arco enterrado e controle dos efeitos indutivos tem sido utilizado visando aplicações de alta performance em penetração, porém sua condição de alta corrente e alta taxa de fusão também o torna atrativo do ponto de vista de aumento da velocidade de soldagem (V_s), e, portanto, maior produtividade em revestimentos. O uso de processos de alta corrente em aplicações de revestimento é pouco explorado na literatura devido à sua associação com alta penetração, o que é contraproducente do ponto de vista de revestimento, no qual deseja-se baixa diluição. Como mostrado na Revisão Bibliográfica, a parca informação obtida descreve apenas superficialmente o funcionamento da técnica para aplicação em revestimento metálico [58]. Além disso, também foi referenciada aplicação do processo MIG/MAG em modo *spray*, para revestimento [115].

Assim, estes experimentos visam explorar e avaliar uma inovação baseada na adaptação de um processo de alta performance, originalmente utilizado para aplicações de penetração, adaptado para o objetivo de aumento da velocidade/produtividade em aplicações de revestimento.

Os experimentos foram realizados em uma bancada, conforme o esquemático da Figura 74, constituída por um Tartílope V2 (A), uma fonte IMC DigiPlus A7 (B), um sistema de aquisição de dados (SAP) IMC (C), mesa de processamento de imagem (D), gás de processo Ar+25%He (D), e uma câmera de alta velocidade com taxa de aquisição de 5.000 *frames* por segundo (F). Para a execução da soldagem foram utilizados o arame Inconel 625 com diâmetro de 1,2 mm, e corpos de prova constituídos de chapas de aço 1020 com 12,7 x 40 x 300 mm.

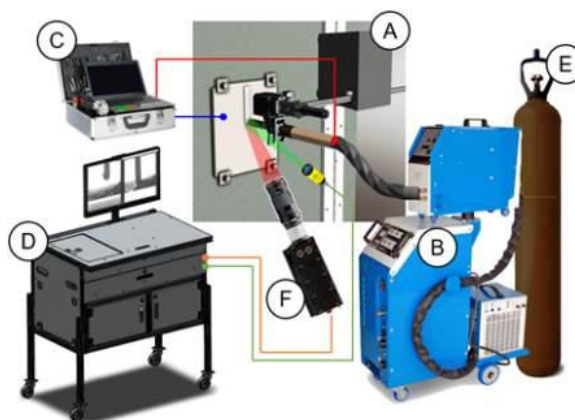


Figura 74 - Esquema do layout da bancada. Fonte: O autor.

Foram realizadas soldagens de revestimento na posição vertical descendente (norteados pelos resultados obtidos por Carvalho et al. [115]) com a tocha perpendicular (90°), com deposição de três camadas de revestimento, e uma sobreposição lateral de 25% entre os cordões da mesma camada. Assim, para levantar dados comparativos, foram conduzidos ensaios com o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito, MIG/MAG com transferência em *spray* (ao aplicar um maior comprimento de arco pela redução da V_a , se obtém o processo convencional, mesmo que o K_s e o K_d estejam configurados para *DynaFlex*), e com o processo *DynaFlex-Arc* com transferência por *spray* em *streaming*, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de soldagem utilizados. Fonte: O autor.

Parâmetros programados	Processos		
	MIG/MAG Globular	MIG/MAG <i>spray</i>	<i>DynaFlex-Arc</i>
U (V)	25,5	32,5	32,5
V_a (m/min)	8,5	10,5	13,5
V_s (cm/min)	50	60	60
K_s (adimensional)	100	100	100
K_d (adimensional)	50	20	20
Freq. Oscil. * (Hz)	4	4	3
Larg. Oscil. (mm)	16	16	16
DBCP (mm)	16	16	16

*Sem tempo de parada, triangular.

Inicialmente, foram executadas soldagens depositando um único cordão até que a transferência por curto-circuito fosse registrada pelos oscilogramas. O mesmo procedimento foi adotado para o modo em *spray*.

Na sequência, uma vez definidos os parâmetros da transferência por *spray*, foram então iniciados os experimentos para encontrar a faixa de operação de atuação do *DynaFlex-Arc*. Assim, a velocidade de arame foi gradualmente aumentada até que os oscilogramas registrassem iminências cadentes de curtos-circuitos. Neste momento o Ks e o Kd foram regulados, de forma que a subida da corrente fosse rápida o suficiente para evitar um curto-circuito e gradualmente lenta para que voltasse ao regime de trabalho com o mínimo de respingos, no sentido de evitar perturbações na poça de fusão e manter seu equilíbrio, sem a característica de cratera (desejável para operações de alta penetração). Logo que o Ks e o Kd foram definidos, os demais parâmetros foram reajustados e, assim, a repetibilidade testada com mais um ensaio.

Quanto à frequência de oscilação empregada na soldagem com o *DynaFlex-Arc*, devido ao aumento da velocidade de alimentação de arame e ao consequente aumento de material depositado e da potência, foi registrado um certo escorrimento de metal fundido, devido à agitação provocada pela oscilação da poça. Assim, ao diminuir a frequência de oscilação de 4 Hz para 3 Hz, o problema foi resolvido.

Deste modo, foram realizadas filmagens com câmera de alta velocidade para registrar a transferência metálica e o comportamento da poça de fusão.

Finalmente, a composição química das camadas foi analisada com um espectrógrafo SPECTROTEST TXC35. As medições foram realizadas sempre no centro da chapa usando como referência a face inferior igual à 0 mm. Assim, foram medidos os seguintes pontos: para a primeira camada o ponto com 13,7 mm de altura em relação à face inferior da chapa, a segunda camada o ponto com 14,7 mm e a terceira camada com 15,7 mm de altura, conforme Figura 75.

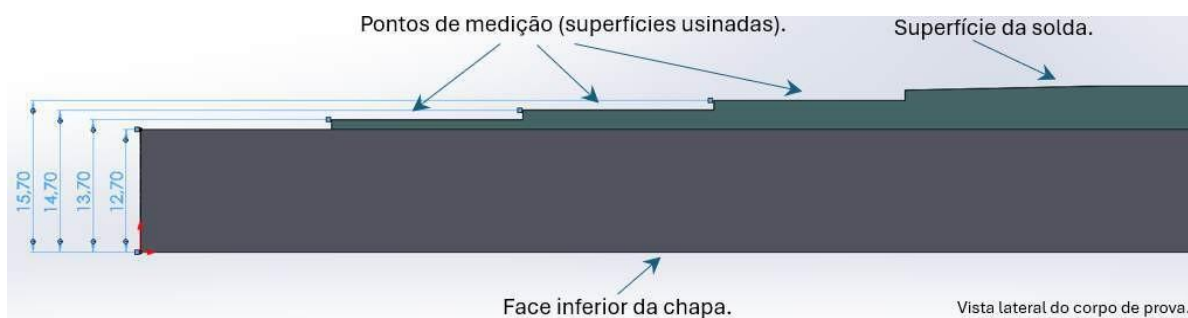


Figura 75 - Esquema com pontos de medição da composição química no CP. Fonte: O autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESTUDO DOS EFEITOS DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE K_s E K_d E SUAS RELAÇÕES COM AS TAXAS DE VARIAÇÃO DE SUBIDA E DE DESCIDA DE CORRENTE

Conforme apresentado no Capítulo 4, a fim de determinar qual o mais regular dentre os ensaios realizados, e com base nos dados aquisitados, foi utilizada como metodologia para a análise, para fins de comparação, a utilização de ciclogramas de corrente x tensão, histogramas de tempos de curto-circuito, além dos oscilogramas de transientes de tensão e de corrente de seus períodos mais significativos, gerados através do próprio SAP.

Neste contexto, lembrando que todos os testes realizados neste Subitem foram feitos com os mesmos parâmetros de soldagem de entrada e consumíveis, $U = 29$ V, $V_a = 13$ m/min, $V_s = 45$ cm/min e DBCP = 15 mm, gás de processo C8 com 15 l/min e arame ER70S-6 de 1,2 mm. Com relação às sete combinações de valores de K_s e K_d , elas podem ser revistas na Tabela 8, e são apresentadas e comentadas de acordo com a evolução da exposição dos resultados.

Tabela 8 - Combinações de K_s e K_d utilizadas. Fonte: O autor.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
K_s (adimensional)	1	1	1	100	200	100	200
K_d (adimensional)	1	100	200	100	200	1	1

Primeiramente, quanto aos experimentos realizados com a combinação de $K_s = 1$ e $K_d = 1$, por representar o valor total de indutância do equipamento e com base na interpretação do comportamentos das curvas dos gráficos da Figura 76, já é possível constatar que a soldagem ocorreu de forma instável e com total descaracterização em relação à transferência metálica esperada para o *DynaFlex-Arc*, em *spray em streaming*. Além disso, é possível analisar o período transcorrido, conforme sequência de eventos apresentada nos três *frames* da Figura 76 (pelo número do frame é possível conferir a região de ocorrência de cada evento na filmagem). O *frame* nº -002319 foi considerado o último instante de arco aberto,

antes do curto-circuito, no *frame* nº -002216 é possível observar a ponta do arame, que não está mais em uma condição em *streaming*, em contato com a poça de fusão e, finalmente, no *frame* nº -001481 a ocorrência da reabertura do arco.

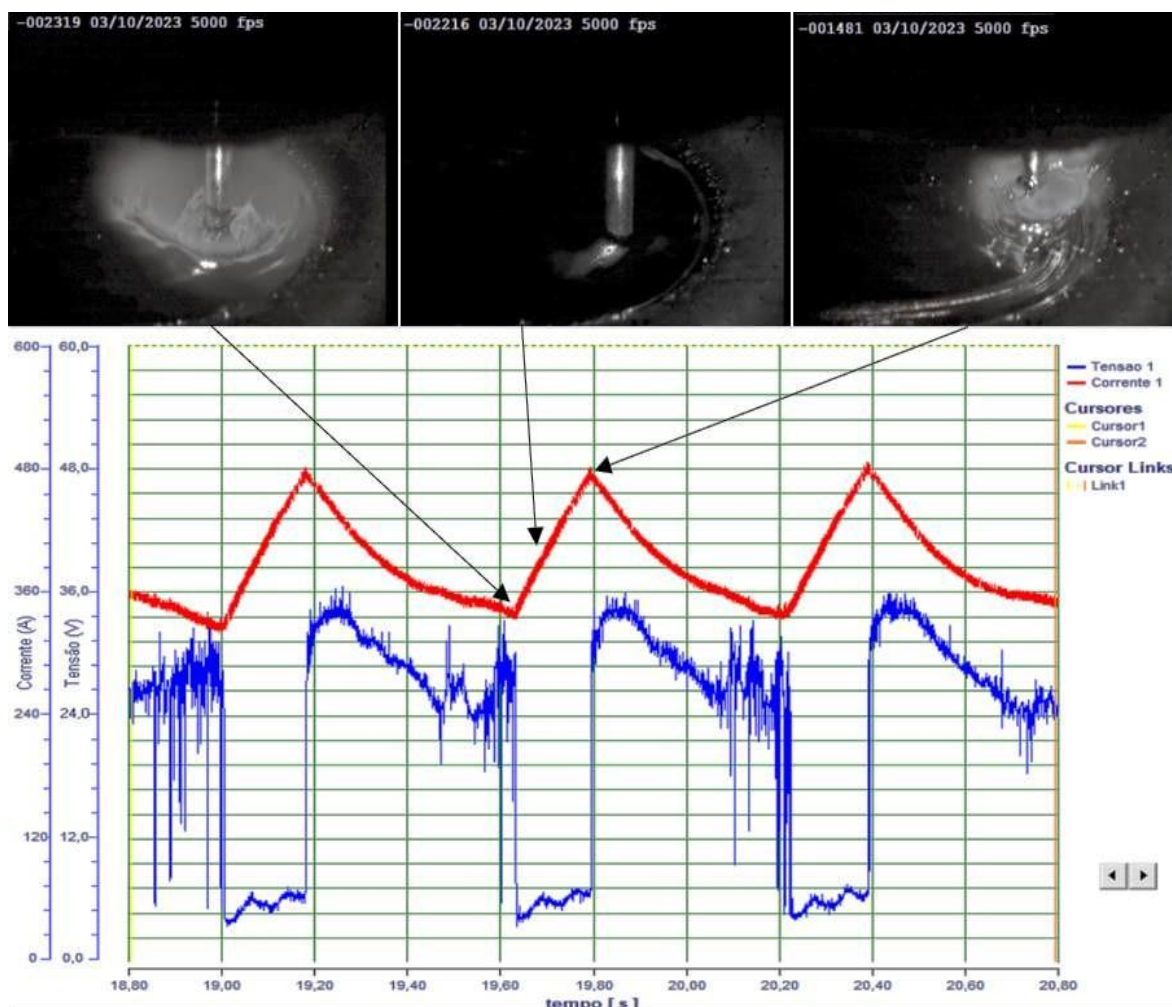


Figura 76 - Efeito indutivo em uma combinação de $K_s = 1$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.
O vídeo pode ser acessado em: <https://youtu.be/4OaoTFEAzdk>

Ainda em relação à Figura 76, interessante que os oscilogramas, à primeira vista, se parecem muito com oscilogramas de transferência metálica por curto-circuito convencional. Mas ao verificar os tempos de arco e curto, nota-se que são muito maiores que aqueles resultantes de uma transferência metálica por curto-circuito convencional, e a transferência não é nada parecida com o curto-circuito convencional, como corroborado pelos vídeos. De forma que, a taxa de subida de corrente (di/dt) é tão baixa, em torno de 0,8 A/ms, que na ocorrência de um curto-circuito com transferência metálica, a reação da fonte não consegue impedir o

fechamento da poça de fusão. Neste viés, também é possível notar pelo vídeo que, uma descida de corrente muito lenta mantém seus valores em patamares muito altos por muito tempo, resultando num elevado comprimento de arco, descaracterizando o arco curto de *buried arc*.

Os resultados das aquisições podem ser conferidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Aquisições. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:
	Ks = 1 e Kd = 1
di/dt sub. méd. (A/ms)	0,8
di/dt des. méd. (A/ms)	0,3
Im (A)	389
Ie (A)	391
Um (V)	22,9
Pm (W)	8.880

Embora este ensaio sirva para demonstrar os efeitos indutivos plenos da fonte, principalmente, sob o ponto de vista do tempo de reação de subida da corrente frente a um evento de curto-circuito, a análise gráfica dos dados foi desconsiderada. Afinal, esta combinação causou uma condição completamente inaceitável, já observada em uma inspeção visual. Demonstrando assim, um resultado ineficaz para esta combinação de Ks e Kd.

Na sequência, é possível observar que os experimentos referentes às próximas combinações, a primeira Ks = 1 e Kd = 100 e a segunda Ks = 1 e Kd = 200, resultaram em condições similares, conforme oscilogramas apresentados na Figura 77. Nestes, é possível observar a demora da taxa de subida da corrente e a rapidez com que ela desce, reflexos das combinações de Ks e Kd utilizados.

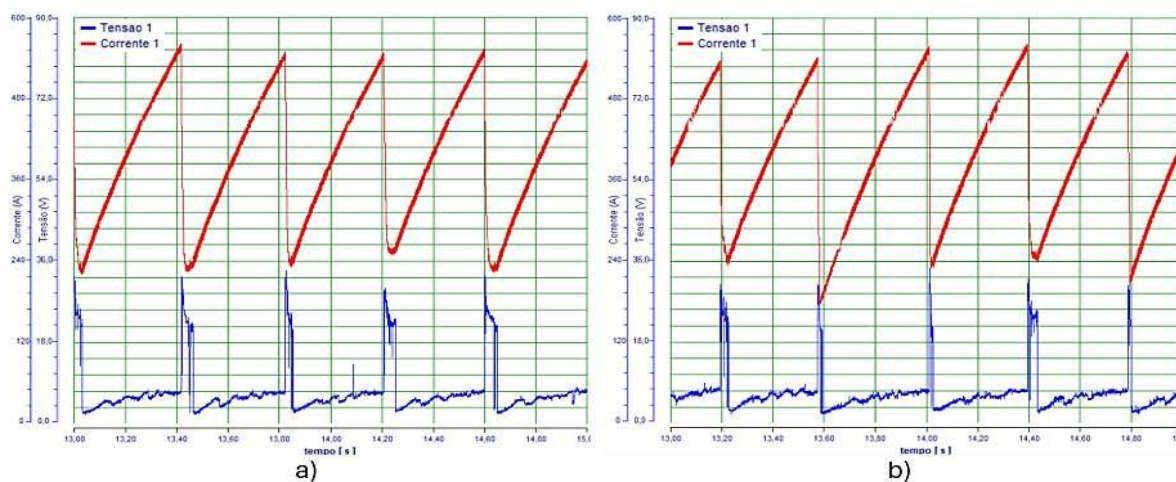


Figura 77 - Oscilogramas. Fonte: O autor. Em a) $K_s = 1$ e $K_d = 100$; b) $K_s = 1$ e $K_d = 200$.

Como consequência destes efeitos indutivos, ocorreram situações de transferências metálicas completamente caóticas que resultaram em soldas absolutamente descaracterizadas, conforme podem ser observadas nos vídeos <https://youtu.be/L9jVZiDW0kM> e <https://youtu.be/ycB6YLmru2g>, respectivamente. Estes experimentos demonstraram, de forma exagerada, o que acontece quando o curto-circuito não é interrompido de forma eficaz. Ou seja, um efeito indutivo insuficiente para aumentar a taxa de subida da corrente permite a ocorrência de uma instabilidade que estabelece uma ponte metálica que, conseqüentemente, acaba gerando uma transferência metálica em uma condição indesejável durante o processo. Os resultados das aquisições podem ser conferidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Aquisições. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:	
	$K_s = 1$ e $K_d = 100$	$K_s = 1$ e $K_d = 200$
di/dt sub. méd. (A/ms)	0,8	0,8
di/dt des. méd. (A/ms)	13,6	30,2
I_m (A)	392	393
I_e (A)	403	404
U_m (V)	7,0	6,6
P_m (W)	2.674	2.603

Em seguida, foram realizados os experimentos referentes às combinações $K_s = 100$ e $K_d = 100$; e $K_s = 200$ e $K_d = 200$. Conforme oscilograma da Figura 78, é possível observar que a frequência de eventos de curto-circuito é maior em comparação aos ensaios anteriores, considerando, igualmente, um período de 2 s.

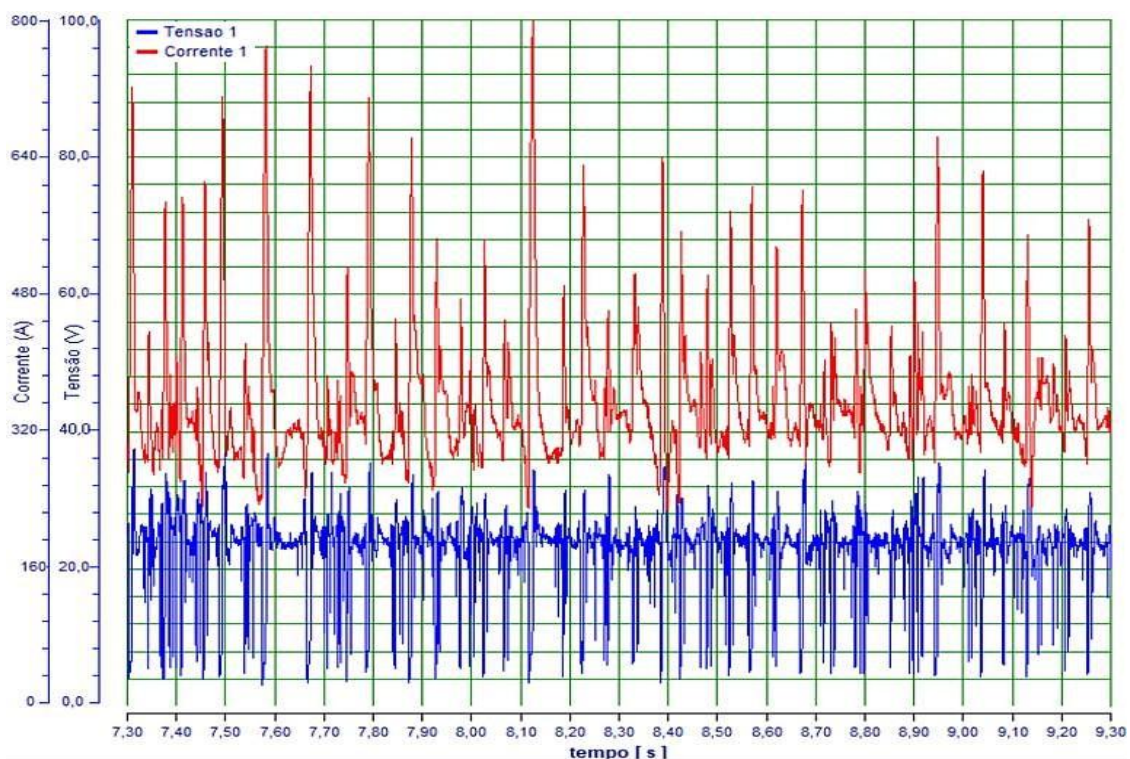


Figura 78 - Oscilograma resultado de uma combinação $K_s = 100$ e $K_d = 100$. Fonte: O autor.

O gráfico constando a média móvel da corrente, com 50 períodos, referente ao oscilograma anterior, pode ser conferido na Figura 79, a fim de destacar as diferentes formas de mensurar um mesmo dado.

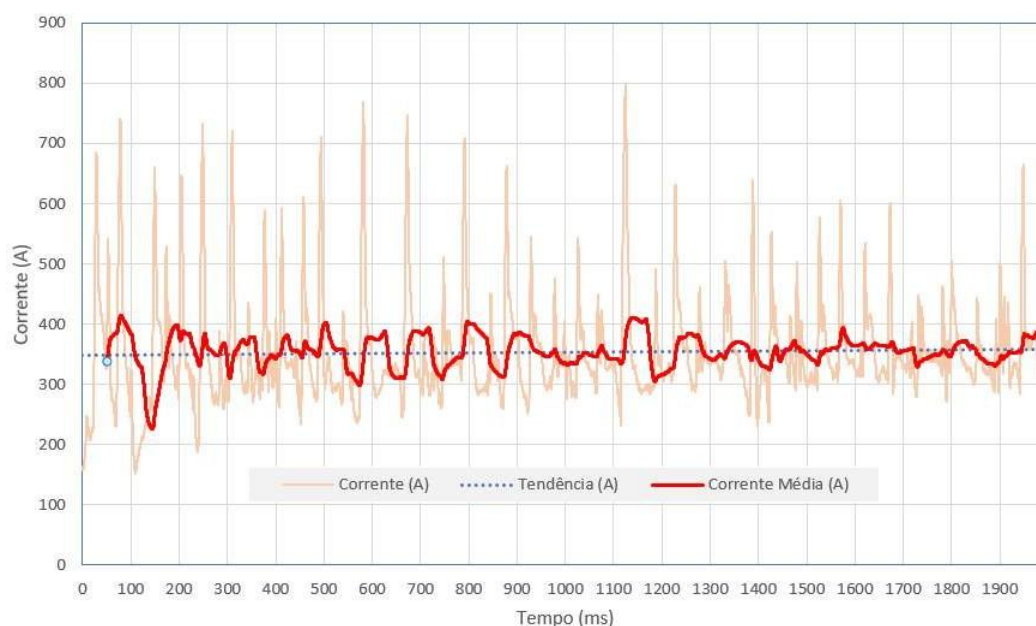


Figura 79 – Gráfico da corrente média, com combinação $K_s = 100$ e $K_d = 100$. Fonte: O autor.

Devido a este aumento na frequência de curtos, foram analisados oscilogramas com períodos menores, em intervalos de 0,2 segundos, conforme Figura 80, neles é possível observar as ocorrências de transferências por curto-circuito, que mesmo irregulares (em termos de frequências e amplitudes de variação), apresentam um processo com menos instabilidades críticas, em relação às observadas nos casos anteriores (Figuras 76 e 77).

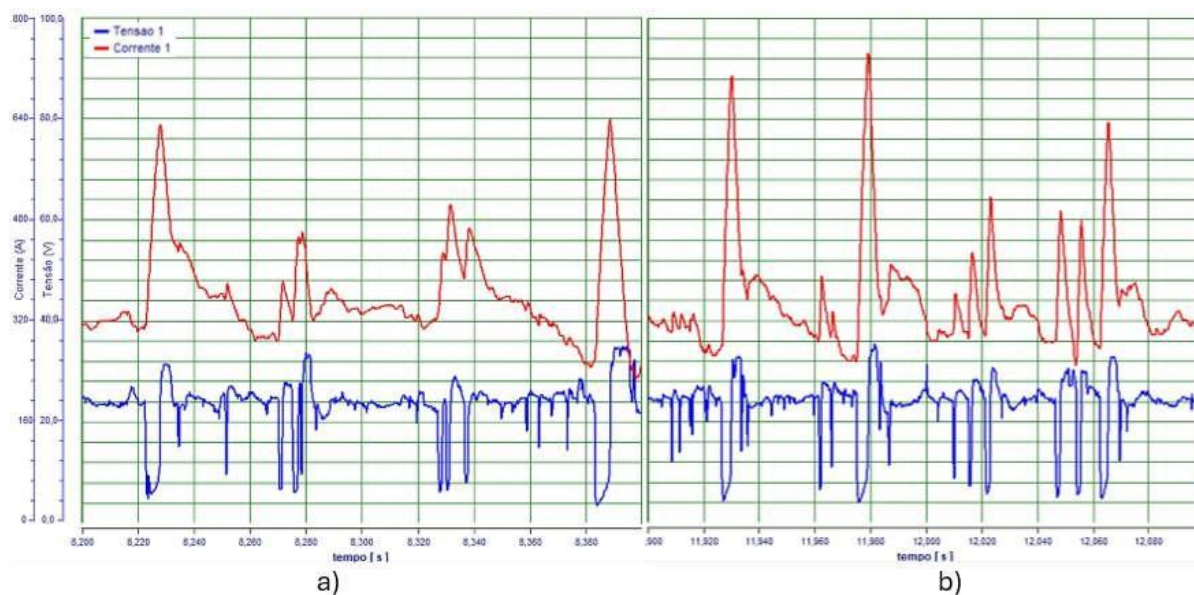


Figura 80 – Oscilogramas detalhados. Fonte: O autor. Em a) $K_s = 100$ e $K_d = 100$; b) $K_s = 200$ e $K_d = 200$.

Todavia, considerando as características de transferência metálica desejáveis para o *DynaFlex-Arc*, já comentadas neste capítulo, estas combinações de K_s e K_d não são aceitáveis para este tipo de processo. Os vídeos destes experimentos podem ser conferidos em https://youtu.be/fRCNvud6vSg?si=BY8znhjul_xA4L7N e <https://youtu.be/0wmRUVeP2To?si=eqJ9jRYtdnO0Uma5>, respectivamente. Em ambos, é possível observar que os eventos de curtos-circuitos prolongados causam picos de corrente acima de 600 A, podendo chegar próximos de 800 A e que, apesar da queda rápida de corrente, geram aumento pontual da pressão do arco e agitação irregular da poça metálica, perturbando sua regularidade geométrica, assim como variações na corrente média, que leva a variações da taxa de fusão. O registro de um pico de corrente pode ser observado na Figura 81.

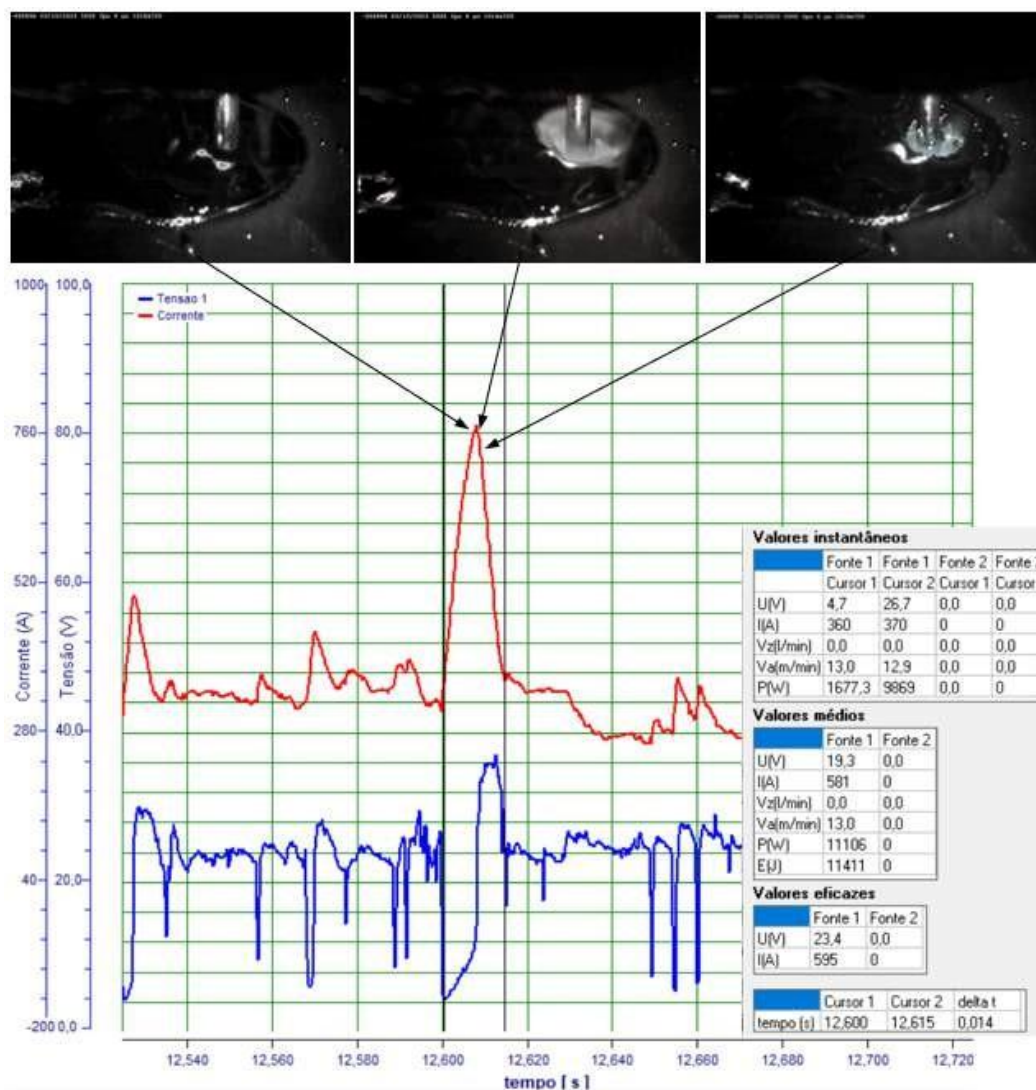


Figura 81 - Pico de corrente com uma combinação de $K_s = 100$ e $K_d = 100$. Fonte: O autor.

Os resultados das aquisições podem ser conferidos na Tabela 11, em que inicialmente é possível observar a influência das diferentes combinações de K_s/K_d na potência.

Tabela 11 – Aquisições. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:	
	$K_s = 100$ e $K_d = 100$	$K_s = 200$ e $K_d = 200$
dl/dt sub. méd. (A/ms)	66,9	121,4
dl/dt des. méd. (A/ms)	49,7	79,2
I_m (A)	342	352
I_e (A)	368	365
U_m (V)	23,6	23,5
P_m (W)	7.773	8171

Quanto aos dois últimos experimentos realizados, respectivamente, com as combinações de $K_s = 100$ e $K_d = 1$; e $K_s = 200$ e $K_d = 1$, é possível observar, conforme vídeo https://youtu.be/hFalbla-kdQ?si=K2d4oX-7uh22g_ux e <https://youtu.be/a45eRxpoHdU?si=FVPQYNKZMmZlqb85>, que as duas soldagens realizadas transcorrem de forma muito semelhante. Porém, conforme Figura 82, em que são apresentados os períodos em que os oscilogramas registraram maior faixa de variação de corrente, desconsiderando as regiões referentes ao começo e ao fim dos cordões, é possível observar que um K_s maior (menor indutância / maior velocidade) provoca o desfazimento do curto-circuito com um pico de corrente mais baixo, pois a corrente sobe mais rapidamente, acelerando os efeitos supostos que consubstanciam a extinção do curto (estriccionamento e expulsão da gota, causado pelo efeito *pinch*, ou vaporização da ponte metálica, ou antes que mais material seja alimentado, dificultando e atrasando ainda mais a extinção do curto), resultando em menos tempo para a corrente subir. Apesar destes argumentos, cabe salientar que não é possível observação direta devido a estar localizado ao fundo da cavidade da poça. Diante do exposto, esta primeira análise visual destes gráficos sugere que a combinação $K_s = 200$ e $K_d = 1$ promove mais estabilidade ao processo, quando comparada com a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 1$. Contudo, uma análise comparativa mais aprofundada, apresentando, principalmente, dados estatísticos, com base nos conceitos de estabilidade abordados na revisão bibliográfica, pode ser conferida na sequência.

Além disso, quando comparados com os oscilogramas das combinações anteriores, é possível observar que, resultam em uma faixa menor de variações de picos de corrente. O efeito positivo observado para estas parametrizações é que os eventos de curto-circuito geram picos mais baixos de corrente e, assim, ao reignitar o arco, mesmo que a velocidade de queda de corrente seja baixa, o valor de partida (pico) é baixo, não causando apreciável aumento de comprimento de arco e tampouco brusco aumento de pressão e agitação da poça, e o efeito de amortecimento da variação (queda) de corrente ajuda ainda a amortecer oscilações da poça, oriundas de variações de pressão / corrente (que já são baixas).

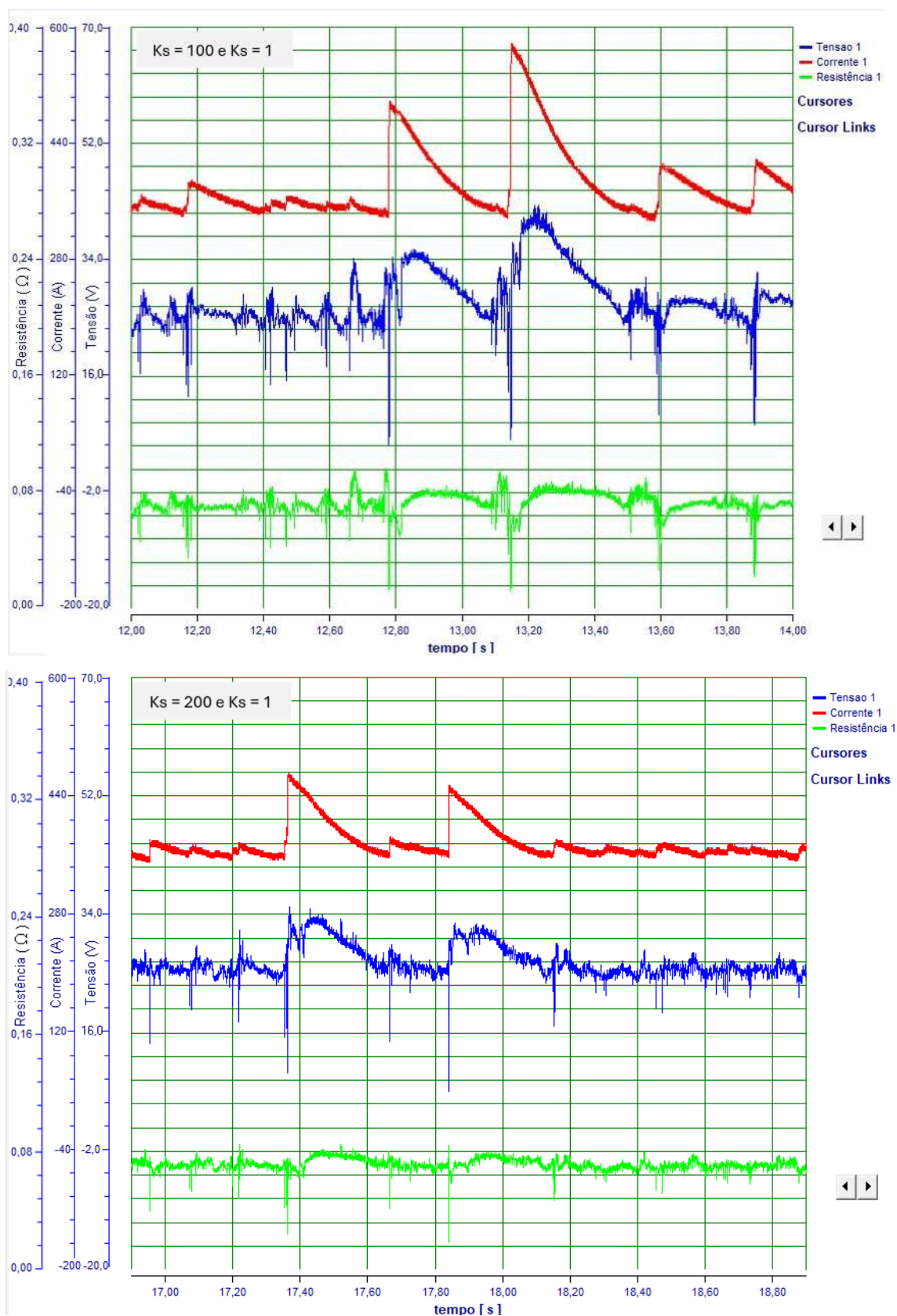


Figura 82 – Períodos em que os oscilogramas registraram os maiores picos de corrente para as combinações de $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Os resultados das aquisições podem ser conferidos na Tabela 12.

Tabela 12 – Combinações $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:	
	$K_s = 100$ e $K_d = 1$	$K_s = 200$ e $K_d = 1$
dl/dt sub. méd. (A/ms)	39,6	72,8
dl/dt des. méd. (A/ms)	0,5	0,4
I_m (A)	383	375
I_e (A)	386	376
U_m (V)	28,0	26,8
P_m (W)	10.856	10.098

Ainda com relação à Figura 82, considerando que, ao longo deste trabalho, para fins de mensuração e de comparação, são apresentados diversos valores de taxas de variação de subida e de descida de corrente, resultado da parametrização de diversos valores de K_c e K_d , cabe justificar que os resultados destas taxas não têm um valor exatamente correspondente, precisa e linearmente, a um dado K_s ou K_d utilizado. A justificativa destas variações de resultados deve-se, principalmente, ao fator da resistência, que varia em função da condição do arco elétrico e que se opõem à passagem de corrente, conseqüentemente causando variações nos valores de suas taxas de subida e de descida. Por isso, e para que o leitor possa visualizar esta variação da resistência e como forma de exemplo a ser considerado nos resultados dos demais experimentos, também foram apresentados na Figura 82 os oscilogramas referentes às variações de resistência destes períodos aqüisitados.

Conforme abordado na Revisão Bibliográfica, alguns critérios para a análise de regularidade e, conseqüentemente, estabilidade, devem ser definidos com base nas características de cada modo e condição de transferência metálica, para que então a soldagem seja avaliada. Assim, aprofundando a análise destes períodos aqüisitados e, considerando que a lógica de processamento do SAP depende de um valor de referência limiar, conforme explicado na Metodologia, que por *default*, o sistema considera como limiar os valores médios, de corrente ou tensão, do período analisado para realizar esta varredura e processar os dados de cada variável em seu respectivo oscilograma.

Com base nesta consideração e para facilitar a análise e visualização do leitor, um linha com valor médio de corrente é destacada na Figura 83. Assim, com base nesta referência todos os demais dados podem ser processados e extraídos a fim de serem quantificados e estabelecidos critérios para as comparações, sempre norteadas pela estabilidade, entre as soldagens realizadas.

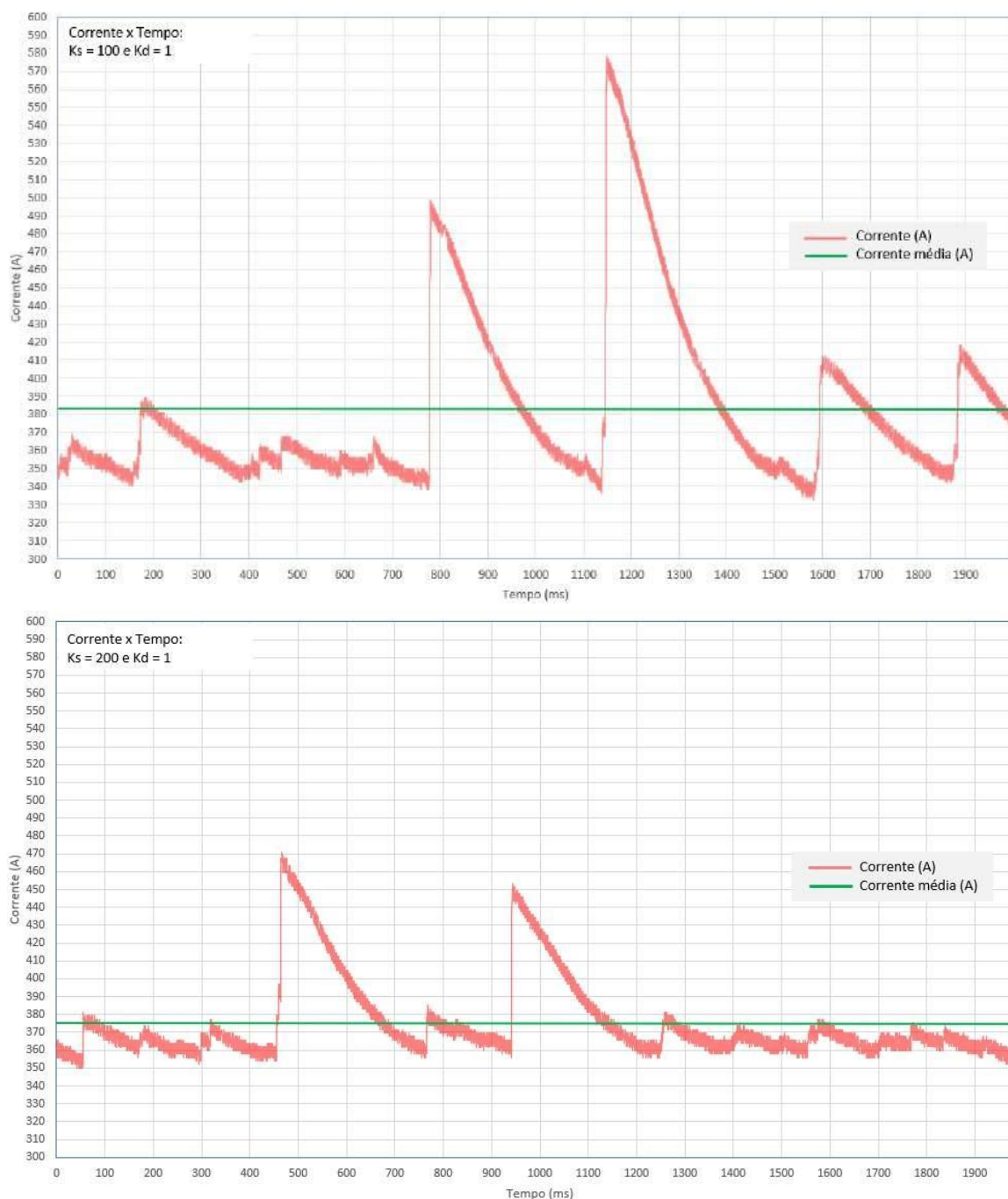


Figura 83 – Gráficos de variação de corrente para as combinações de $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Com relação aos histogramas, inicialmente, analisando o gráfico referente à variação da corrente, conforme Figura 84, cabe lembrar, conforme abordado na Revisão Bibliográfica, que o *DynaFlex-Arc* deve operar idealmente, em uma condição normal, em uma transferência metálica predominantemente sem contato, por isso sua faixa de variação de corrente deve ser estreita, de tal forma que quanto menor desvio padrão de picos de corrente, melhor é a estabilidade do período analisado. Logo,

seguem os valores processados pelo SAP, em que podem ser verificados os histogramas de picos de corrente e seus respectivos valores de picos, média e desvio padrão, para as referidas combinações de K_c e K_d , conforme Figura 84. Demonstrando assim que a combinação $K_s = 200$ e $K_d = 1$ resultou em um período de soldagem mais estável.

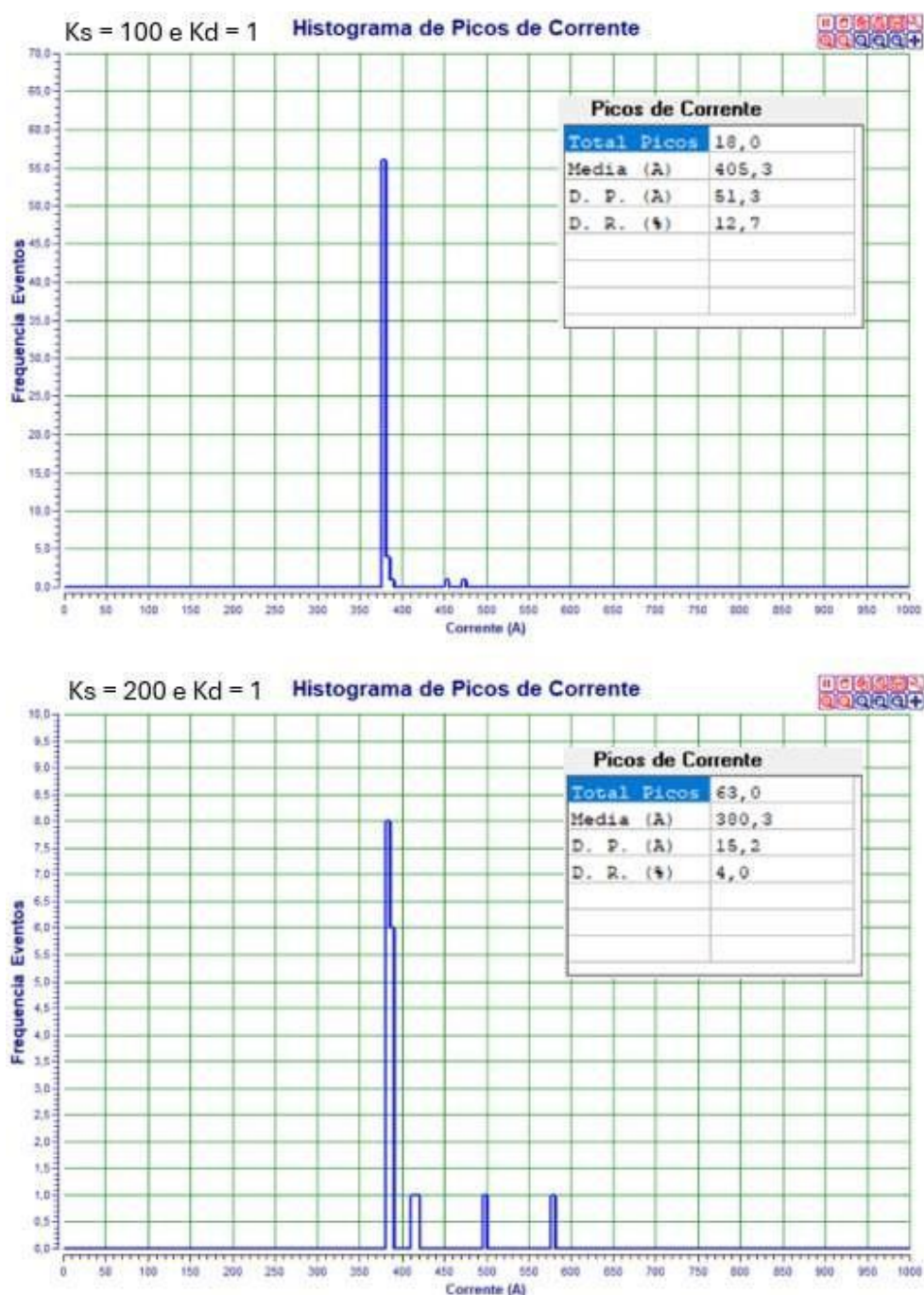


Figura 84 - Histogramas de picos de corrente, valores de média e desvio padrão resultado das combinações de $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Em seguida, são apresentados os gráficos referentes às variações de tensão, com destaque para a linha de representação da tensão média ou limiar por *default*, conforme Figura 85. Nestes gráficos é possível constatar que no caso de uma transferência predominantemente em *spray*, o limiar não estabelece uma referência válida para a extração de dados referentes aos tempos de curto-circuito ou tempos de arco aberto, conforme lógica apresentada em Materiais e Métodos.

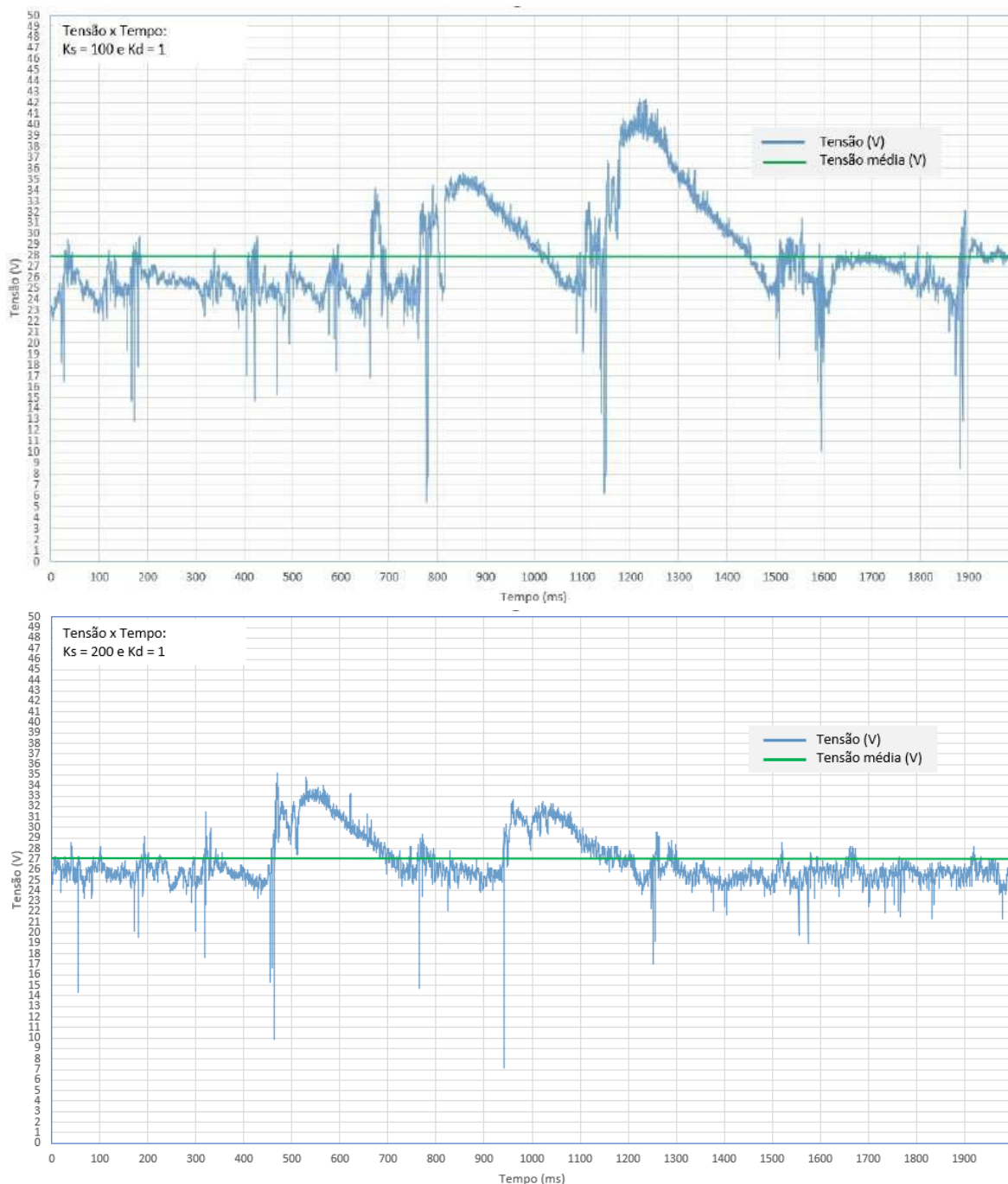


Figura 85 - Oscilogramas de tensão, $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Conforme dados apresentados na Figura 86 , é possível constatar nos histogramas de pico de tensão associados aos valores de média e desvio padrão, que os dados seguem a mesma coerência do resultados obtidos com a corrente, que quanto menor a média e os desvios-padrão, maior a estabilidade do período.

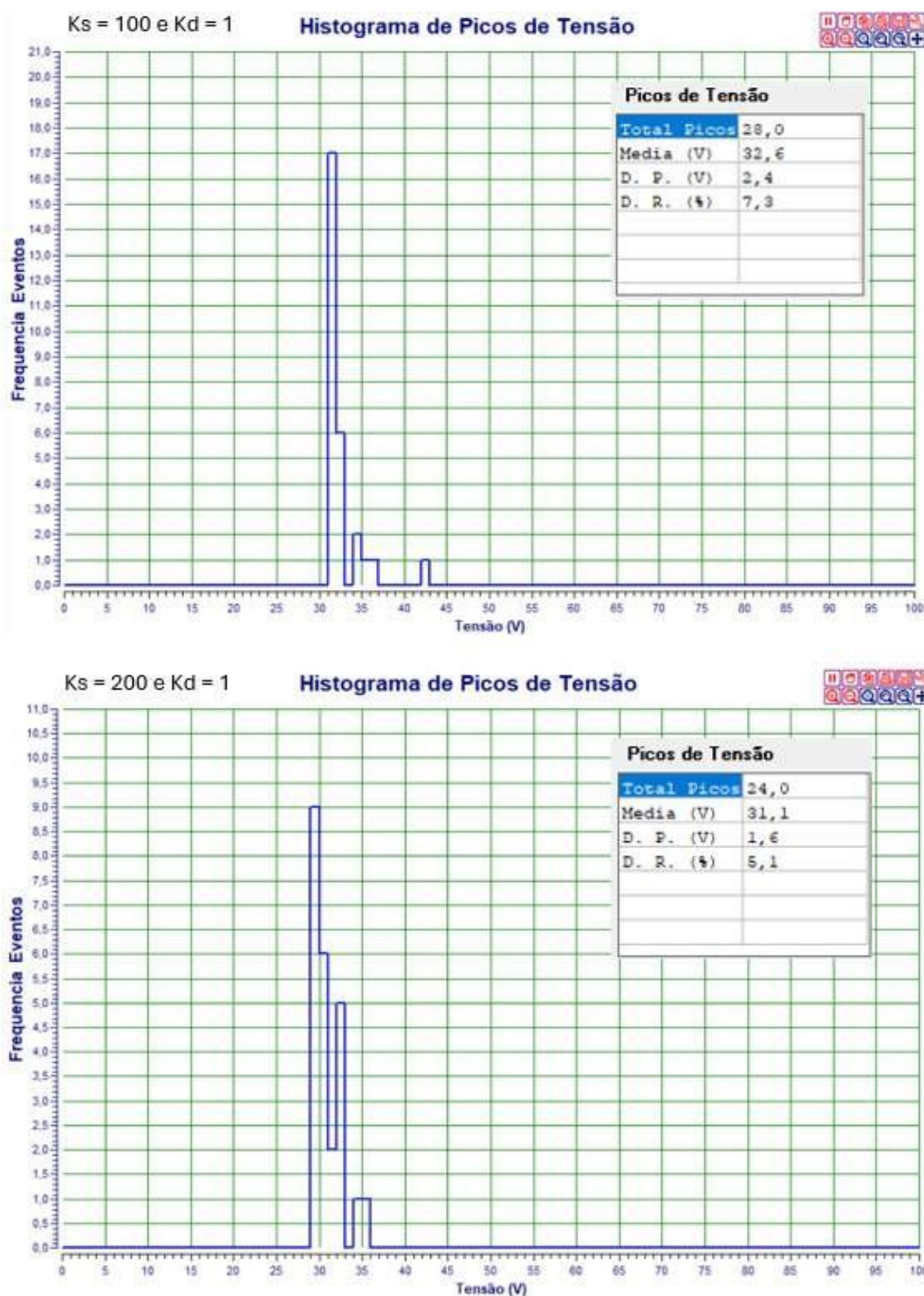


Figura 86 - Histogramas de picos de tensão, valores de média e desvio padrão dos períodos analisados para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Para concluir a análise das faixas de dados aquisitadas, para, então, seguir à análise de eventos específicos, são apresentados, conforme Figura 87, os ciclogramas de corrente e tensão. Neles é possível constatar, seguindo convergência dos resultados apresentados até o momento, que quanto menor a área preenchida pelo registro das aquisições e mais regular os ciclos, maior a estabilidade.

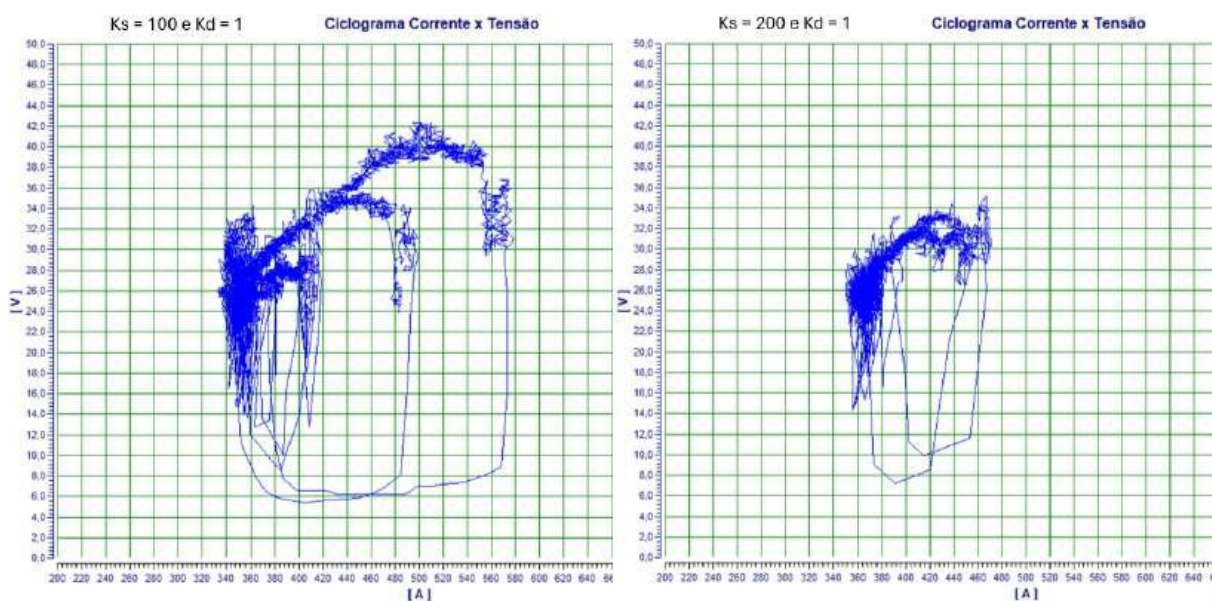


Figura 87 - Ciclogramas de Corrente x Tensão dos períodos aquisitados para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 200$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Logo, com o objetivo de demonstrar a pior situação, seguindo com os resultados dos experimentos, em uma análise mais aprofundada do evento de curto-circuito com o maior pico de corrente ocorrido na combinação $K_s = 100$ e $K_d = 1$, conforme sequência de *frames* apresentados na Figura 88 (*frames* numerados para facilitar as posições de referência na filmagem), é possível narrar a seguinte sequência de eventos: no *frame* nº -003578 a cratera diminui de tamanho e, em seguida, no *frame* nº -003572 o arco é extinto, porém, a dinâmica da fonte atua com uma di/dt de subida de 64,0 A/ms e um di/dt de descida de 0,8 A/ms, restabelecendo o arco elétrico, conforme *frame* -003566. Apesar da descaracterização da transferência metálica em *spray* em *streaming*, o processo retorna ao regime de operação. Todo o evento dura 3 ms, conforme registro do SAP apresentado na Figura 88 (detalhe no círculo vermelho da figura, informado como o termo “delta t”), mantendo a característica de depressão da poça (cavidade).

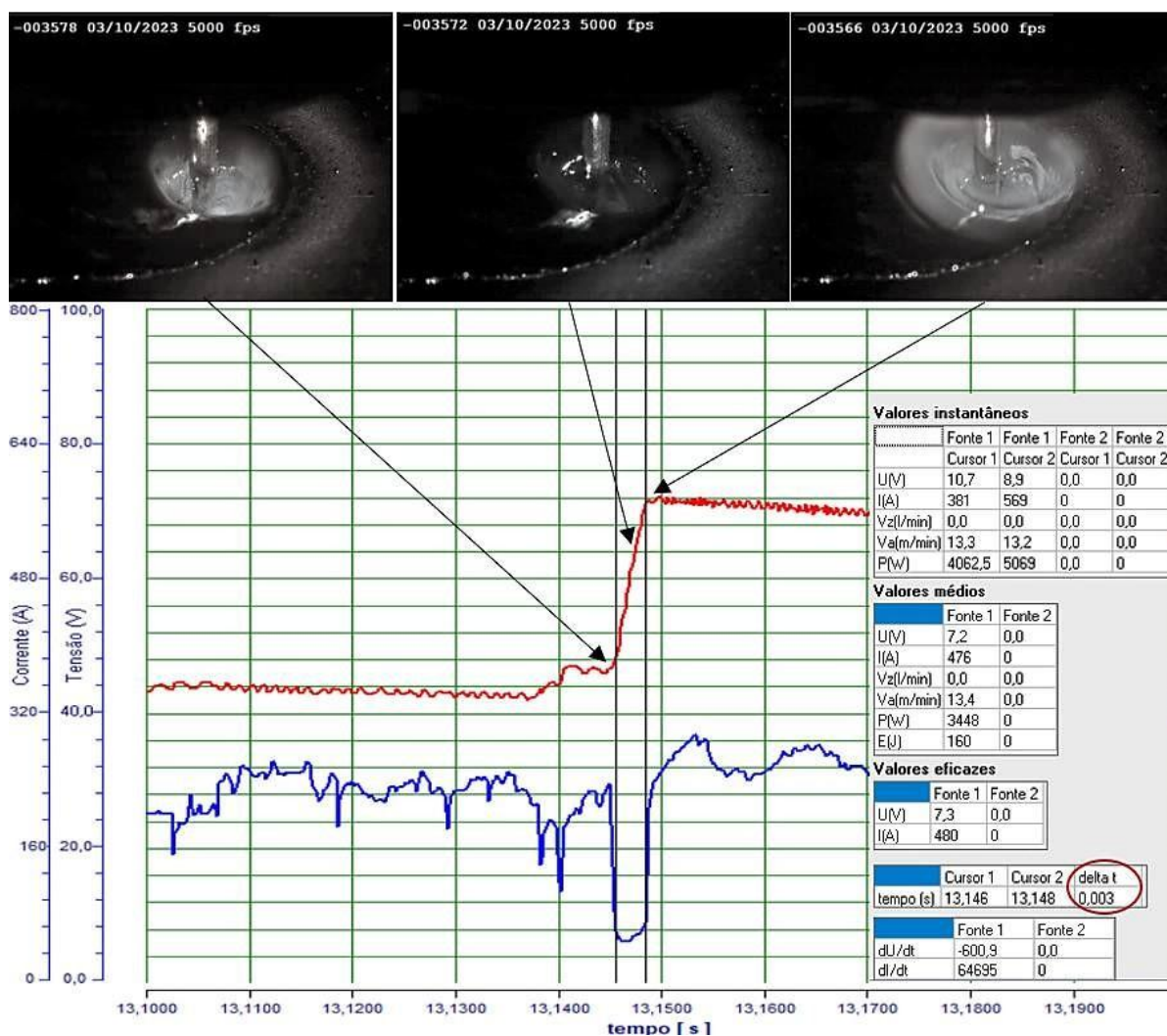


Figura 88 - Efeito indutivo em uma combinação de $K_s = 100$ e $K_d = 1$. Fonte: O autor.

Quando analisado o evento com o maior pico de corrente para a combinação $K_s = 200$ e $k_d = 1$, conforme pode ser observado na Figura 89, é possível perceber, em comparação com a última análise apresentada, que um dI/dt de subida mais alto, em torno de $79,0 \text{ A/ms}$, o que representa um efeito indutivo menor atuando sobre o arco, provoca um desfazimento do contato em um pico de corrente mais baixo, em torno de 459 A , e em um tempo mais curto, em torno de 1 ms . Esse dI/dt de subida atuando com um dI/dt de descida de $0,5 \text{ A/ms}$, comprova assim, a eficiência desta combinação de K_s e K_d para esta condição de soldagem, devido, quantitativamente, ao menor tempo de arco fechado e, qualitativamente, à menor perturbação da poça de fusão.

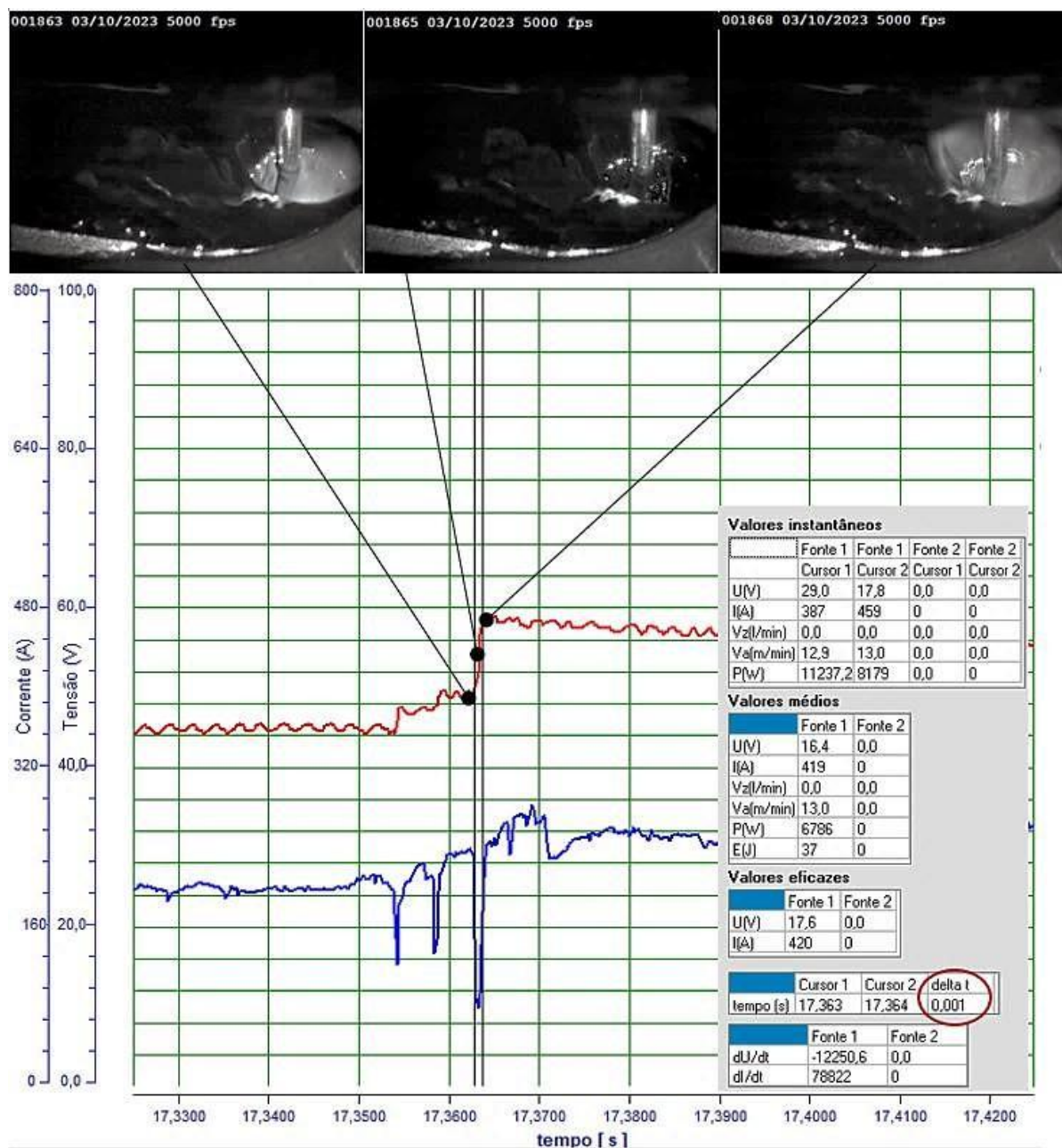


Figura 89 - Efeito indutivo em uma combinação de $K_s = 200$ e $K_d = 1$.

Para finalizar, a fim de demonstrar representativamente a evolução do estudo realizado ao longo deste Subitem, é apresentada a primeira e as duas últimas soldas depositadas. A primeira foi executada com a combinação $K_s = 1$ e $K_d = 1$, em que é possível constatar, conforme Figura 90, que o depósito foi absolutamente inaceitável, em acordo com os referidos transientes adquiridos e analisados anteriormente. Em seguida, são apresentados dois cordões executados com as combinações dos dois últimos experimentos, nestas imagens, conforme Figura 91 é possível observar que

os aspectos superficiais dos cordões demonstram a regularidade do depósito do material de adição, consequência da regularidade da transferência metálica.



Figura 90 – Solda feita com o *Dynaflex-Arc* com a combinação $K_s = 1$ e $K_d = 1$.
Fonte: O autor.



Figura 91 - Soldas feitas com o *Dynaflex-Arc*. Em a) $K_s = 100$ e $K_d = 1$ b) $K_s = 200$ e $K_d = 1$.
Fonte: O autor.

5.1.1 Verificação da estabilidade para a combinação $K_s = 100$ e $K_d = 20$

Conforme comentado em Materiais e Métodos, foram extraídos e processados os dados referentes às combinações $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 100$ e $K_d = 20$, a fim de demonstrar e comparar os efeitos de uma faixa maior de K_d .

Inicialmente é possível observar nos oscilogramas, conforme Figura 92, que as faixas de variação de corrente e tensão, referente à combinação $K_s = 100$ e $K_d = 20$, apresentaram variações mais estreitas em relação à outra combinação, fato que aponta para uma condição em que uma taxa de descida de corrente maior, contribui na redução dos valores de pico corrente. Este resultado converge com os resultados encontrados por Dutra [35]. Outra questão importante a ser comentada na comparação de seus experimentos, com transferência em curto-circuito, ele demonstrou que valores mais altos de taxa de descida de corrente, também representam uma frequência maior de variações de corrente, o que se traduz em um maior número de transferências metálicas e de gotas menores. Diferente do curto-circuito, também pode-se observar na comparação entre os oscilogramas, agora

analisados, que taxas maiores de descida de corrente, conforme Tabela 13, também representam maiores frequências de variações de corrente e, conseqüentemente, picos maiores, que se traduzem, neste caso, não em mais transferências por curto-circuito, mas, sim, numa transferência em *spray* mais regular e, assim, mais estável.

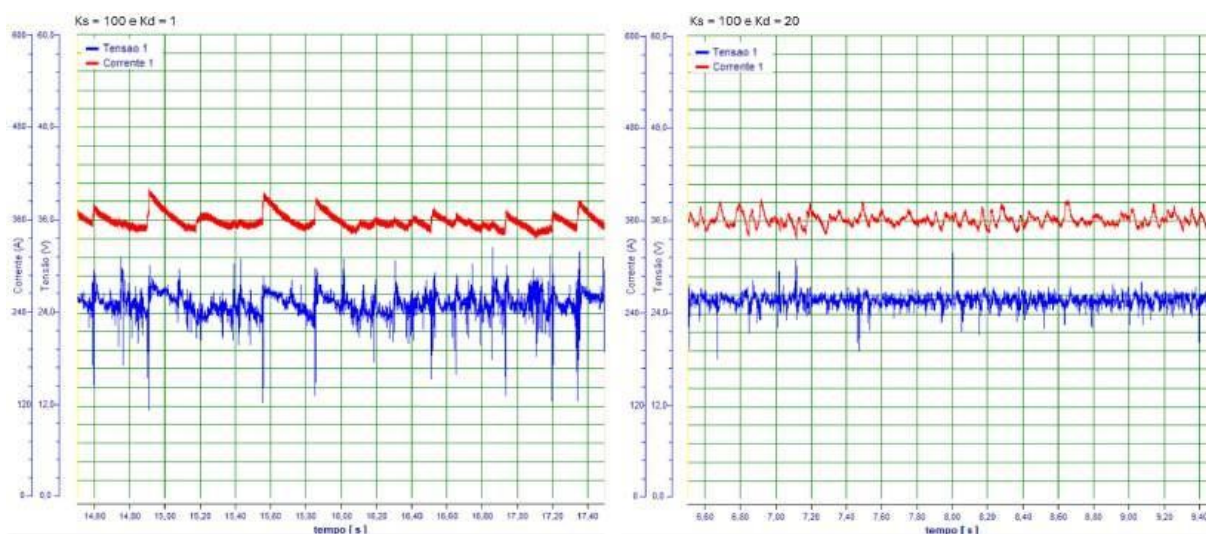


Figura 92 – Oscilogramas de tensão e corrente para $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 100$ e $K_d = 20$ dos períodos aquisitados. Fonte: O autor.

Tabela 13 - Parâmetros aquisitados, resultados da combinação $K_s 100$ e $K_d = 1$ e $K_s = 100$ e $K_d = 20$. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:	
	$K_s = 100$ e $K_d = 1$	$K_s = 100$ e $K_d = 20$
di/dt sub. méd. (A/ms)	2,3	1,1
di/dt des. méd. (A/ms)	0,1	0,7
I_m (A)	359	362
I_e (A)	359	362
U_m (V)	25,4	25,7
P_m (W)	9.114	9.318

Os respectivos histogramas referentes aos picos de tensão e corrente podem ser conferidos na Figura 93 e Figura 94.

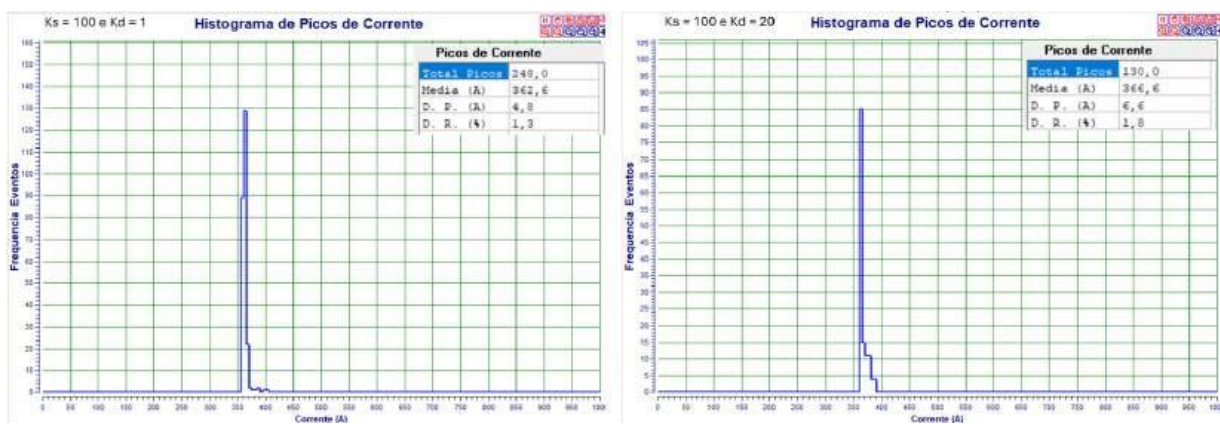


Figura 93 - Histogramas de Corrente Ks = 100 e Kd = 1; Ks = 100 e Kd = 20. Fonte: O autor.

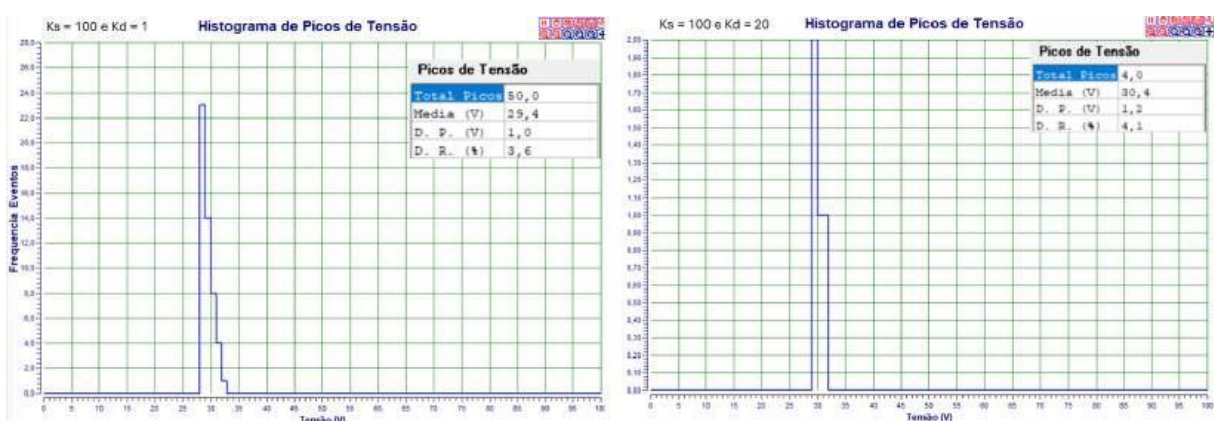


Figura 94 - Histogramas Tensão Ks = 100 e Kd = 1; Ks = 100 e Kd = 20. Fonte: O autor.

Convergindo para o final desta análise comparativa e quantitativa, pode-se observar nos ciclogramas da Figura 95, resultado dos registros de variação de tensão e corrente, consequência da regularidade da transferência metálica e da variação de altura do arco, que, em função da menor área abrangida pelas linhas de variação, a combinação Ks = 100 e Kd = 20 representa uma soldagem mais estável.

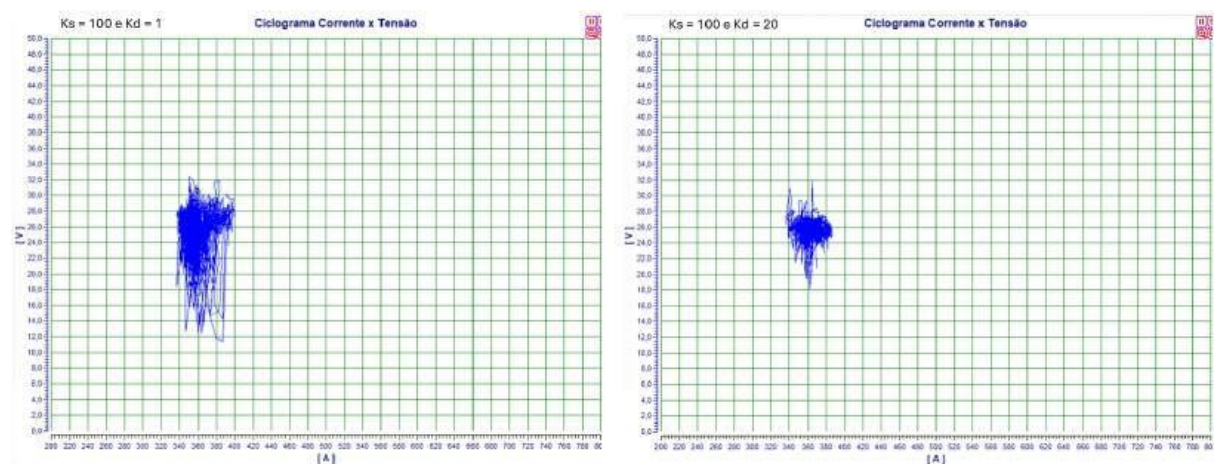


Figura 95 - Ciclogramas para Ks = 100 e Kd = 1 e Ks = 100 e Kd = 20. Fonte: O autor.

5.2 SOLDAGENS DE UNIÃO DE CHAPAS ESPESAS DE AÇO COM JUNTA DE TOPO COM CHANFRO V

5.2.1 Posição horizontal

Recapitulando, conforme apresentado anteriormente em Materiais e Métodos, as soldagens exploratórias associadas às combinações de Ks e Kd testadas até o momento, resultaram nos seguintes parâmetros de soldagem, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Matriz de ensaios com os principais parâmetros regulados. Fonte: O autor.

Ensaio	1	2
U (V)	32	32
Vel.A (m/min)	14	15
Vel.S (cm/min)	60	75
Ks (adimensional)	300	300
Kd (adimensional)	30	30

Durante os experimentos foi possível perceber que a preocupação neste tipo de posição fica por conta do escorrimento. Durante os testes exploratórios de parametrização, uma vez que a velocidade de alimentação era aumentada, em função da posição forçada, não foram observados curtos-circuitos, mas, sim, ocorrências de escorrimento da poça de fusão. Ou seja, devido a posição, o material fundido começava a escorrer antes que os testes avançassem para parâmetros com valores de alimentação de arame que pudessem causar curtos-circuitos.

Os dois experimentos realizados apresentarem um modo de transferência em *spray* em *streaming*, sem registro de instabilidades aparentes ou curtos-circuitos, tendo em vista que não foram constatadas quedas de tensão próximas ou abaixo de 8 V, que representassem iminência ou ocorrência de curto-circuito, mesmo que incipiente, conforme Figura 96. Por esta razão, considerando que todas as transferências dos períodos analisados ocorreram sem contato, ao observar as curvas dos gráficos, referentes às variações de corrente, apesar de as soldagens terem sido feitas com diferentes valores de velocidade de alimentação de arame e de velocidade de soldagem, pode-se dizer que a mesma combinação de Ks e Kd utilizada, em ambos os testes, resultou em comportamentos similares que traduzidos em valores

de di/dt , tanto de subida quanto de descida, demonstram que os efeitos indutivos mantiveram uma tendência próxima de atuação, conforme Tabela 15. Em outra perspectiva de análise destes gráficos de variação de corrente, considerando todos os ensaios feitos até o momento, pode-se dizer que o valor de $K_d = 30$, aponta para um limite máximo de valor seguro para a faixa de variação deste parâmetro, tendo em vista o efeito indutivo que ele proporciona.

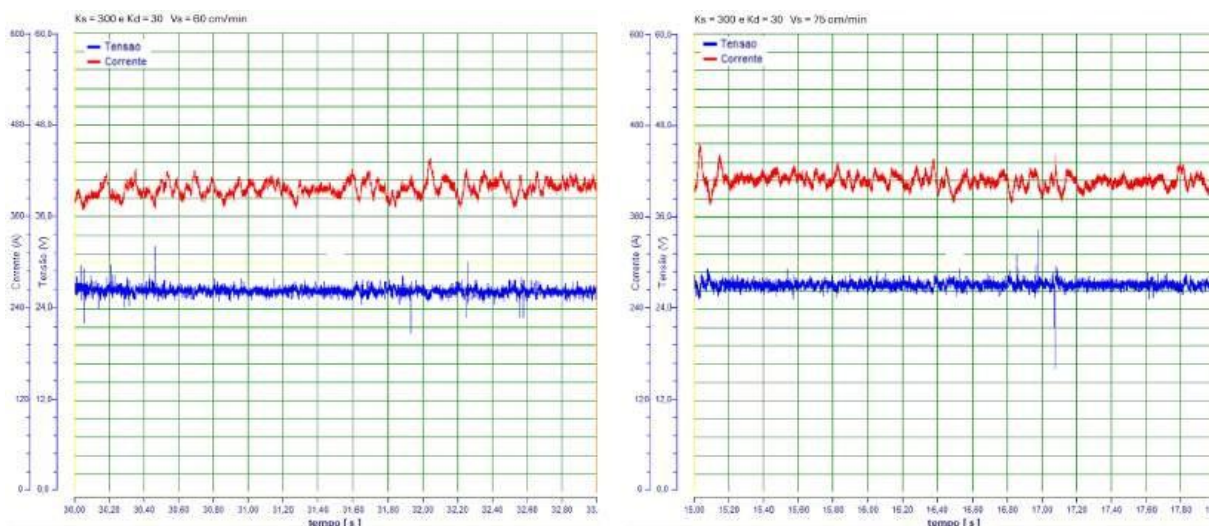


Figura 96 – Oscilogramas de tensão e corrente para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 60$ cm/s e $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.

Tabela 15 - Parâmetros aqusitados, resultados para $K_s 300$, $K_d = 30$ com 60 cm/s e $K_s = 300$ e $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:	
	$K_s = 300$ e $K_d = 30$ $V_s=60$ cm/s	$K_s = 300$ e $K_d = 30$ $V_s=75$ cm/s
di/dt sub. méd. (A/ms)	0,78	0,89
di/dt des. méd. (A/ms)	0,76	0,87
I_m (A)	397	408
I_e (A)	397	408
U_m (V)	26,3	27,1
P_m (W)	10.451	11.072

Quanto à análise dos histogramas de tensão e corrente, cabe lembrar que, apesar do SAP não possuir uma ferramenta arquitetada para a análise de dados resultados de uma transferências em *spray* (conforme demonstrado em Materiais e Métodos), foi possível extrair e analisar as diferenças entre estes dois ensaios. Contudo, as diferenças entre os resultados dos valores apresentados de picos de corrente e de tensão, conforme Figura 97 e Figura 98, respectivamente, não foram

expressivos, a fim de estabelecer uma relação de causa e efeito entre as diferentes combinações de K_s e K_d . Ou seja, nestes casos, estas ferramentas do SAP não foram consideradas satisfatórias para concluir a análise.

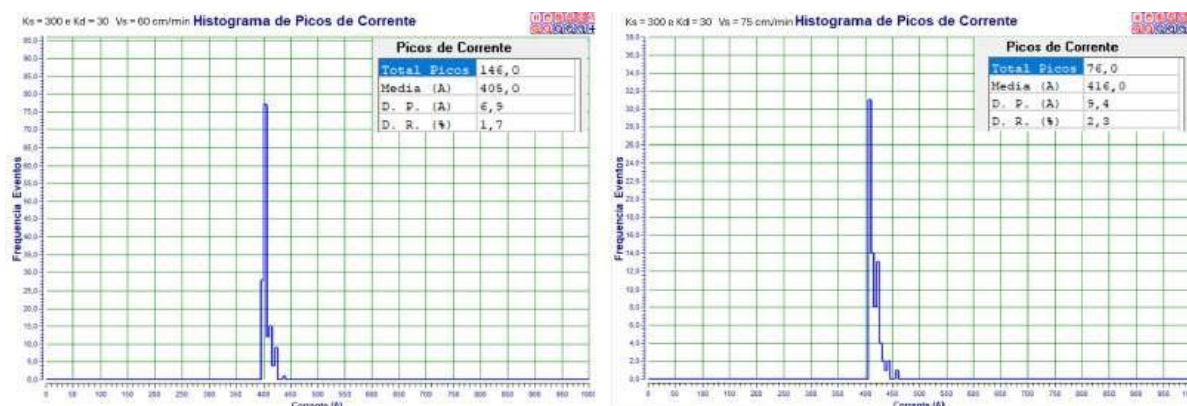


Figura 97 – Histogramas de picos de corrente para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 60$ cm/s e $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.

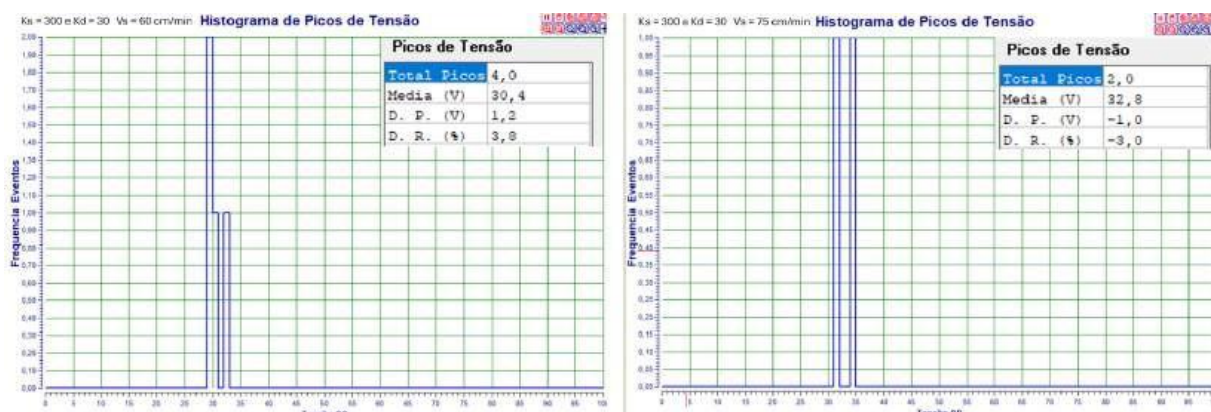


Figura 98 – Histogramas de picos de tensão para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 60$ cm/s e $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.

Quanto à análise dos ciclogramas de tensão x corrente, conforme Figura 99, lembrando que, de acordo com o fabricante do SAP, esta é a melhor forma de analisar transferências em *spray*, principalmente, em relação à regularidade que demonstra a estabilidade da transferência, pode-se dizer que, com base na área de distribuição dos registros de dados, as duas soldagens foram realizadas de forma estável. Porém, em vista da área menor, formada pelo ciclograma da solda realizada com velocidade de soldagem de 60 cm/min, é possível afirmar que esta combinação de parâmetros resultou em uma soldagem mais estável em relação à feita com 75 cm/min.

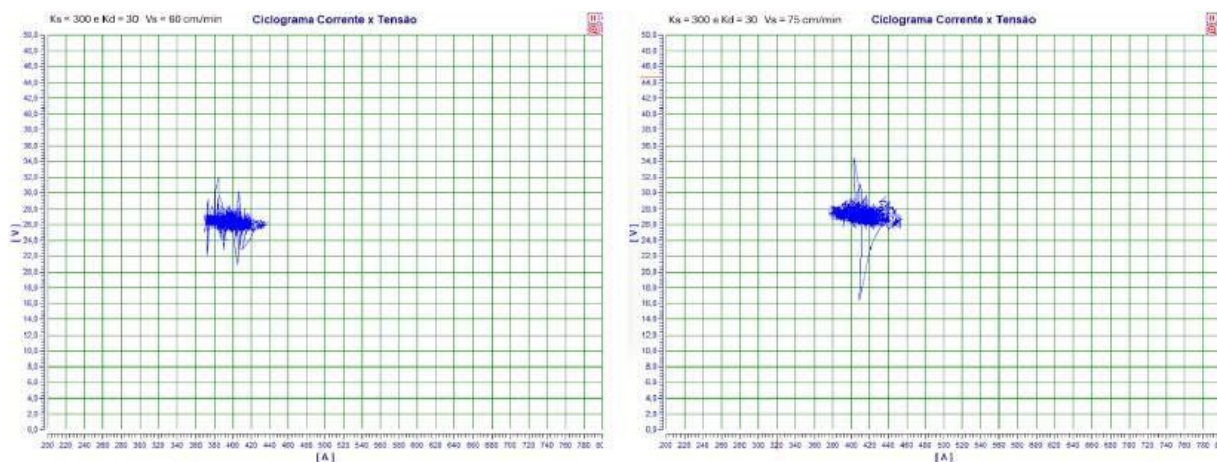


Figura 99 – Ciclogramas de corrente e tensão para $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_c = 60$ cm/s e $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor.

Sequências de três frames, resultado das filmagens de alta velocidade de cada experimento com a combinação $K_s = 300$, $K_d = 30$ com 60 cm/s e $K_s = 300$ e $K_d = 30$ com 75 cm/s, podem ser vistas na Figura 100 e Figura 101, respectivamente, em que é possível observar a atuação da transferência em *spray* em *streaming* realizada pelo processo *DynaFlex*, evidenciando assim, a estabilidade do processo nos dois casos.

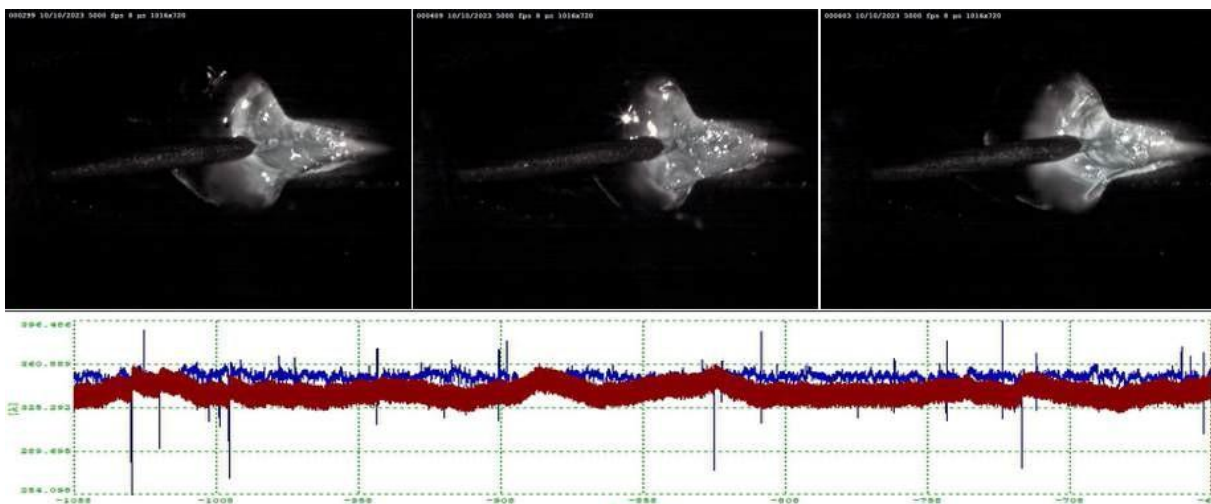


Figura 100 - Frames de filmagem de alta velocidade do processo *DynaFlex*-Arc em junta horizontal com a combinação $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 60$ cm/s. Fonte: O autor. Filmagem disponível em: <https://www.youtube.com/shorts/9bKU298Fmuw>

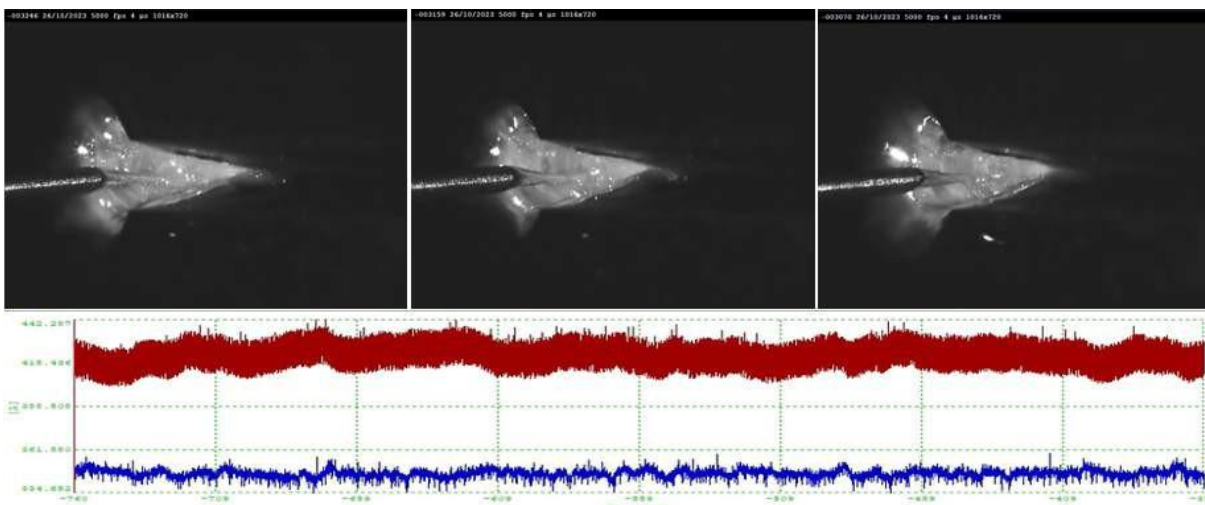


Figura 101 - Frames de filmagem de alta velocidade do processo *DynaFlex-Arc* em junta horizontal com a combinação $K_s = 300$, $K_d = 30$ com $V_s = 75$ cm/s. Fonte: O autor. Filmagem disponível em: <https://youtu.be/n8qcPBUB1c8>

Neste momento, a evolução dos ensaios chegou em um ponto em que a solda ainda demanda alguns ajustes mais finos, principalmente quanto à velocidade de soldagem e ao posicionamento da tocha. Em relação aos resultados apresentados na Figura 102, a macrografia da secção transversal apresentou uma certa irregularidade na distribuição, observada no reforço que se formou assimetricamente, com mais material depositado na borda fundida na chapa inferior, observada abaixo da linha de centro.

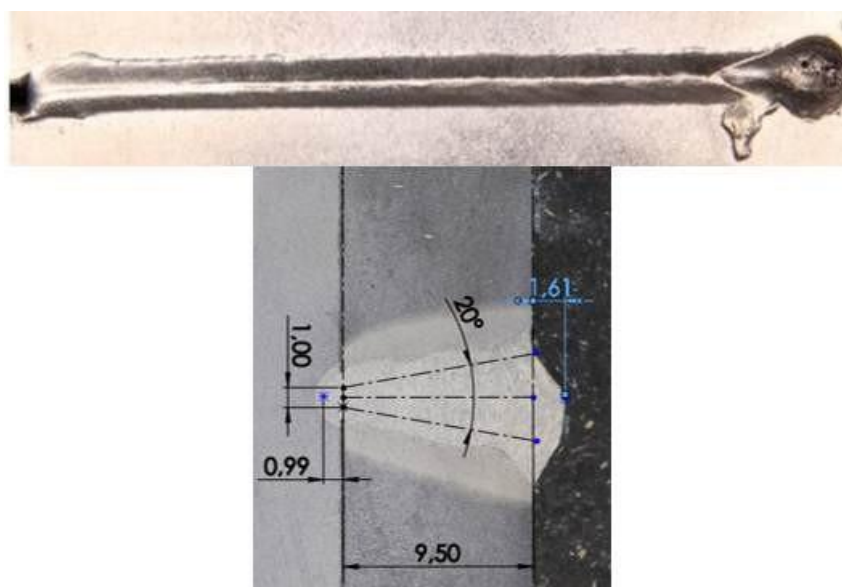


Figura 102 – Aspecto superficial do cordão e macrografia da solda realizada com $K_s = 300$, $K_d = 30$ e $V_s = 60$. Fonte: O autor.

Em relação aos resultados apresentados na Figura 103 o cordão apresentou certa irregularidade em sua distribuição, provavelmente devido a velocidade mais alta, que gerou certa turbulência à deposição de material, associada ao aumento da velocidade de alimentação de arame, o que não permitiu, do ponto de vista de tempo, que este material se acomodasse da maneira devida. Quanto à macrografia da secção transversal, esta também apresentou uma certa irregularidade na distribuição, porém com um reforço maior em relação à solda anterior, devido aos parâmetros utilizados.

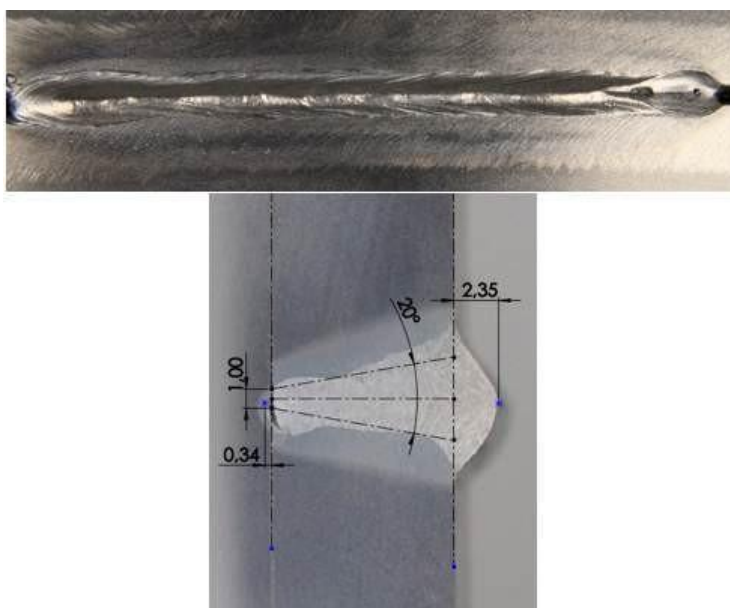


Figura 103 - Aspecto superficial do cordão e macrografia da solda realizada com $K_s = 300$, $K_d = 30$ e $V_s = 75$. Fonte: O autor.

Contudo, do ponto de vista da aplicabilidade do processo de soldagem e do levantamento de dados, que podem ser aplicados nos demais experimentos, estes ensaios foram considerados satisfatórios, pois evidenciaram sua possibilidade de utilização neste tipo de junta e posição.

5.2.2 Posição sobrecabeça

Recapitulando, conforme detalhado anteriormente em Materiais e Métodos, após uma série de cordões exploratórios, tendo como base os experimentos da soldagem horizontal e, como parâmetro inicial fixo, a combinação $K_s = 300$ e $K_d = 100$, os quais demonstraram a necessidade, principalmente, de aumento do ângulo total do chanfro em V, de 20° para 40° . Este ajuste mais crítico ocorreu devido ao fato de o chanfro menor não permitir uma penetração total das soldas realizadas com menos potência, e escorrimento de material naquelas parametrizadas com maior potência. Uma vez definido o chanfro de 40° , sem nariz e com um *gap* de 1 mm, que viabilizou uma solda com penetração total e melhor acomodação de material depositado, o ensaio que resultou no melhor cordão foi realizado com uma tensão de 31 V, velocidade de alimentação de arame de 12 m/min, distância bico de contato peça de 15 mm, velocidade de soldagem de 54 cm/min.

Outra questão importante fica por conta do ajuste da orientação da tocha, que precisou se colocada empurrando, em um ângulo de ataque de 35° , a fim de deslocar a pressão do arco, promovendo uma entrada mais suave na poça e, assim, minimizar a tendência ao transbordamento de material na interface entre o material líquido e sólido em contato na poça de fusão.

Ao final, como a combinação $K_s = 300$ e $K_d = 100$ demonstrou-se eficiente e estável, esta foi mantida, lembrando que nesta condição, assim como na posição horizontal, não foi possível atingir valores de V_a que causassem eventos de curto-circuito, antes que eventos deste tipo ocorressem, quando valores mais altos de V_a eram testados, ocorria o escorrimento de material fundido, tanto em chanfros com 20° , 30° ou 40° . Conforme comentado em Materiais e Métodos, como sempre, foram realizados três cordões para verificar a repetibilidade e robustez do processo, para então ser realizada a filmografia.

Os oscilogramas de corrente e tensão resultantes de um período aquisitado, parte deste experimento, podem ser conferidos na Figura 104, que confirmam a estabilidade da soldagem em vista da estreita faixa de variação dos transientes, condição já esperada para uma soldagem estável em *spray* em *streaming*. Por se tratar de um período em que não foram verificadas quedas de tensão, próximas ou abaixo de 8 V, que demandassem uma resposta dinâmica mais enérgica da fonte, a

fim de elevar a corrente para afastar a risco ou mesmo a ocorrência de um curto-circuito, pode-se perceber, conforme Tabela 16, que os valores médios de di/dt não foram significativos. Ou seja, não representam valores referentes às faixas esperadas, considerando as análises realizadas até o momento.

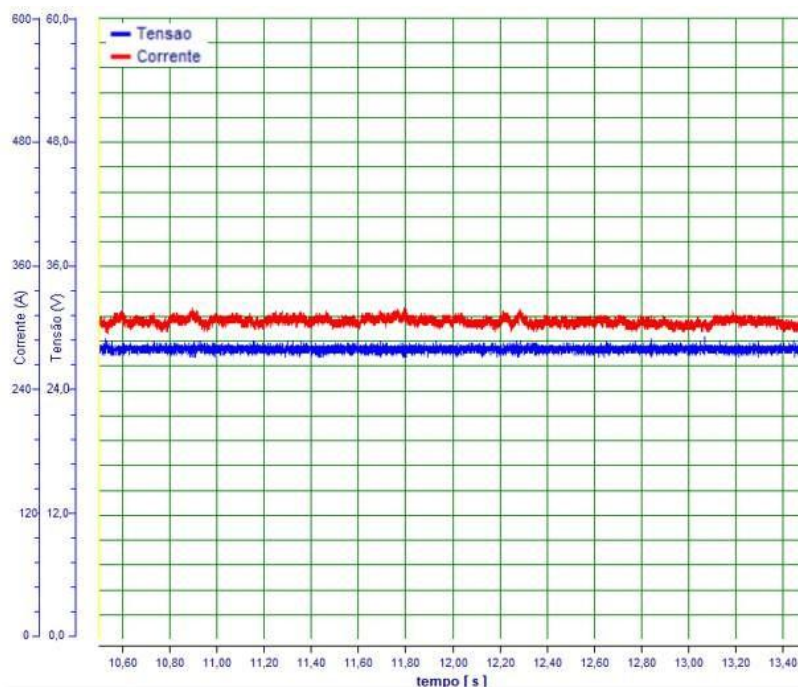


Figura 104 – Oscilogramas de tensão e corrente da soldagem sobrecabeça.

Fonte: O autor.

Tabela 16 - Parâmetros aquisitados, resultados da soldagem sobrecabeça.

Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:
di/dt sub. méd. (A/ms)	0,39
di/dt des. méd. (A/ms)	0,24
I_m (A)	307
I_e (A)	307
U_m (V)	28
P_m (W)	8.604

Quanto aos histogramas de corrente e tensão, conforme Figura 105, estes não apresentaram resultados que apontem para instabilidades, tanto que o histograma de tensão não apresentou picos, pois a lógica do SAP não aquisitou nenhum dado que, após processado pelo algoritmo (o fabricante não forneceu o algoritmo para análise nem detalhes da lógica, ou mesmo detalhes deste aspecto no manual), pudesse ser

considerado como tal, devido à forma concentrada do agrupamento de dados apresentada na faixa de variação de tensão.

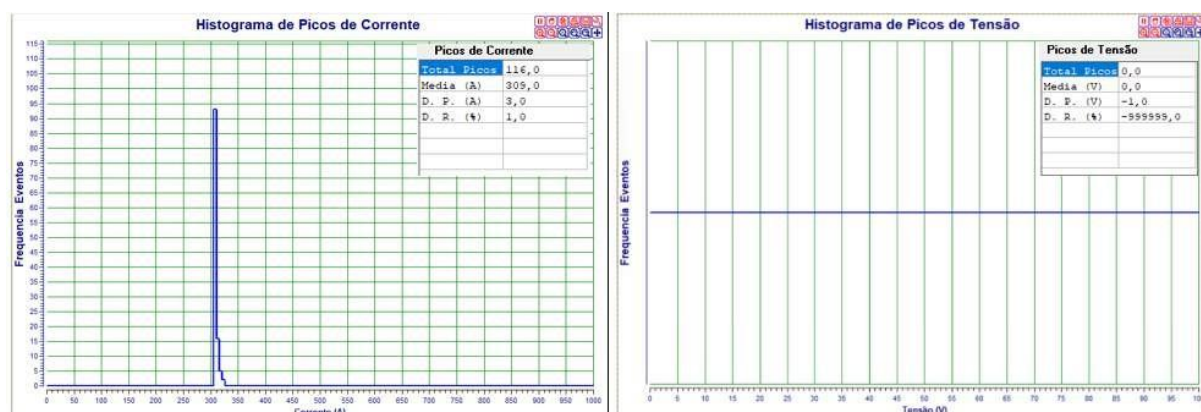


Figura 105 - Histogramas de picos de corrente e de tensão para soldagem sobrecabeça.

Fonte: O autor.

Em seguida, o oscilograma pode ser conferido, conforme Figura 106, demonstrando, em vista do período aquisitado, que a variação de tensão e corrente abrangeram uma área pequena e restrita do gráfico, demonstrando assim sua regularidade na variação da altura do arco elétrico, consequência de uma transferência uniforme e estável.

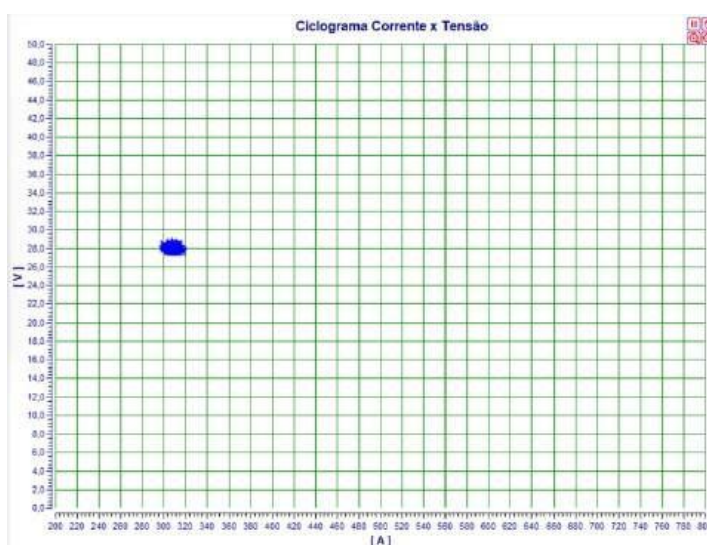


Figura 106 - Oscilograma Corrente x Tensão para a soldagem sobrecabeça.

Fonte: O autor.

Frames da filmagem de alta velocidade, com uma taxa de aquisição de 5000 fps, da mesma soldagem realizada, mas agora em outro período aquisitivo, podem ser observados na Figura 107, mostrando estabilidade da cavidade da poça em três momentos distintos quanto ao aspecto da variação do gráfico de tensão.

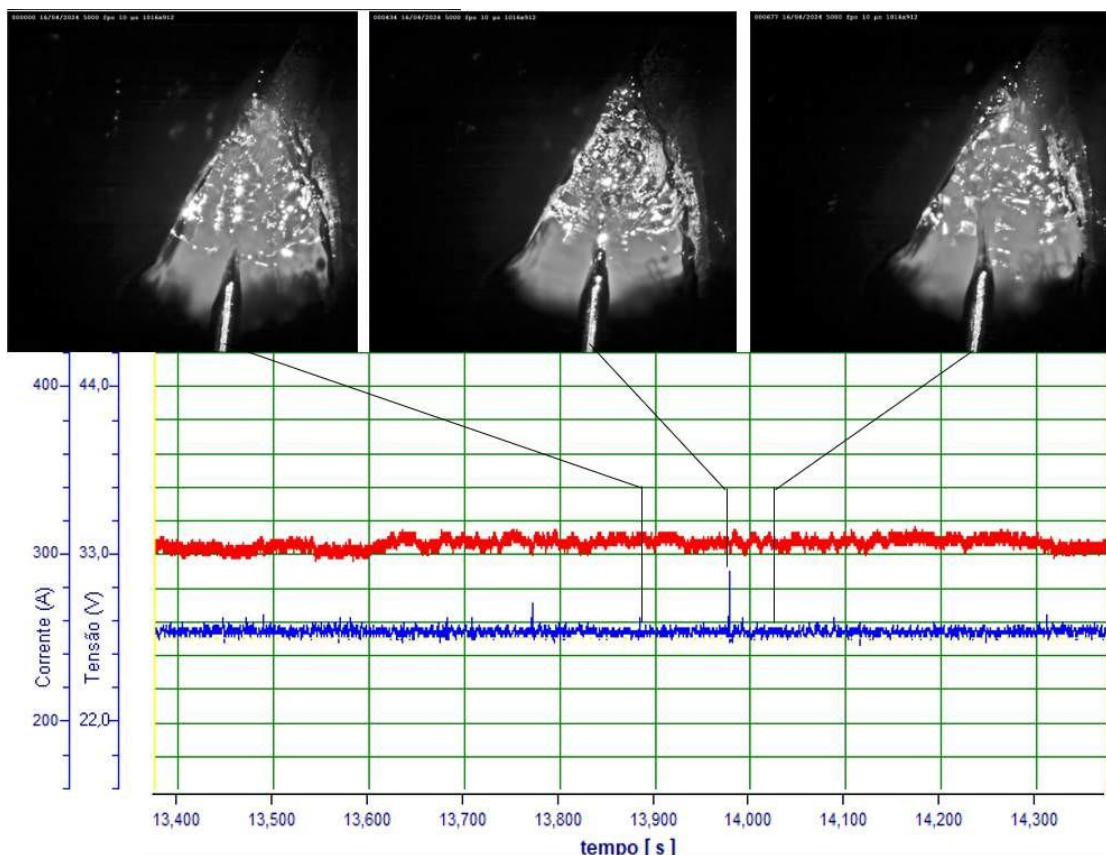


Figura 107 - *Frames* da filmagem em alta velocidade da soldagem sobrecabeça.

Fonte: O autor. Filmagem disponível em: <https://youtu.be/RHnAe-br9a4>

Finalmente, após toda a problemática envolvida na soldagem nesta posição, conforme comentado nos trechos que tratam deste assunto ao longo desta tese, em que há um paradigma na literatura que recomenda que a soldagem sobrecabeça seja limitada à aplicação com energias baixas [10, 117], o *DynaFlex-Arc* comprovou a sua viabilidade e eficácia na manutenção de uma transferência em *spray* em *streaming*, com um arco extremamente curto e em uma condição de poça de fusão em forma de cavidade, de maneira estável, que resultaram em uma solda de qualidade, conforme podem ser observados o aspecto superficial do cordão e a macrografia, conforme Figura 108 e Figura 109, em que não foram registrados nenhum tipo de descontinuidade ou defeito. Demonstrando assim, seus benefícios quanto às taxas de deposição e penetração também fora de posição.



Figura 108 – Aspecto superficial da solda na sobrecabeça. Fonte: O autor.

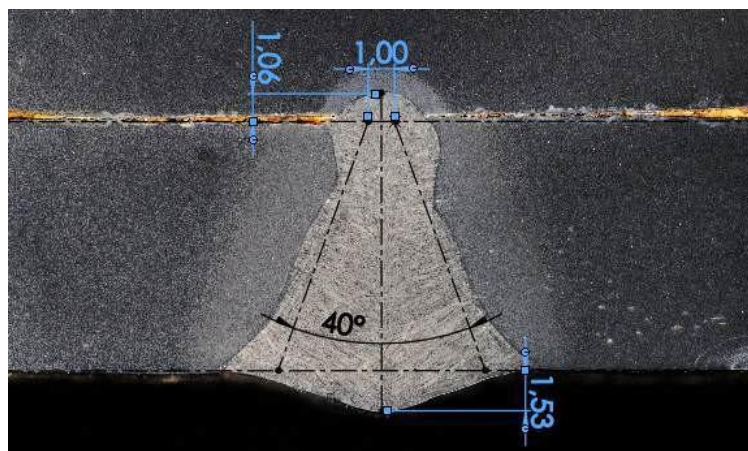


Figura 109 – Macrografia da secção transversal da solda na sobrecabeça. Fonte: O autor.

5.3 ESTUDO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS PROCESSOS *DYNAFLEX-ARC* E *MIG/MAG* CONVENCIONAL EM CONDIÇÕES DE BURIED-ARC

Em condições consideradas adequadas, a execução de um cordão de solda pode ser dividido em três partes distintas: o início, região de abertura do arco, estabilização da poça e da transferência metálica; a região de regime, trecho predominante e de maior interesse, para a qual o processo foi parametrizado, em que as variações do arco elétrico devem ser regulares, resultando em uma transferência metálica em regime, em que os mecanismos envolvidos durante a soldagem devem trabalhar em uníssono para promover uma solda uniforme; e o fim do cordão, região em que o arco elétrico sofre a sua extinção e a poça de fusão deixa de ser alimentada, sofrendo uma solidificação irregular em relação à solidificação em regime.

Neste contexto, os resultados apresentados a seguir são referentes a períodos nas regiões em que as soldagens ocorreram em regime, trechos predominantes e mais representativos dos processos realizados. Em ambos os processos, apesar de ter havido situações pontuais de irregularidades que, em alguns casos,

descaracterizaram a transferência metálica em *spray* em *streaming*, não houve registros de quedas de tensão próximas ou abaixo de 8 V que representassem iminências ou ocorrências de curto-circuito. Contudo, é possível notar diferenças significativas entre os processos, em vista das diferenças de regularidades das variações de tensão e corrente, evidenciadas, principalmente, pelos ciclogramas analisados.

Quanto às situações pontuais de instabilidade ocorridas durante a soldagem, em que houve variações de tensão significativamente maiores que o desvio padrão, mas que, enfatiza-se, não chegaram próximas de 8 V, são apresentados frames das filmagens de alta velocidade que, associados a estes pontos de instabilidade registrados pelos oscilogramas, evidenciam os efeitos na transferência metálica promovidos pelas diferentes arquiteturas das fontes analisadas, reforçando as diferenças entre o MIG/MAG convencional e o *DynaFlex-Arc*.

Inicialmente, além de aproveitar para rever os parâmetros utilizados nos experimentos realizados, também é possível verificar na Tabela 17 os resultados das principais aquisições, referentes aos períodos que são apresentados em seguida. Nesta tabela, considerando que foi variada apenas a velocidade de soldagem, pode-se observar que os valores de dl/dt médios, tanto de subida quanto de descida, em ambos os ensaios, apresentaram uma tendência de queda, justamente devido ao aumento da estabilidade da soldagem promovido pelo aumento, controlado, da velocidade de soldagem [125], o que, conseqüentemente, demandou menores taxas de variação de corrente. Contudo, também é possível observar que os valores de dl/dt médios, resultados dos experimentos realizados com o MIG/MAG convencional, são maiores em relação ao *DynaFlex*, o que sugere uma dificuldade maior em manter o processo estável, devido ao efeito indutivo ser constante, promovendo uma variação de corrente exagerada para esta parametrização e condição de soldagem.

Ainda quanto aos dados aquisitados na Tabela 17, em cada dupla de experimentos realizados, foi possível observar o resultado do aumento da corrente média. Considerando que, para cada processo analisado, o único parâmetro de entrada variado foi o aumento da velocidade de soldagem, é razoável ponderar que, ao se aumentar a velocidade de soldagem, há uma redução da penetração, a ponta do arame fica mais à frente da poça de fusão e, conseqüentemente, uma diminuição da altura do arco elétrico, promovendo assim, uma redução da resistência dinâmica do próprio arco, o que favorece a passagem e o aumento da corrente média. Além

disso, em outra perspectiva, tendo em vista que, por se tratar de uma soldagem em *buried-arc*, ainda não é possível medir a altura do arco elétrico dentro da cratera fundida, mesmo que esta altura do arco se mantenha inalterada, e considerando o fato da redução de penetração, é possível admitir também uma redução do *stick-out* e, conseqüentemente, um aumento da corrente média [126].

Tabela 17 - Matriz dos ensaios realizados. Fonte: O autor.

Cordão	DynaFlex-Arc		MIG/MAG conv.	
	A1	A2	B1	B2
U (V)	29	29	6F	6F
Um (V)	26,5	26,4	26,3	26,6
Vel.A (m/min)	13	13	13	13
Vel.S (cm/min)	45	60	45	60
Im (A)	366	374	348	354
Ie (A)	366	375	348	354
Pm (W)	9.724	9.877	9.241	9.430
Ks (dl/dt)	100	100	-	-
Kd (dl/dt)	20	20	-	-
dl/dt sub. méd. (A/ms)	9,28	8,82	19,24	17,83
dl/dt des. méd. (A/ms)	9,27	8,84	18,16	16,98

O oscilograma referente aos cordões A1 e A2 pode ser conferido na Figura 110 e Figura 111, respectivamente, em que é possível observar que os transientes de tensão e corrente resultaram em menos variações e, com amplitudes menores em relação aos cordões B1 e B2, conforme são mensurados nos histogramas e ciclogramas, confirmando, assim, sua regularidade em ambas as condições testadas. Além disso, não foram registradas quedas de tensão em torno de 8 V, indicando, assim, a predominância da transferência em *spray* em *streaming*. Uma sequência de três *frames* também é apresentada junto a cada figura, a fim de representar uma amostra da filmografia, que não abrange todo o período aquisitado devido à otimização da quantidade de dados processada. Em função da regularidade do processo e dos períodos aquisitados, que achataram as escalas dos gráficos (mas que resultaram em amostras mais significativas), não foram apontadas as posições dos *frames* nos respectivos oscilogramas. Além disso, análises detalhadas e melhor contextualizadas são apresentadas ao longo deste Subitem.

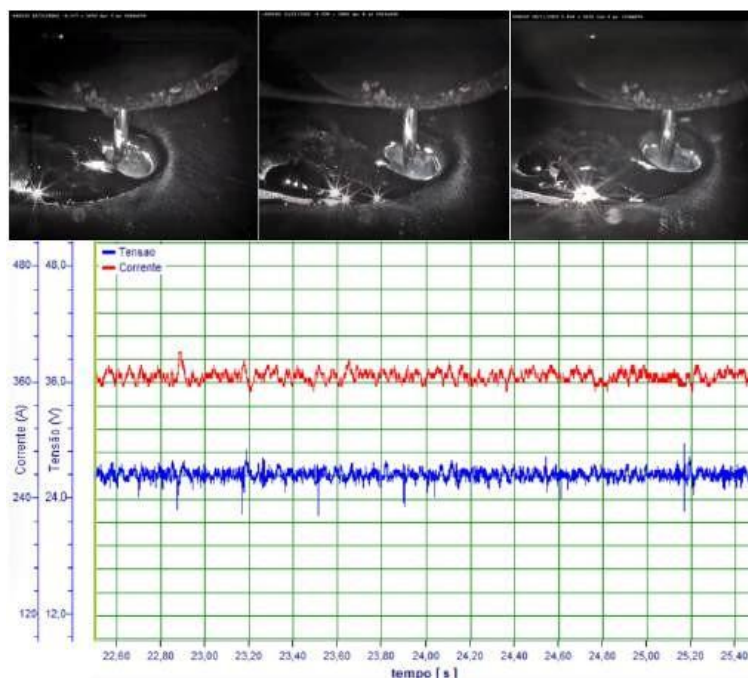


Figura 110 – Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão A1. Fonte: O autor.

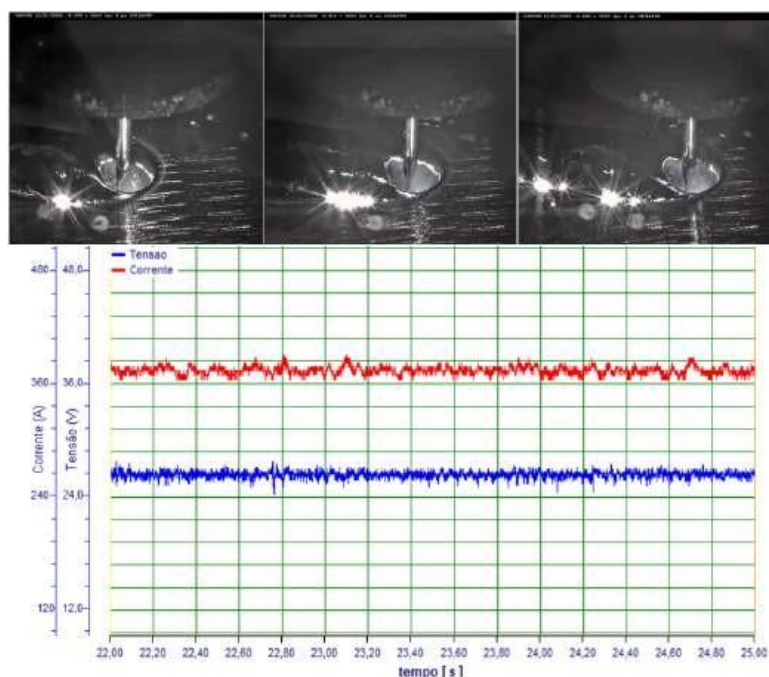


Figura 111 - Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão A2. Fonte: O autor.

Logo, é possível constatar, nos histogramas de picos de corrente, conforme Figura 112, que, na análise entre estas duas soldagens, a soldagem A2 apresenta uma corrente média de pico maior, mais números de picos, com um desvio padrão menor, o que traduz uma transferência mais estável. Aparentemente, essa melhor condição justifica-se pela maior velocidade de soldagem, que acomodou melhor as

transferências metálicas em uma condição de arco mais baixo, devido à posição relativa do eletrodo quanto à poça de fusão (conforme comentado anteriormente).

Os histogramas de picos de tensão não foram considerados para análise, pois devido à pouca variação, não foram devidamente estratificados pelo SAP.

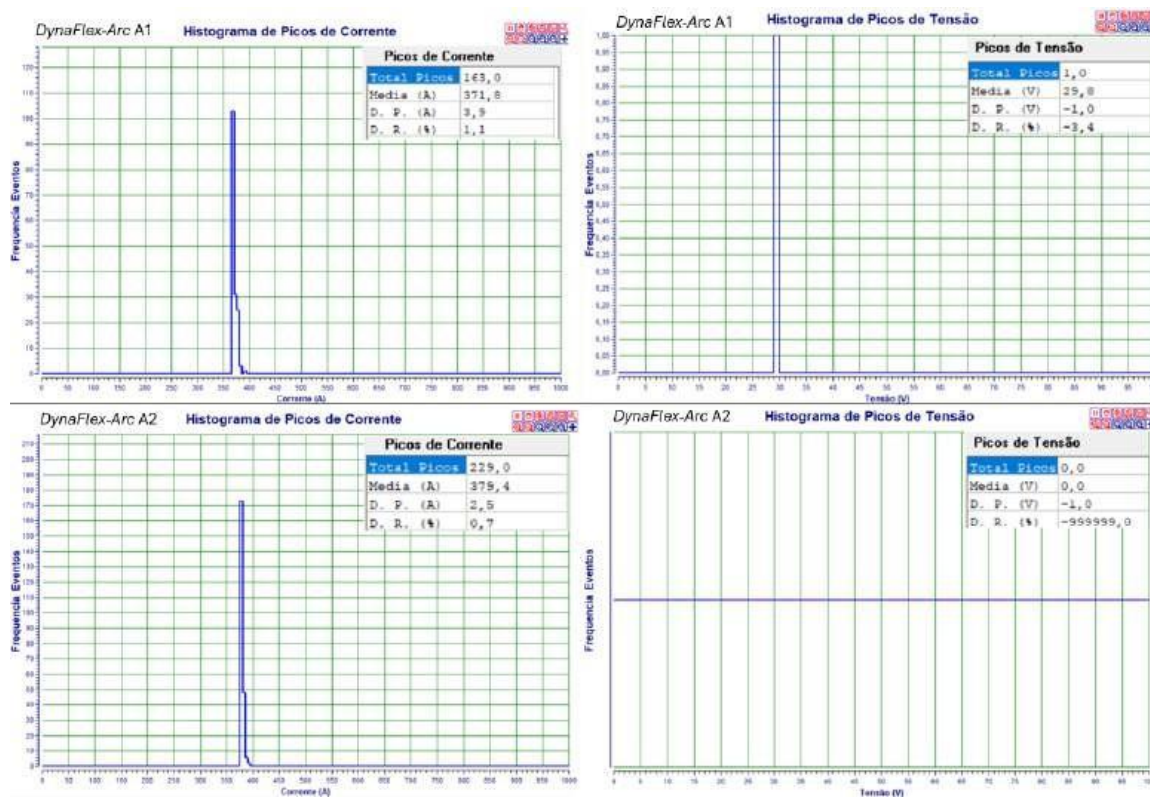


Figura 112 - Histogramas de picos de tensão e corrente, ensaios A1 e A2. Fonte: O autor.

Os oscilogramas referentes aos cordões B1 e B2, com uma amostra de *frames* da filmografia, que não abrange todo o período apresentado, podem ser conferidos na Figura 113 e Figura 114, respectivamente, em que é possível observar, inicialmente, uma amplitude maior dos transientes de tensão e corrente, com uma densidade de variações também maior em relação aos dois ensaios anteriores, confirmadas pelos histogramas e ciclogramas apresentados na sequência. Apesar desta densidade de variações e espectro serem consideradas regulares, típicas de uma fonte tiristorizada [15], suas amplitudes maiores também traduzem uma variação mais significativa da altura efetiva do arco elétrico, o que, no caso de uma transferência em *spray* em *buried arc*, representa um prejuízo à estabilidade destas duas soldagens. Afinal, os efeitos destas variações podem promover perturbações na gota transferida, causando variações de seu tamanho e altura de destacamento e, conseqüentemente, geração

de salpicos ao longo da soldagem, sendo esta a principal diferença, na condição de regime, em relação ao *DynaFlex*.

Conforme comentado anteriormente, eventos específicos destas soldagens são dissecados mais a frente, nos quais, apesar de não ter sido observado completo fechamento da cavidade da poça, há ocorrência de respingos, resultado de variações bruscas de pressão, com comportamento explosivo, com propensão à perturbação do equilíbrio de forças dentro da cavidade e potencial colapso.

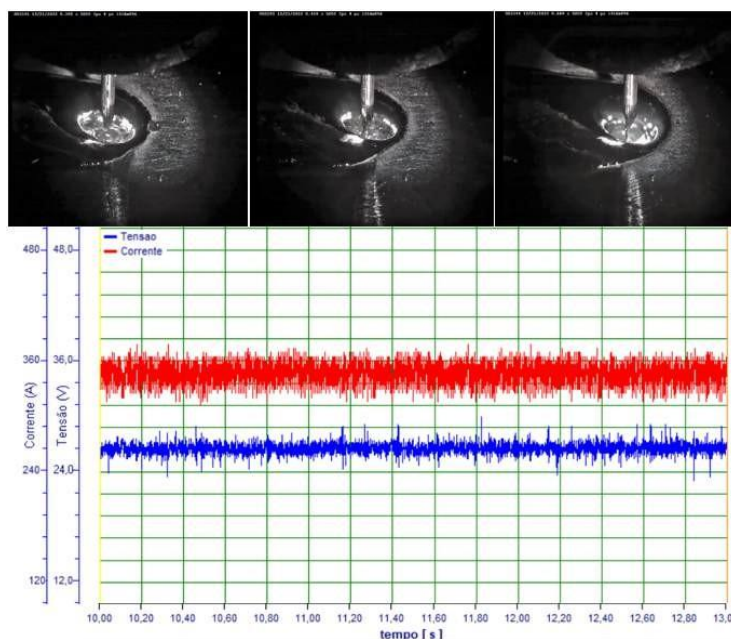


Figura 113 - Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão B1. Fonte: O autor.

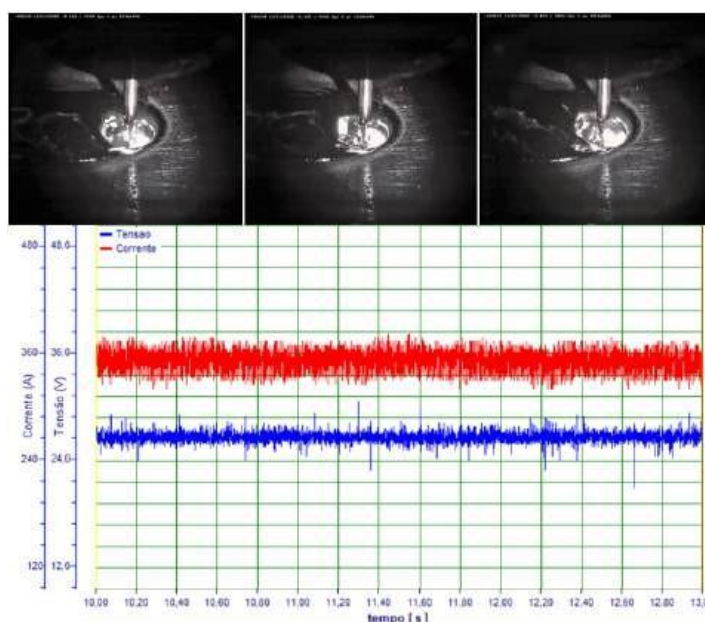


Figura 114 - Oscilograma de tensão e corrente da soldagem do cordão B2. Fonte: O autor.

Quanto aos histogramas de corrente e tensão das soldagens B1 e B2, respectivamente, conforme Figura 115, apesar de a corrente média ter subido de um ensaio para o outro, em consonância com o aumento da velocidade de soldagem, provavelmente em função da redução da resistência dinâmica do arco elétrico ou da redução do *stick-out* (conforme comentado anteriormente), e dos valores de dl/dt , tanto de subida quando de descida, terem diminuído, não houve mudança significativa entre os valores de total de picos de corrente, médias de picos de corrente e seus desvios padrões, indicando assim, que não houve aumento significativo da estabilidade.

Da mesma forma que nos ensaios anteriores, os histogramas de picos de tensão não foram considerados para análise, pois devido à pouca distribuição, não foram devidamente estratificados pelo SAP.

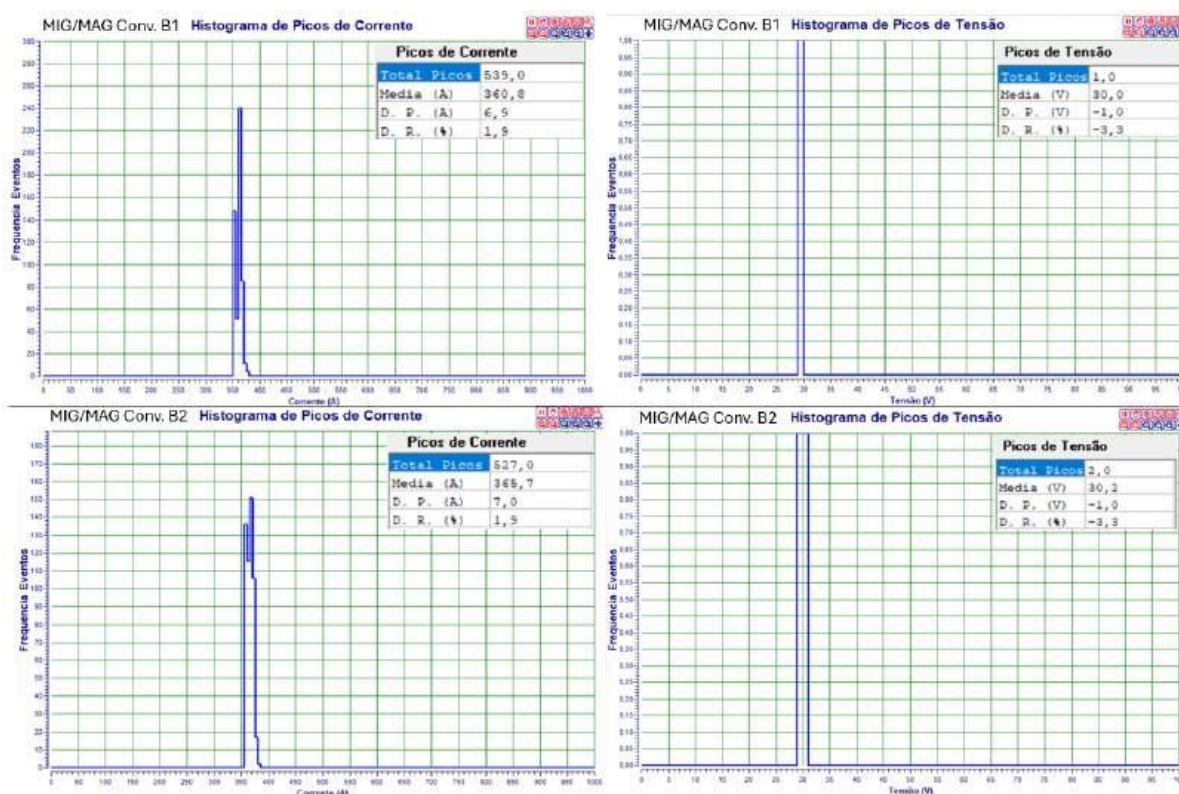


Figura 115 Histogramas de picos de tensão e corrente, ensaios B1 e B2. Fonte: O autor.

Quanto aos ciclogramas de tensão x corrente, conforme Figura 116, é possível observar a confirmação de que houve um aumento da estabilidade do processo do ensaio A1 para o ensaio A2, devido à redução da área abrangida pelo ciclograma e, conseqüentemente, da variação e amplitude dos transientes. No caso dos ensaios B1 e B2, as áreas resultantes das variações de tensão e corrente são inconclusivas

quanto a um aumento, ou não, da estabilidade do processo, pois, apesar de a área do ciclograma B2 parecer menor que o B1, há registro de variações irregulares que podem indicar a ocorrência de transferências irregulares, que são investigadas a seguir.

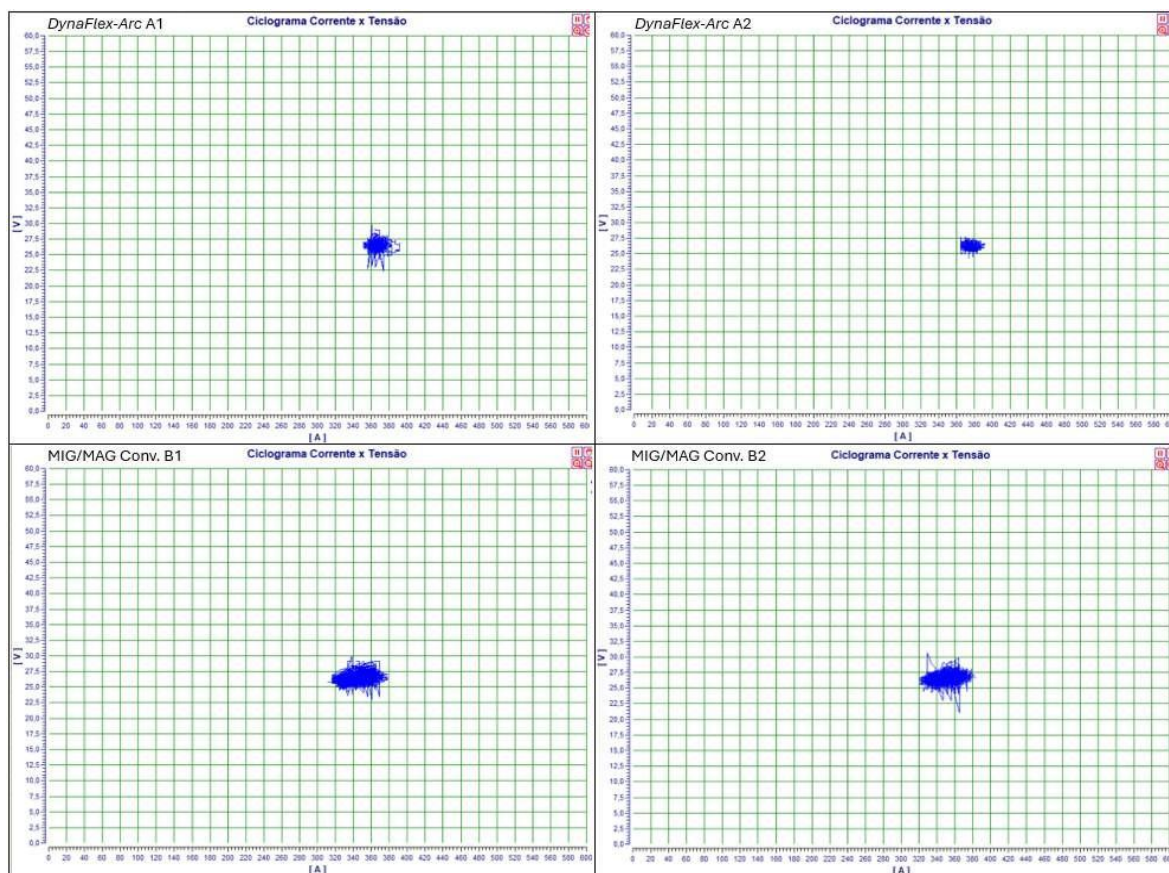


Figura 116 - Ciclogramas de tensão e corrente, ensaios A1, A2, B1 e B2. Fonte: O autor.

Após a análise destes períodos mais longos, referentes às soldagens realizadas com maior representatividade de dados, apresentam-se, nesta segunda parte, situações pontuais de instabilidade, a fim de demonstrar, sob outra perspectiva, as diferenças entre estes dois processos. Os resultados desta segunda parte consistem nos períodos dos trechos filmados por câmera de alta velocidade.

Inicialmente, referentes à soldagem do cordão A1, os *frames* apresentados na Figura 117 representam três situações de instabilidade, em que as variações de tensão extrapolaram o desvio padrão, conforme oscilograma da referida figura, e que representam, deste ponto de vista, a condição mais crítica de soldagem para este período, mas conforme desdobramento da análise, não provocaram irregularidades à transferência metálica.

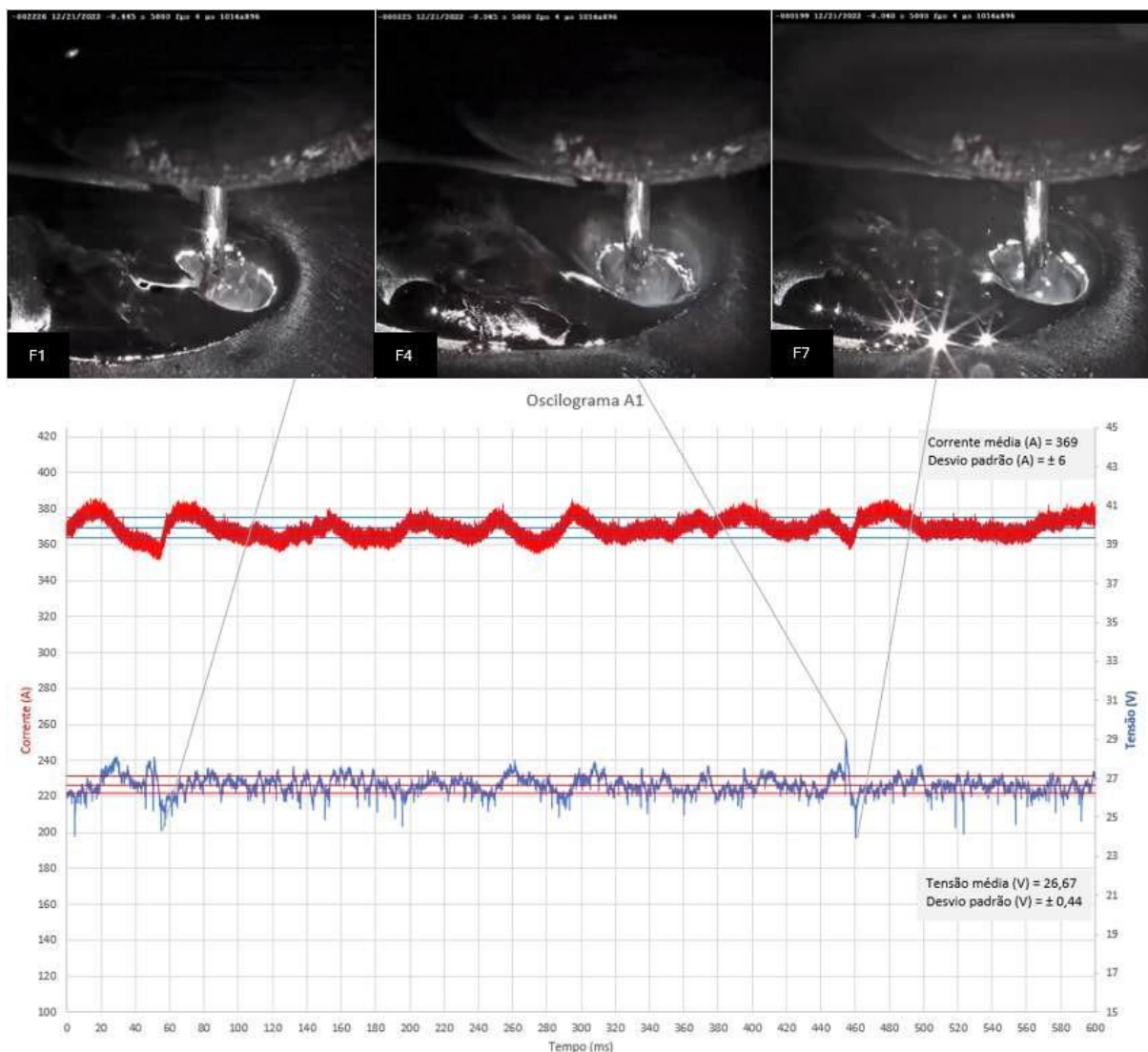


Figura 117 – Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem A1. Fonte: O autor.
Filmagens em: <https://youtu.be/3EmkVwGfLIA?si=GUNlzSm4WmCqEz8m>

Em seguida, é possível observar, nas três sequências de *frames* estratificadas, conforme Figura 118, que, apesar das variações abruptas de tensão, não houve formação de respingos, descaracterização aparente da transferência metálica ou perturbações da poça de fusão. O modo de transferência metálica foi preservado devido à resposta ajustada da fonte, em vista do ajuste dos efeitos indutivos via parametrização dos valores de K_s e K_d , quanto à taxa de variação de subida de corrente que, não exagerou a ponto de causar explosões ou transferências em *streaming* rotacional nem tão fraca que permitisse o contato ou o fechamento da poça de fusão.

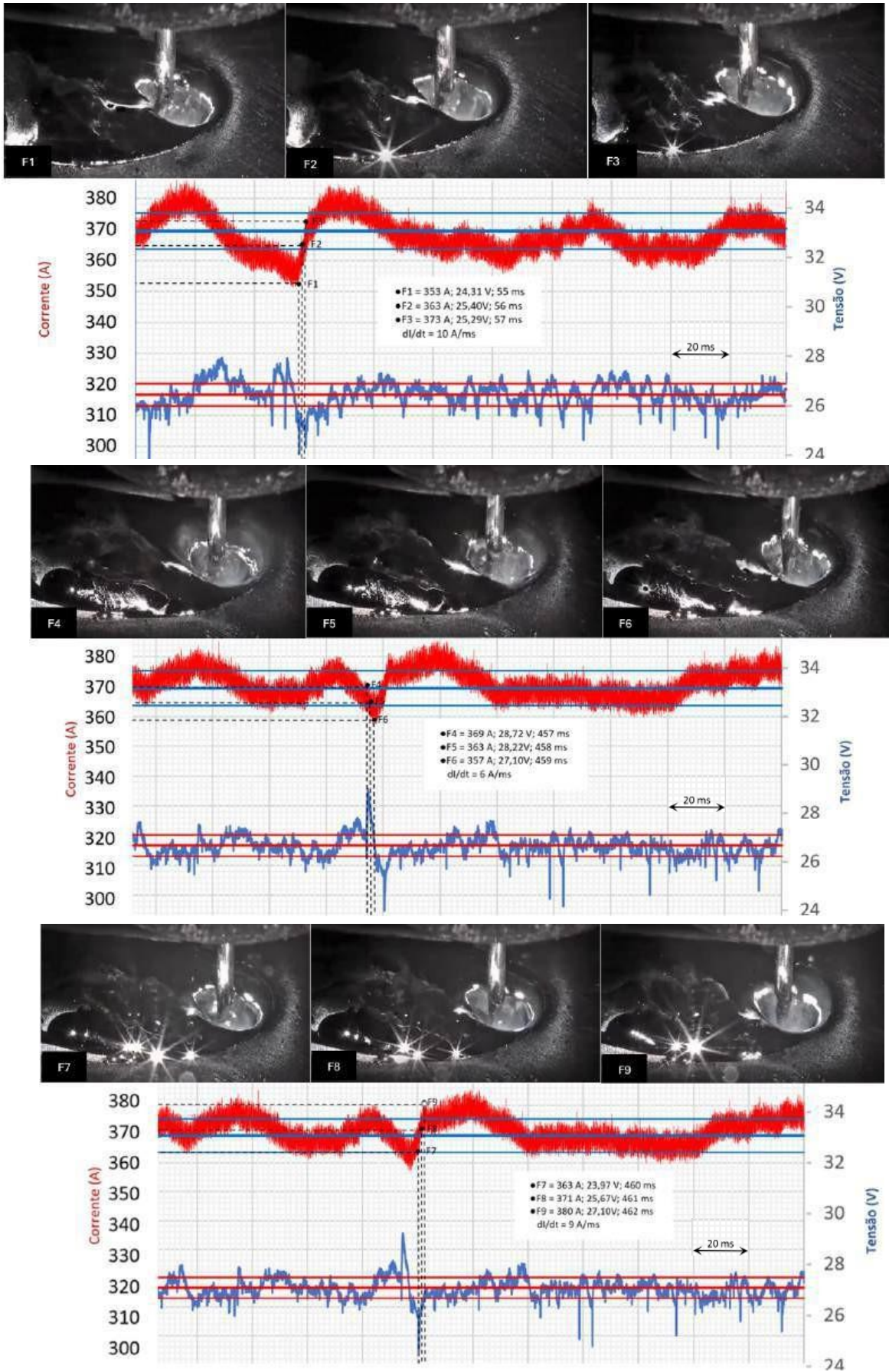


Figura 118 - Frames dos pontos de maior instabilidade na soldagem A1. Fonte: O autor.

Na mesma tendência do ensaio anterior, é possível observar que o cordão A2, conforme Figura 119, também manteve, aparentemente, sua condição de transferência inalterada, mesmo em situações de variações abruptas de tensão.

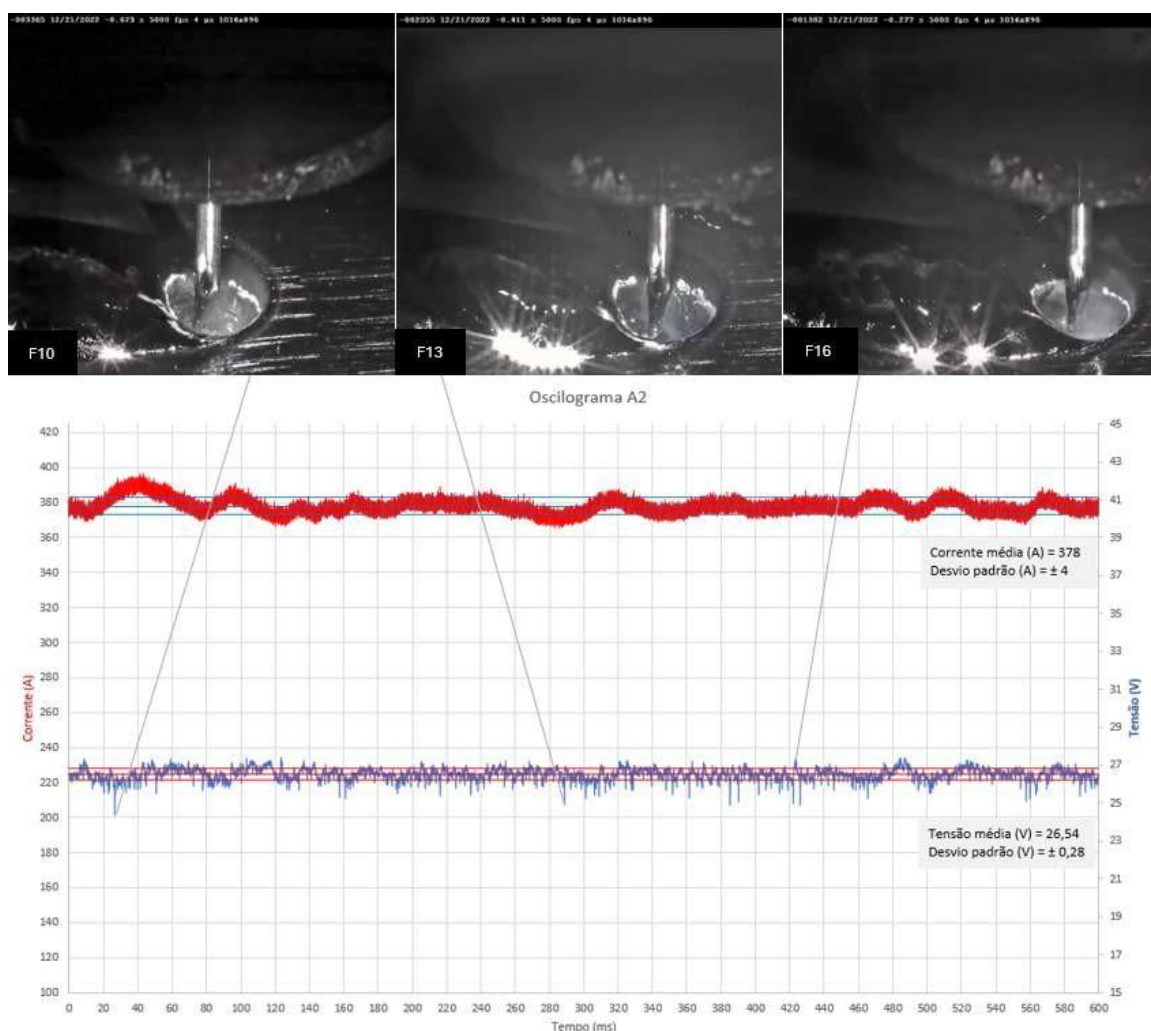


Figura 119 – Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem A2. Fonte: O autor.
 Filmagens em: <https://www.youtube.com/watch?v=x7yy1AunPJM>

Na sequência de *frames* destes pontos, conforme Figura 120, é possível observar que os eventos de instabilidade, do ponto de vista da tensão, traduziram as mesmas tendências, sem descaracterizar a condição do conjunto composto pela transferência metálica e a poça de fusão, com exceção da primeira sequência (*frames* 11, 12 e 13), que, apesar de manter a transferência em *spray* em *streaming* em uma condição de *buried arc*, apresentou salpicos finos, conforme pode ser melhor observado nas filmagens, provavelmente, devido à sua taxa maior de subida de corrente em relação aos demais, que deve ter provocado este despreendimento momentâneo de material em função deste aumento repentino de energia.

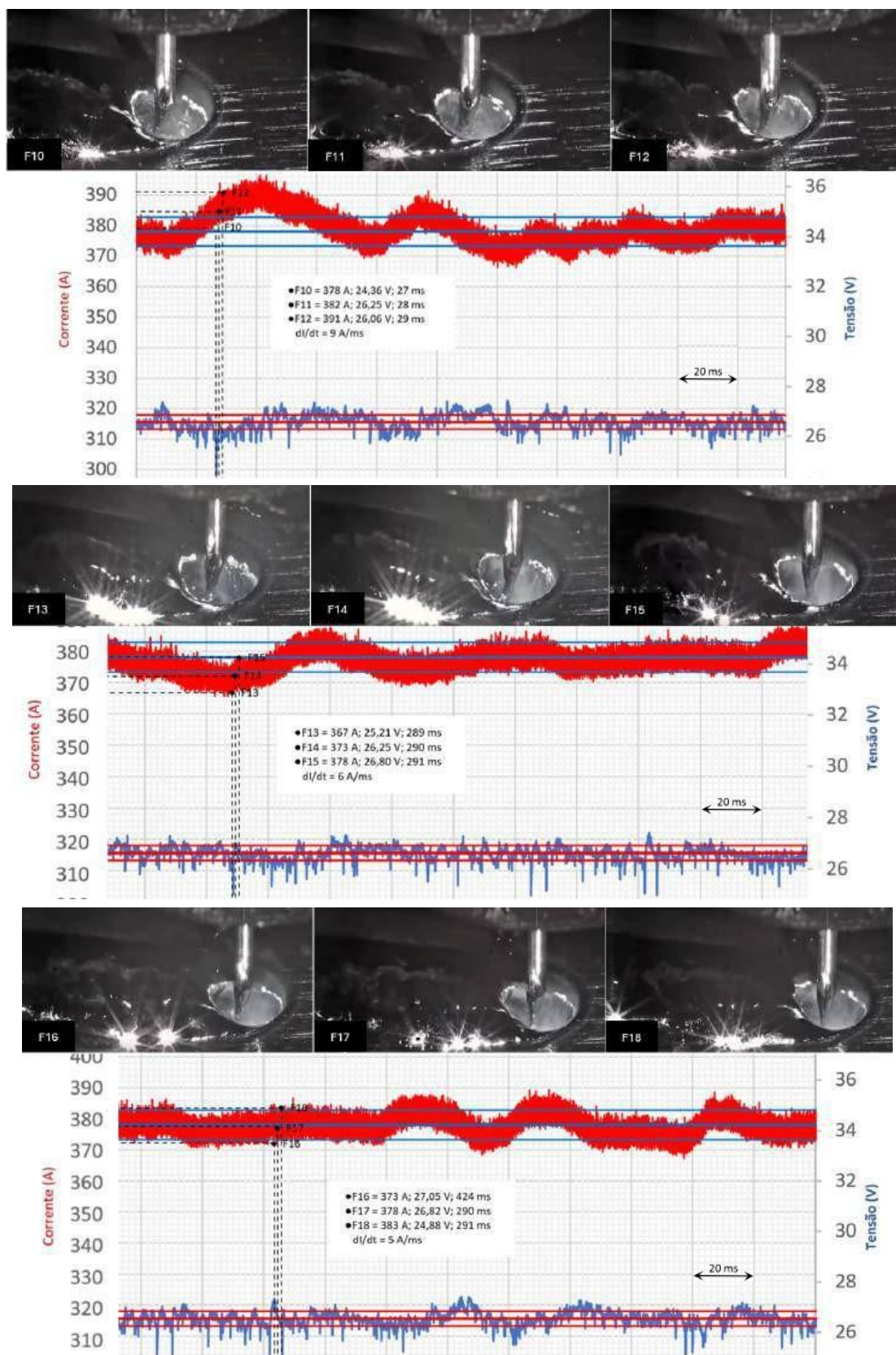


Figura 120 - Frames dos pontos de maior instabilidade na soldagem A2. Fonte: O autor.

Seguindo a metodologia dos experimentos anteriores, neste momento é realizada a análise do cordão B1, conforme Figura 121, na qual é possível observar três situações de instabilidade, em que as variações de tensão que extrapolaram em até três vezes o desvio padrão, conforme oscilograma da referida figura. Estes “overshoots” de tensão parecem ser consequência de uma variação desproporcionalmente alta de corrente, devido ao fato de esta fonte não ter controlabilidade sobre seus efeitos indutivos. Assim, é possível ver, já nas primeiras amostras de frames, condições de perturbações tanto na transferência metálica quanto na poça de fusão, as quais são detalhadas a seguir.

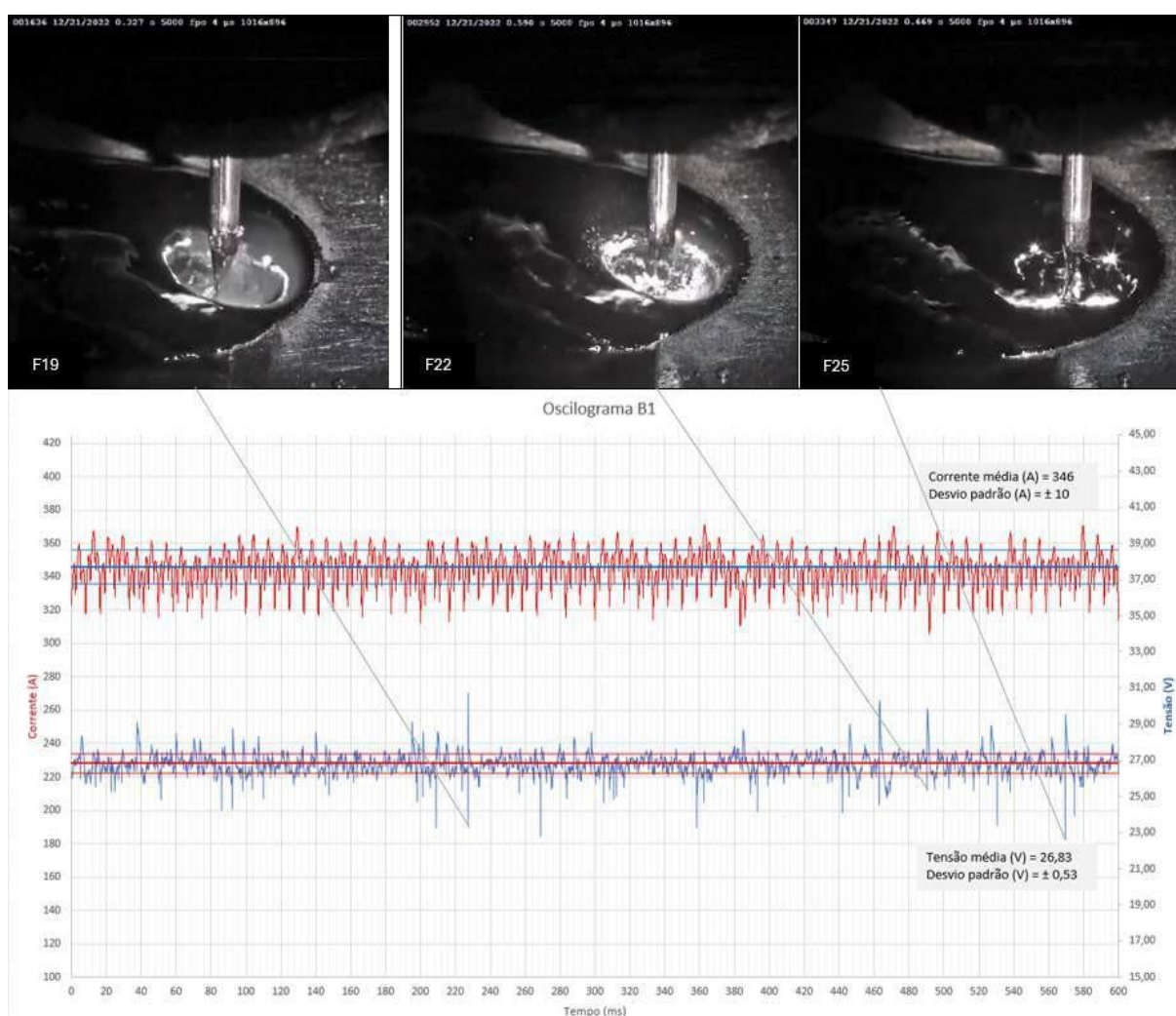


Figura 121 - Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem B1. Fonte: O autor.

Filmagens em: <https://youtu.be/hXs0LI5nAnU?si=QGTXIqMDkExknSc7>

Nesta primeira sequência de *frames*, com uma tendência de alta de corrente, conforme Figura 122, é possível observar uma forte queda de tensão seguida por

uma forte alta, em um período inferior a 1 ms, em que, apesar de não terem sido observadas alterações significativas na transferência metálica, tampouco na poça de fusão, há ocorrência de salpicos, provavelmente provenientes deste aumento súbito de energia. Pela sequência de registros do oscilograma, pode-se perceber que este aumento súbito de energia se deve à alta de tensão simultânea a um momento de alta da corrente. Vale lembrar, que esta forma de onda e regularidade são características de fontes tiristorizadas e, independente de seus movimentos maiores de subida e de descida, elas já atuam com uma oscilação proveniente do chaveamento (ripple).

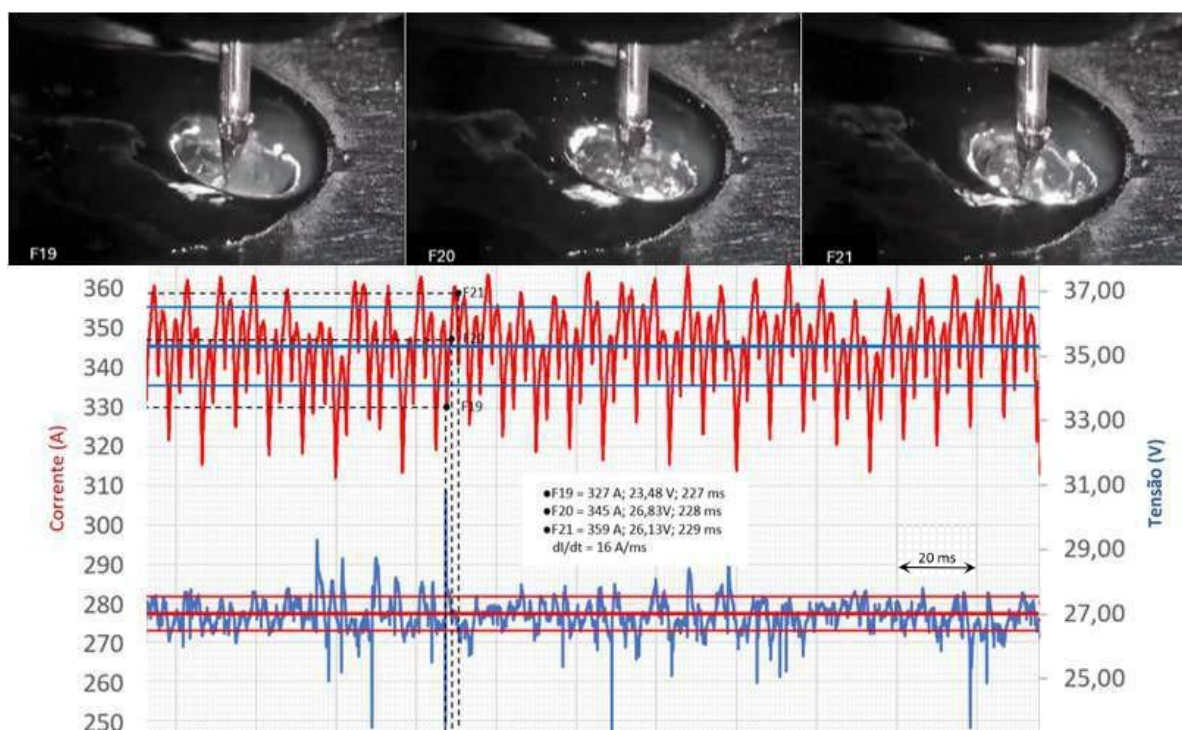


Figura 122 - *Frames* dos pontos F19, 20 e 21 da soldagem B1. Fonte: O autor.

Na próxima situação de instabilidade, conforme Figura 123, em que ocorreu um forte movimento de alta de tensão, seguido de uma queda mais gradual, acompanhado por um forte movimento de baixa de corrente. Observa-se, neste caso, uma intensa perturbação da ponta fundida do arame, com propagação de respingos, em uma região onde ambos os transientes elétricos estão fora de suas faixas de desvio padrão. Condição que provoca uma alta súbita do arco elétrico, sem amortecimento de seu retorno à condição de trabalho em regime.

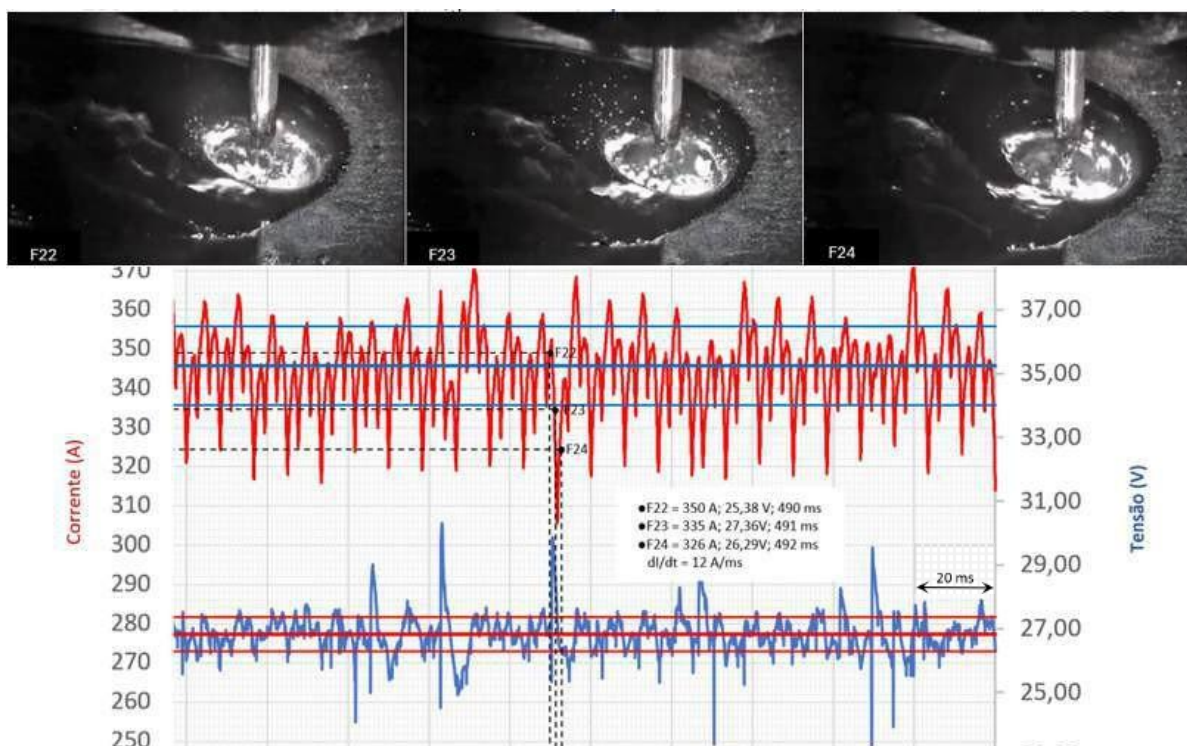


Figura 123 - *Frames* dos pontos F22, 23 e 24 da soldagem B1. Fonte: O autor.

Na última sequência de eventos analisada desta soldagem, conforme Figura 124, observa-se no primeiro *frame*, uma forte perturbação da poça de fusão, acompanhada da descaracterização da transferência metálica, em um momento de acentuada queda do valor de tensão, a mais baixa deste período analisado. Em seguida, ocorre uma subida abrupta de tensão (*overshoot*), que causa um comportamento explosivo da transferência metálica, conforme pode ser observado no segundo *frame*. Finalmente, no último *frame*, é possível observar que, apesar do arco parecer mais alto, devido ao encurtamento da ponta fundida do arame, inicia-se uma transferência globular, que pode ser conferida na sequência de frames, a partir dos 670 ms, da filmografia já referenciada.

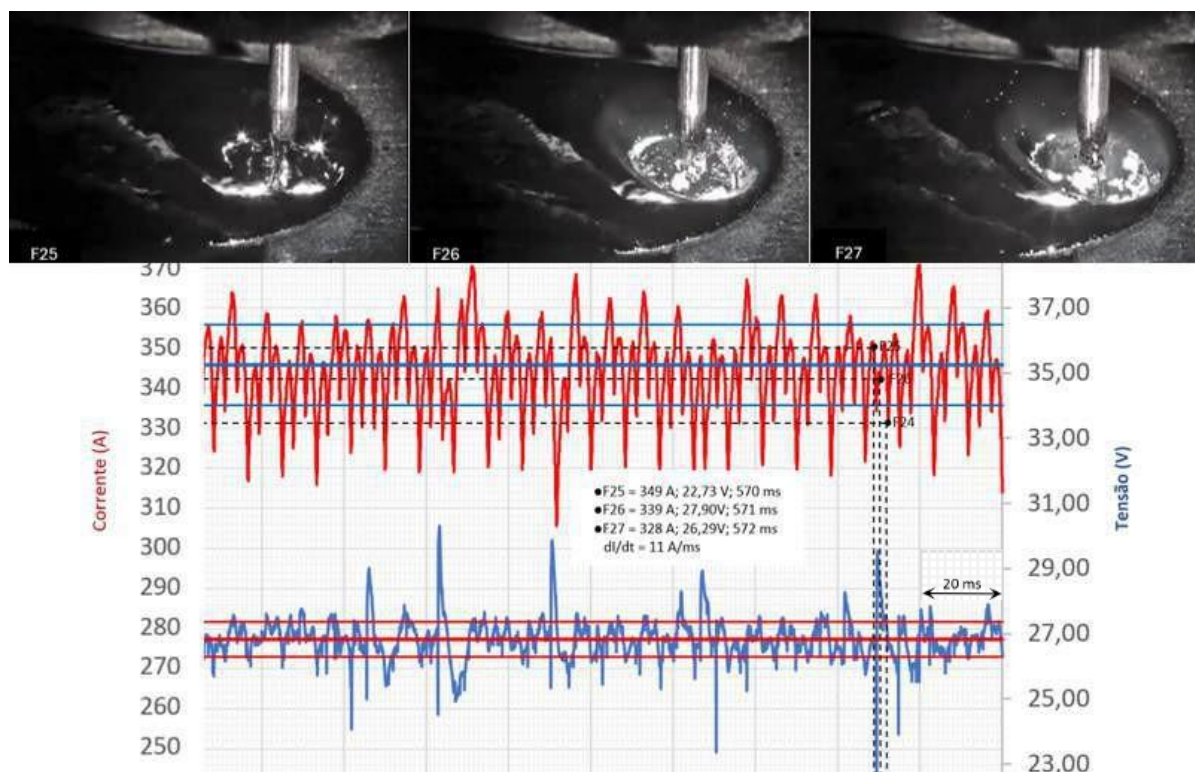


Figura 124 - *Frames* dos pontos F25, 26 e 27 da soldagem B1. Fonte: O autor.

Conforme resultados apresentados até o momento, pode-se afirmar que, no caso do *DynaFlex-Arc*, o aumento da velocidade de soldagem provocou um incremento da estabilidade. Isso ocorreu devido, em tese, à mudança de posição relativa do arame na poça de fusão, o que promoveu uma diminuição da altura do arco elétrico, diminuindo, assim, a oposição à passagem de corrente e, por consequência, aumento desta. Como foi possível observar nas imagens das soldagens realizadas, esses efeitos não causaram descaracterização da transferência metálica em *spray* em *streaming*, nem mesmo perturbações significativas nos pontos críticos, da perspectiva das variações bruscas de tensão analisadas.

No caso das soldagens realizadas com o MIG/MAG convencional, foi possível observar que, ao contrário do *DynaFlex-Arc*, o aumento da velocidade de soldagem não melhorou a estabilidade do processo, apesar de ter mantido a tendência de aumento dos valores de corrente média. Este aumento da corrente média parecer ter deixado a transferência metálica muito próxima da região de energia favorável à formação da condição em *spray* rotacional, pois é possível constatar, nas imagens dos *frames* da Figura 125, referentes aos pontos com maior variação de tensão, uma tendência à descaracterização do *spray* em *streaming*, com evolução para a formação

do *spray* rotacional, o que pode ser conferido com mais detalhes na sequência dos resultados.

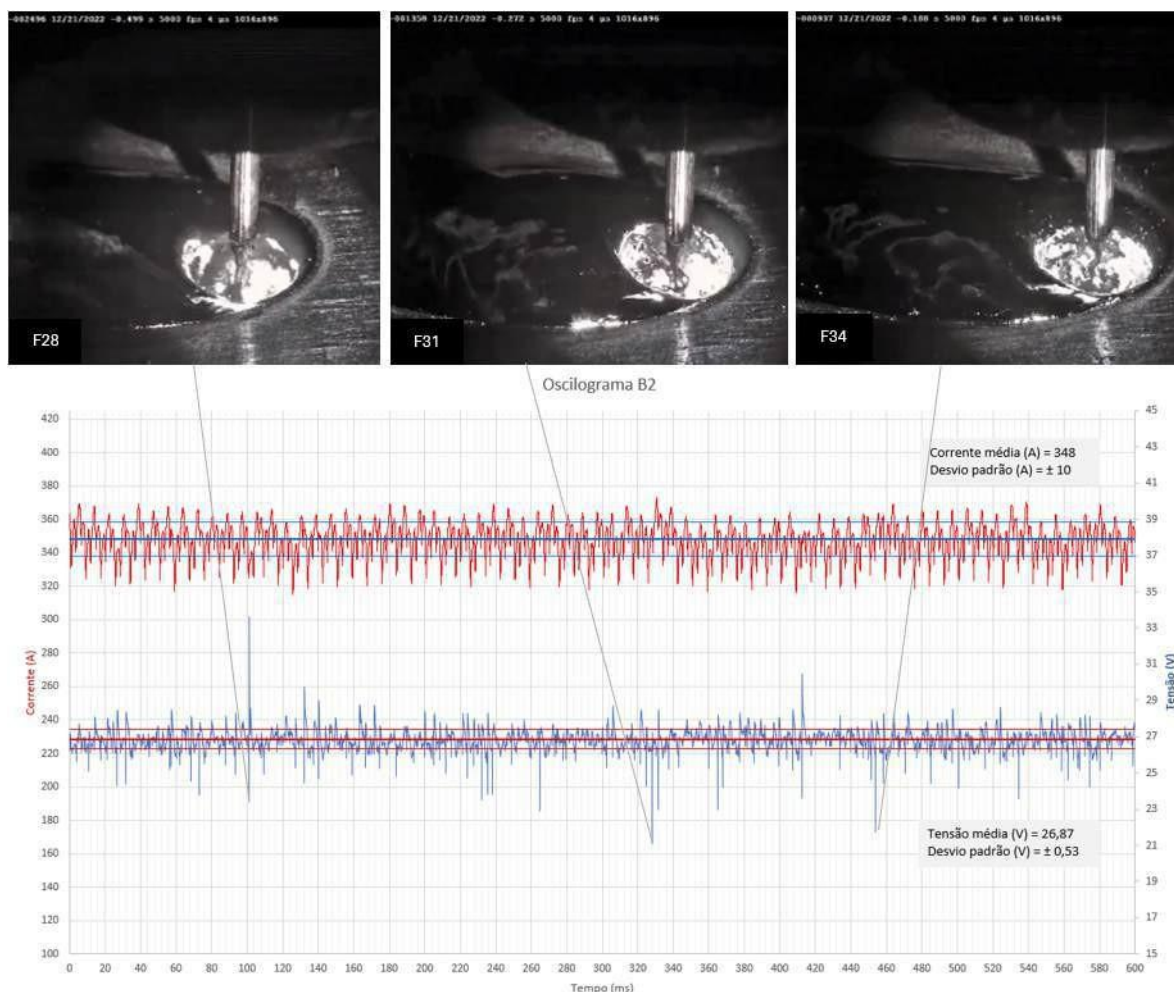


Figura 125 - Pontos de maior instabilidade de tensão na soldagem B2. Fonte: O autor.
 Filmagens em: <https://www.youtube.com/watch?v=uB4qP4leWLY>

Na primeira sequência de *frames*, conforme Figura 126, é possível observar que a transferência metálica já vem de uma tendência à formação rotacional e, ao sofrer um “*overshoot*” de tensão, mesmo com a corrente relativamente baixa, ainda assim, provocou um aumento súbito da potência que causou a projeção de respingos. Aparentemente, a reação natural da fonte em recuperar a tensão aos patamares de operação, frente a uma queda abrupta de tensão, causou este “*overshoot*”, considerando que não houve reação de subida de corrente por parte da fonte. Ou seja, como a fonte manteve a corrente em patamares próximos ou abaixo do desvio-padrão, a tensão sofreu uma alta exagerada que acabou provocando esta instabilidade na transferência metálica, na tentativa de restabelecer o seu valor programado.

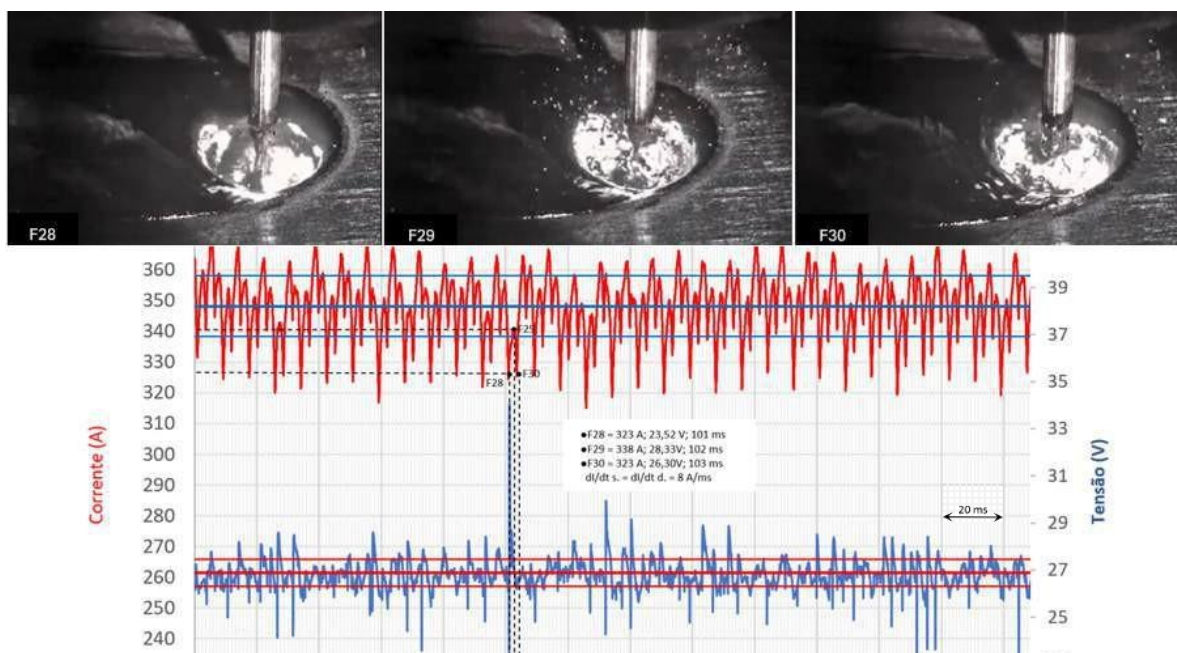


Figura 126 - *Frames* dos pontos F28, 29 e 30 da soldagem B2. Fonte: O autor.

No próximo evento de instabilidade, conforme Figura 127, pode-se verificar um contraponto à situação anterior: no momento da queda de tensão, a corrente estava, coincidentemente, em um ciclo de alta, de tal forma que não ocorre o “overshoot” de tensão. Ou seja, como a corrente já estava em um patamar elevado no momento da instabilidade, a fonte não fez esta compensação na potência por meio de um pico de subida de tensão.

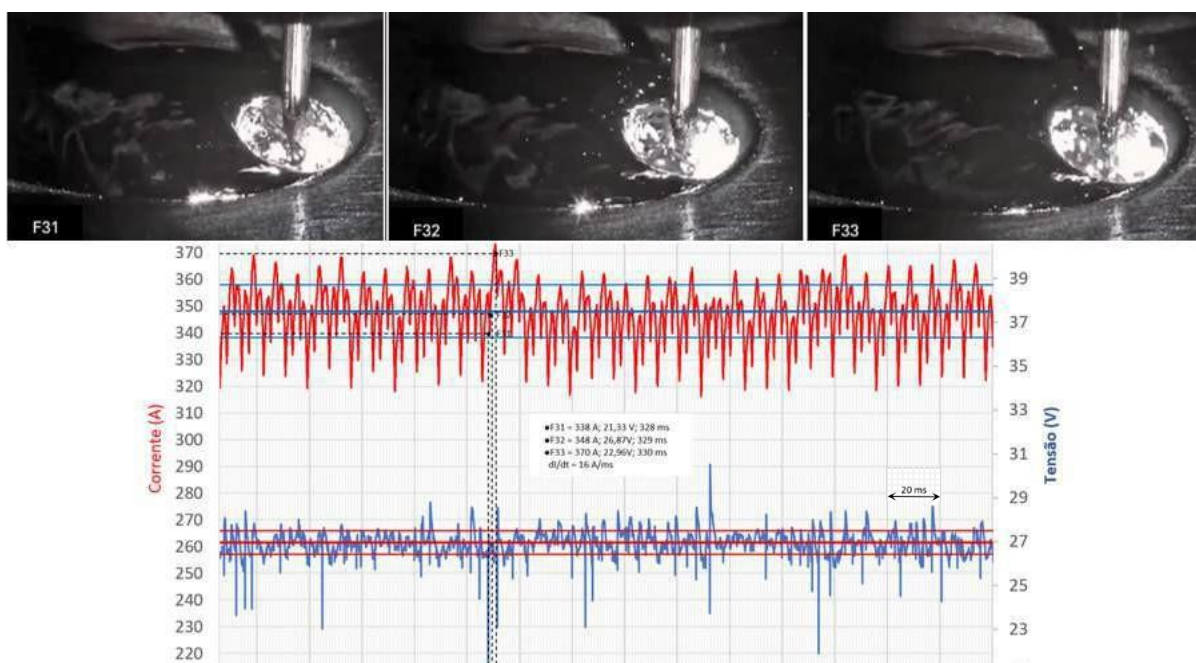


Figura 127 - *Frames* dos pontos F31, 32 e 33 da soldagem B2. Fonte: O autor.

Este fato corrobora a ideia anterior de que os “overshoots” de tensão servem para fazer o balanço de energia quando as instabilidades ocorrem em um momento em que a corrente está em um ciclo de baixa, e que não há um controle refinado da variação de corrente a fim de recuperar seus valores à faixa de operação e, assim, estabilizar o processo.

No último evento de instabilidade analisado, conforme Figura 128, pode-se observar outra situação de queda de tensão abrupta sucedida de uma alta no valor de corrente, garantida não pela dinâmica da fonte, mas pela coincidência de ocorrer em seu ciclo de alta, em uma condição bem definida de *spray* rotacional.

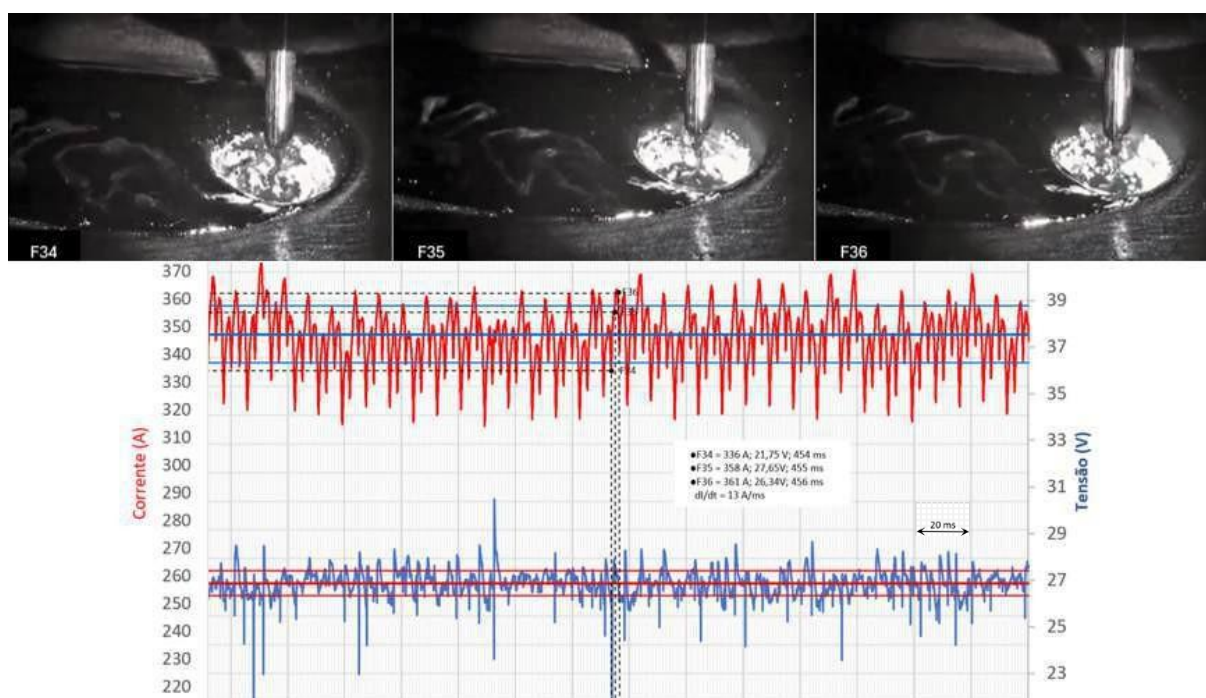


Figura 128 - Sequência de frames dos pontos F34, 35 e 36 da soldagem B2. Fonte: O autor.

Para encerrar este Subitem, os cordões de solda realizados podem ser conferidos na Tabela 18, em que não foram observadas, para os pares de ensaios com os parâmetros similares, diferenças significativas quanto ao aspecto superficial. Quanto às macrografias, as soldas feitas com o *DynaFlex-Arc* apresentaram penetração e largura maiores do que a de seus pares, feitas com o MIG/MAG convencional. Em seguida são apresentados, conforme tabela tal, os valores resultados das medições das geometrias das soldas realizadas.

Tabela 18 - Cordões e macros das soldas realizadas. Fonte: O autor.


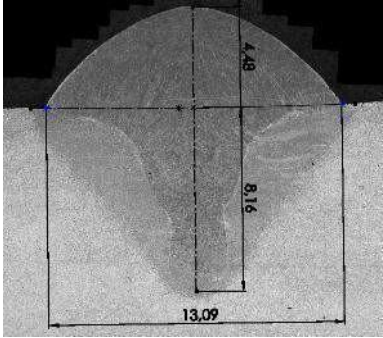

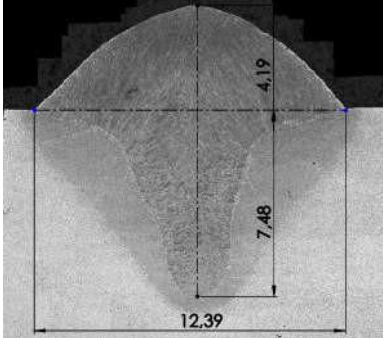

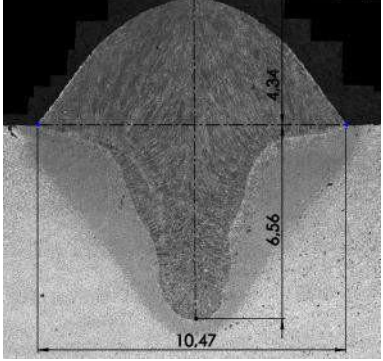

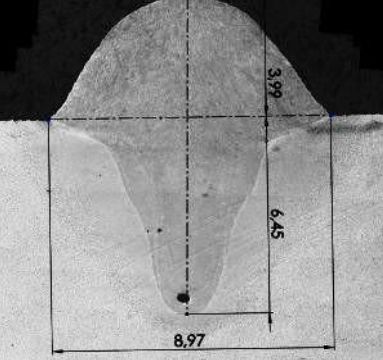
Nº	Aspecto superficial	Macro
A1		
B1		
A2		
B2		

Tabela 19 - Medições das geometrias das soldas A1, A2, B1 e B2. Fonte: O autor.

Cordão	DynaFlex-Arc		MIG/MAG conv.		Cálculos (%)	
	A1	A2	B1	B2	A1/B1	A2/B2
Área da penetração (mm ²)	32,09	23,6	30,23	23,38	6,15%	0,94%
Penetração (mm)	8,16	6,56	7,48	6,45	9,09%	1,70%
Largura (mm)	13,09	10,47	12,39	8,97	5,64%	16,72%

5.4 ESTUDO DA FORMAÇÃO DE *HUMPING*

Seguindo com os experimentos, como a fonte de soldagem CLOOS é da década de 1970, tiristorizada, e tem maiores limitações quanto à regulagem de tensão e velocidade de alimentação de arame em comparação com a fonte IMC, transistorizada, com controle de indutância, buscou-se estabelecer parâmetros semelhantes para a realização dos experimentos.

Os parâmetros de soldagem foram ajustados para garantir que o modo de transferência fosse predominantemente em *spray* com 30 V. Uma vez que os controles analógicos foram parametrizados na fonte tiristorizada, as mesmas condições foram executadas analogamente com parâmetros eletrônicos idênticos na fonte transistorizada, variando apenas com o aumento da velocidade, começando em 0,6 m/min até que o defeito de *humping* fosse identificado. Os valores dos parâmetros monitorados podem ser vistos na Tabela 20 (Ks/Kd = controle indireto de indutância, para a subida e descida de corrente, respectivamente; DBCP = distância do bico de contato à peça de trabalho).

Tabela 20 - Parâmetros aquisitados das amostras mais relevantes: Convencional (amostras C), DynaFlex (amostras D). Fonte: O autor.

Amostra	Tensão (V)	Vel. soldagem (cm/min)	Corrente (A)	Vel. arame (m/min)	Ks/Kd	DBCP (mm)	Potência (kW)
C1	30,6	60	296,9	15	-	18	9,088
C12	30,4	170	309,7	15	-	18	9,422
C20	30,4	250	292,4	15	-	18	9,045
D1	29,8	60	426,0	15	100/1	18	12,706
D12	29,1	170	430,9	15	100/1	18	12,541

Com os dados adquiridos, as disparidades na corrente entre os dois processos são evidentes, onde o *DynaFlex-Arc* apresentou correntes pelo menos 100 A superiores ao convencional, resultando em maior potência. Este resultado depende da fonte de energia, mas é útil para tirar conclusões sobre o comportamento do processo sob as diferentes condições de trabalho do *Dynaflex-Arc* e do MIG/MAG convencional. A capacidade da fonte de energia transistorizada eletrônica em manter uma corrente mais alta (e maior potência) para uma tensão ajustada de 30 V leva a

maior fusão e maior pressão do arco, e, portanto, a uma poça de fusão mais larga e profunda (condição de arco enterrado). Isso resulta em maior penetração (com estabilidade adequada da poça de fusão, como mostrado por Dutra et al. [8]), conforme será descrito adiante.

Os oscilogramas apresentados na Figura 129 mostram o comportamento da tensão e da corrente durante 1 segundo, e retratam as condições oscilográficas para velocidades de soldagem mais baixas e para o limite de velocidade de soldagem para a formação de *humping*, para ambas as tecnologias MIG/MAG.

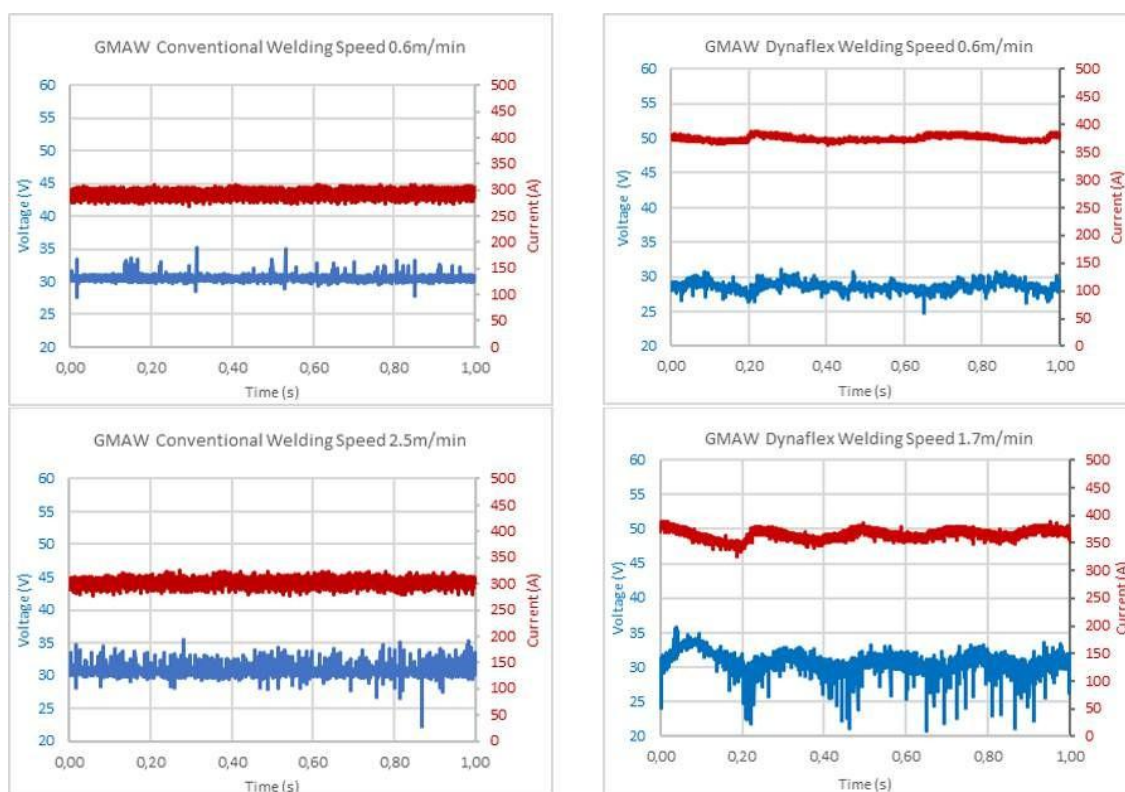


Figura 129 - Oscilogramas com as variações de tensão e corrente dos principais ensaios.
Fonte: O autor.

Para velocidades de soldagem abaixo do limite para a formação de *humping*, a soldagem apresentou um comportamento estável para ambos os sistemas, apontando para um regime de transferência metálica que ocorre por meio de um filamento de material fundido, sem a ocorrência de formação de gotas por fluxo (diferente do *spray*), e poucos curtos-circuitos incipientes (sem ocorrência de transferência metálica), apesar da transferência ocorrer com o arco enterrado. Pode-se observar que a fonte IMC atuou no controle de indutância para evitar curtos-circuitos violentos e o colapso da poça de fusão.

Para as velocidades de soldagem próximas ao limite para a formação de *humping*, observou-se um aumento na instabilidade do processo, com a cratera da poça de fusão se alongando e se tornando mais estreita. O aumento da frequência de curtos-circuitos também foi notado, particularmente na soldagem *Dynaflex-Arc*. Essas condições indicam uma transição para um regime instável, onde a poça de fusão não consegue mais se sustentar adequadamente, sofrendo o transbordamento de material fundido, o que resulta na formação do defeito de *humping*. O comportamento oscilográfico capturado reforça essas observações, mostrando variações bruscas na corrente e tensão durante esse estado de operação.

A videografia de alta velocidade permitiu uma análise mais precisa do processo. A Figura 130a e Figura 130b ilustram as condições para a velocidade de soldagem inicial dos experimentos, de 0,6 m/min, para o MIG/MAG convencional e o *Dynaflex-Arc*, respectivamente. A Figura 130c e Figura 130d mostra os limites de velocidade onde ocorreu o *humping*; a maior velocidade desestabilizou a cratera da poça de fusão, e é possível notar um aumento na ocorrência de curtos-circuitos. Nas imagens da Figura 130, também é possível identificar aspectos do mecanismo de formação do *humping*. No lado direito da Figura 130c e Figura 130d, o arco é visto sobre a cratera da poça de fusão (depressão), e no centro dessas imagens pode-se ver a protuberância formada pelo metal fundido que é empurrado para baixo (sob o arco) e, em seguida, para trás. O volume e a velocidade do fluxo de metal fundido para trás são determinados pela corrente de soldagem. Devido à alta velocidade desse fluxo e ao aumento das velocidades de soldagem, o metal fundido se acumula e solidifica, formando as protuberâncias (*humping*).

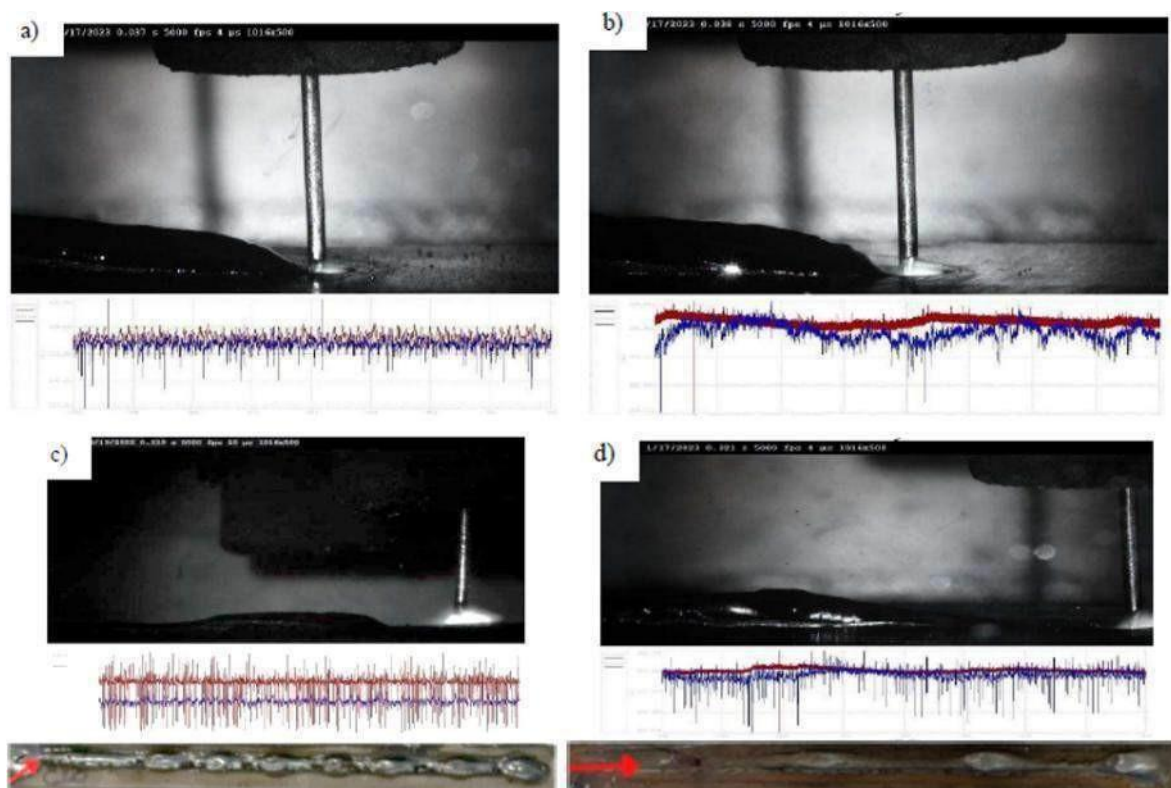


Figura 130 - Filmagem em alta velocidade do MIG/MAG convencional e do *DynaFlex-Arc* e seus respectivos oscilogramas de corrente (vermelho) e tensão (azul). Fonte: O autor. Em a) e b) Velocidade de soldagem de 0,6 m/min; c) Formação de *humping* com o MIG/MAG convencional com velocidade de soldagem de 2,5 m/min; d) Formação de *humping* com o *DynaFlex-Arc* com velocidade de soldagem de 1,7 m/min.

A Figura 131 mostra três quadros de vídeo de uma filmagem experimental, (a) logo após a extinção do arco, (b) o metal líquido acumulando no cordão (centro da imagem), (c) protuberância formada/solidificada (centro da imagem).



Figura 131 - Quadros de filmagem em alta velocidade para diferentes estágios de solidificação de uma protuberância (*hump*). Fonte: O autor. Em a) Logo após a extinção do arco; b) Metal líquido acumulado no cordão (centro da imagem); c) *Hump* formado/solidificado.

A análise macrográfica foi realizada para os testes descritos, a fim de medir as características geométricas do cordão de solda. A Figura 132 mostra os resultados para o MIG/MAG convencional, (a) 0,6 m/min, (b) 2,5 m/min (limite de velocidade para a formação de *humping*).

A amostra C1 (ver Tabela 20), vista na Figura 132a, mostra uma boa penetração (6,2 mm). Apesar de uma boa molhabilidade nas extremidades do cordão, o reforço do cordão é consideravelmente elevado. O excesso de reforço é uma característica comum em testes experimentais de soldagem sobre chapa plana para investigações relacionadas ao processo de MIG/MAG de alto desempenho (arco enterrado). Aplicações reais em juntas requerem um chanfro (mesmo que bem menor do que nas condições de MIG/MAG convencional), resultando em reforços aceitáveis [8]. O aumento adicional da corrente levou à direção de um efeito de "*ballooning*", conforme proposto por Bradstreet [96], onde uma geometria de "pescoço" se forma entre o material de base e o material adicionado. À medida que a velocidade de soldagem atinge 2,5 m/min (amostra C20), o defeito de *humping* ocorre efetivamente, formando subseqüentes protuberâncias e vales (a Figura 132b mostra a seção transversal de um vale e uma protuberância ao fundo). A redução significativa na penetração e a aparente falta de material são notáveis, causadas pelo deslocamento forçado do material fundido.

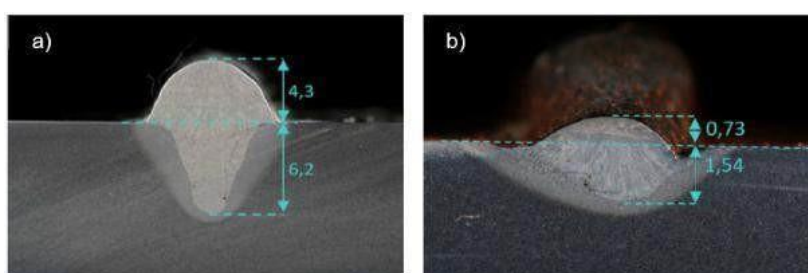


Figura 132 - Macrografias. Fonte: O autor. Em a) Cordão de solda C1, $V_c = 0,6$ m/min; b) Cordão de solda C20, $V_s = 2,5$ m/min.

As discontinuidades observadas para uma corrente de aproximadamente 300 A no processo MIG/MAG convencional tendem a corroborar o que foi sugerido por Bradstreet [96], que o *humping* é acompanhado por mais de uma discontinuidade e defeitos, como falta de fusão, porosidade e falta de penetração. Nguyen et al. [127], no entanto, afirmam que para a corrente referida, o defeito de falta de fusão não deveria estar presente.

Imagens macrográficas da seção transversal dos cordões de solda do *Dynaflex-Arc* podem ser vistas na Figura 133.

É possível notar que na amostra D1 (ver Tabela 20), a 0,6 m/min (Figura 133a), a morfologia do cordão apresenta uma diferença em relação ao processo convencional na mesma velocidade (Figura 131a), com uma aparência ligeiramente mais convexa, boa molhabilidade nas extremidades e maior penetração (7,1 mm). O aumento adicional da corrente de soldagem levou ao efeito de " *ballooning*" e, finalmente, na amostra D12, a 1,7 m/min de velocidade de soldagem, uma seção transversal de uma protuberância apareceu (Figura 133b), estabelecendo o limite de velocidade de soldagem para a formação de *humping*. A morfologia do cordão apresentada é irregular, com uma grande redução de penetração em comparação com os outros cordões e com grandes formações de falta de fusão nas extremidades. A geometria deste cordão é representativa da formação irregular e incomum que ocorre durante o *humping*.

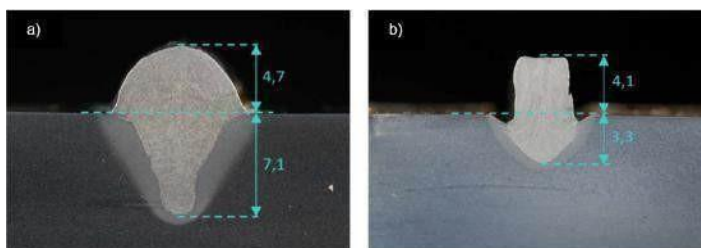


Figura 133 - Macrografias. Fonte: O autor. Em a) Cordão de solda D1, $V_c = 0,6$ m/min; b) Cordão de solda D12, $V_c = 1,7$.

Quanto às termografias, devido às dificuldades em determinar a emissividade do metal fundido, a técnica foi aplicada qualitativamente, com uma emissividade arbitrária, com o objetivo de destacar as diferenças de temperatura e não os valores absolutos de temperatura. Por essa razão, os valores de temperatura na poça de fusão abaixo do arco são mostrados como inferiores à temperatura de fusão do aço. A análise dos dois processos de soldagem é apresentada na Figura 99. Utilizando ajustes semelhantes de parâmetros de soldagem e uma velocidade de soldagem de 0,6 m/min, foi feita uma tentativa de avaliar termograficamente e de forma comparativa a poça de metal fundido em regime.

A câmera foi posicionada horizontalmente a aproximadamente 0,5 m de distância do cordão, com um ângulo perpendicular à trajetória de soldagem, e focada

na região onde o eletrodo toca o metal base. Para o tratamento e análise das imagens, foi utilizado o *software* Altair.

A Figura 134a referente ao MIG/MAG convencional, mostra uma área de alta temperatura menor na região do arco/poça de fusão, em comparação ao MIG/MAG *Dynaflex-Arc* (Figura 134b). Isso pode ser atribuído à menor corrente e ao menor volume de poça de fusão do processo convencional. Além disso, há um gradiente de temperatura mais longo na parte posterior da poça de fusão (região verde/amarela) do *Dynaflex-Arc* em comparação ao MIG/MAG convencional. Isso pode ser um resultado do maior volume de metal fundido sendo empurrado para trás e acumulando-se (formando a protuberância) pela maior pressão do arco causada pela maior corrente de soldagem no *Dynaflex-Arc*. A região intermediária azul entre o arco e as protuberâncias (regiões verde/amarela) para ambas as variantes de processo possui temperaturas mais altas e, portanto, emissividades mais baixas [128]. O ponto quente na Figura 134b é hipoteticamente uma ilha de sílica. Essa característica ainda será estudada em trabalhos futuros.

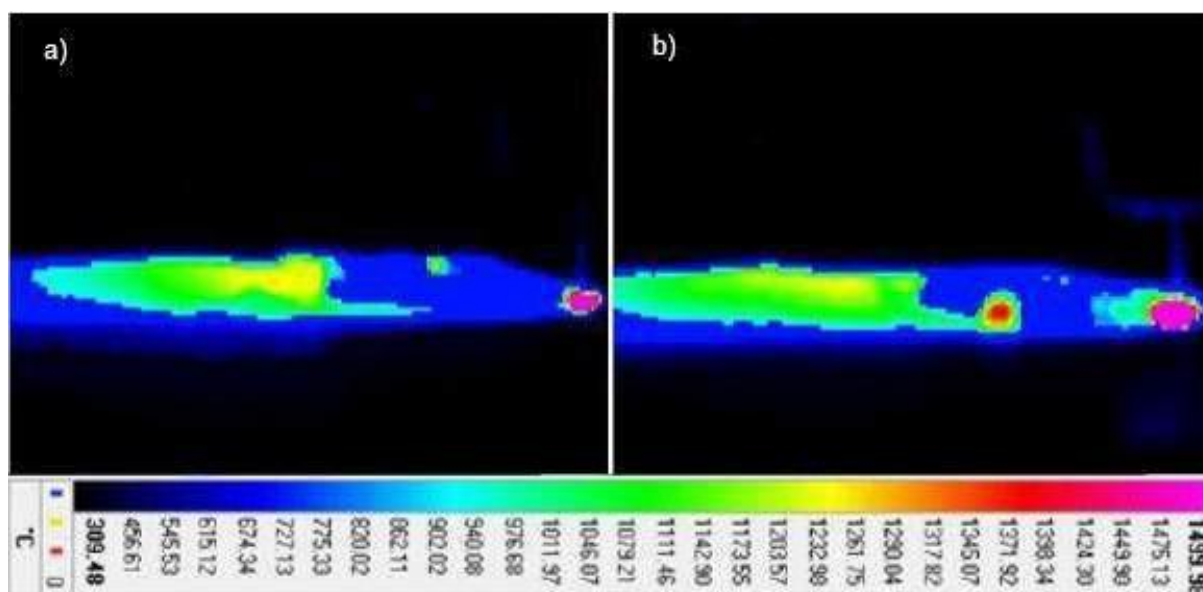


Figura 134 - Filmagem térmica. Fonte: O autor. Em a) MIG/MAG convencional; b) *DynaFlex-Arc*.

5.5 ESTUDO DA VIABILIDADE DO PROCESSO NA EXECUÇÃO MANUAL E MECANIZADA DE REPARO POR CALHAS SOLDADAS SOBRE DUTOS

Antes de iniciar a análise dos resultados, os parâmetros utilizados nos experimentos podem ser revistos na Tabela 21.

Tabela 21 - Parâmetros regulados dos ensaios da soldagem circular de filete. Fonte: O autor.

		Soldagem com um passe						
Grupo 1	Parâmetro	U (V)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Ks	Kd	DBCP (mm)	Tocha
	Manual	30,5	10,0	60,0	100	1	14	Puxando
	Mecanizada	30,5	10,0	60,0	100	1	14	Puxando
		Soldagem com três passes						
Grupo 2	Parâmetro	U (V)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Ks	Kd	DBCP (mm)	Tocha
	Manual	30,5	10,0	60,0	100	5	17	Puxando
	Mecanizada	30,5	10,0	60,0	100	5	17	Puxando

Quanto aos transientes elétricos obtidos com o primeiro grupo de testes com o *DynaFlex-Arc*, com $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e $DBCP = 14$ mm, foi possível verificar, conforme aquisições apresentadas na Figura 135 e Figura 136, referentes à soldagem com um passe manual e à soldagem com um passe mecanizada, respectivamente, que, como já era esperado, os desvios padrão das soldagens realizadas manualmente foram maiores que os desvios padrão realizados com as soldagens mecanizadas. O soldador naturalmente realiza um certo tecimento, além de variar o ângulo de ataque, de trabalho e a DBCP, fatores que podem promover uma soldagens mais instável. Contudo, apesar desses fatores, a soldagem manual resultou em um oscilograma sem registro de curtos-circuitos, demonstrando, assim, a robustez do processo, mesmo com um arco tão curto, característico do *buried arc*.

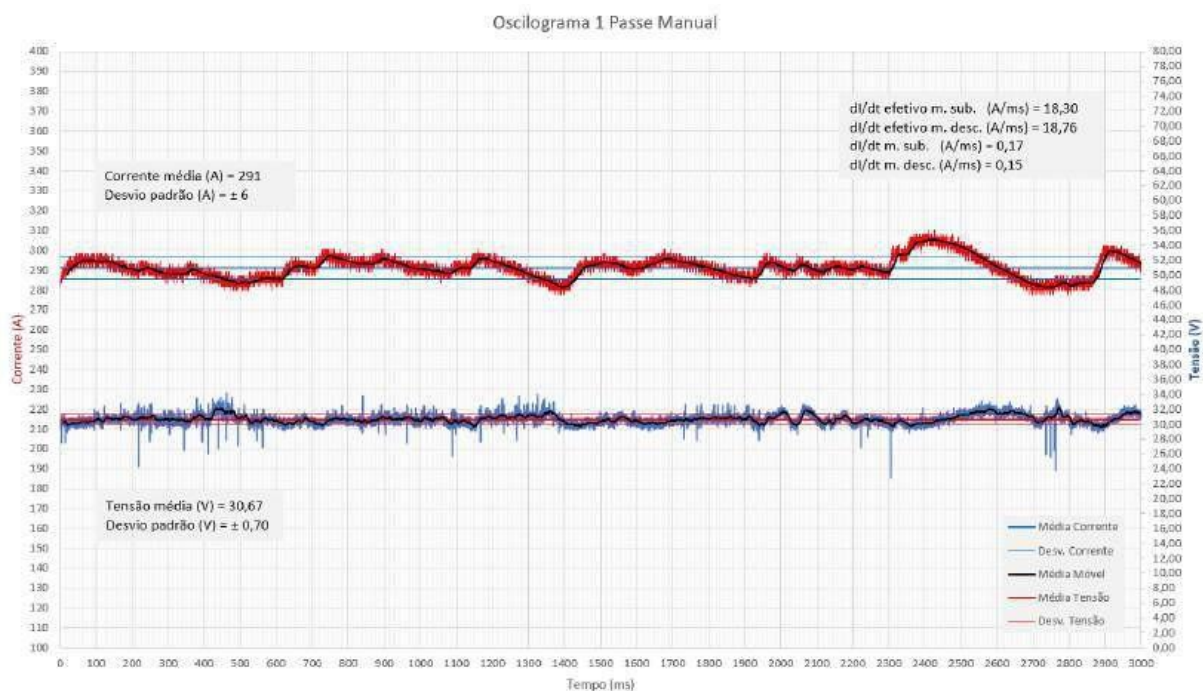


Figura 135 - Oscilograma do *DynaFlex-Arc* com 1 passe manual. Fonte: O autor.

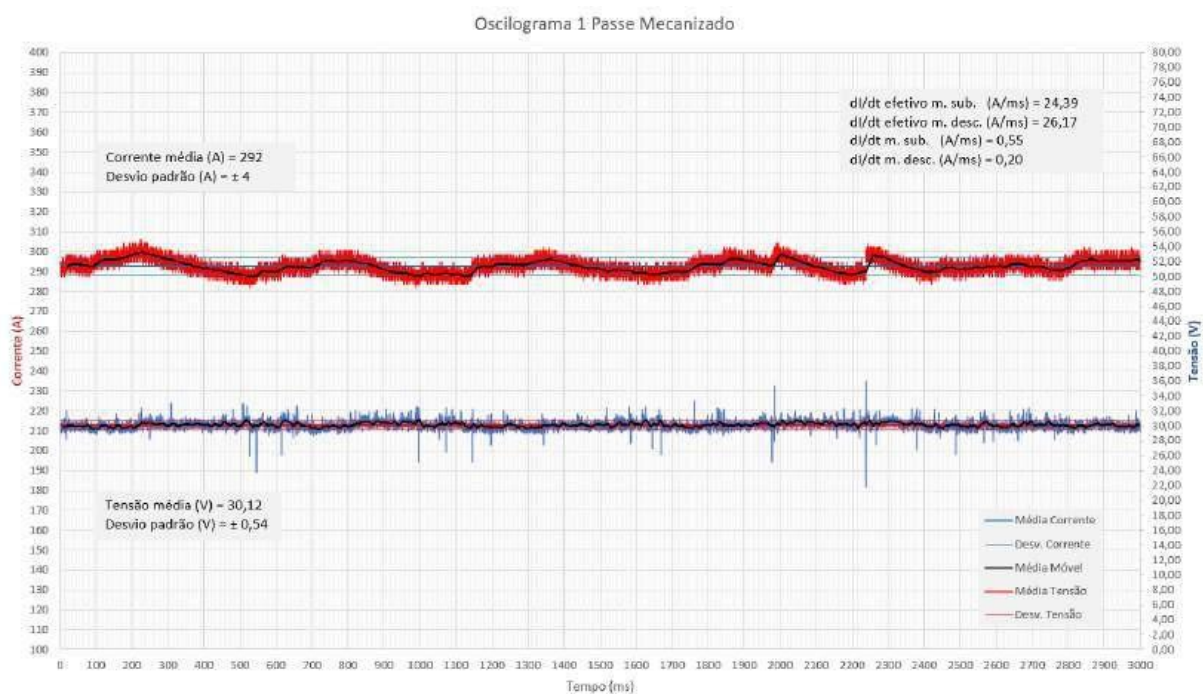


Figura 136 - Oscilograma do *DynaFlex-Arc* com 1 passe mecanizada. Fonte: O autor.

Por se tratar de um processo em *spray* em *streaming*, ocorrido de forma estável, sem registro de quedas de tensão que caracterizassem iminências de curtos-circuitos, a fonte não teve a sua dinâmica demandada para restabelecer a

condição regular, via altas bruscas de corrente, por isso, os valores de dl/dt médios, conforme Tabela 22, não apresentaram as mesmas tendências observadas em situações que a tensão apresentou quedas próximas ou abaixo de 8 V.

Tabela 22 - Parâmetros aquisitados, primeiro grupo de testes. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:	
	1 passe manual	1 passe mecanizada
dl/dt m. sub. (A/ms)	0,17	0,15
dl/dt m. desc. (A/ms)	0,55	0,20
I_m (A)	291	293
I_e (A)	291	293
U_m (V)	30,67	30,10
P_m (W)	8.932	8.816

Quanto aos transientes elétricos do segundo grupo de testes, com $K_s = 100$ e $K_d = 5$ e $DBCP = 17$ mm, obtidos referentes à soldagem do primeiro passe manual, de um total de três, e à soldagem do primeiro passe mecanizado, de um total de três, conforme aquisições apresentadas na Figura 137 e Figura 138, respectivamente. O oscilograma do primeiro teste deste grupo, conforme Figura 137, apresenta uma forte variação dos valores de corrente, em virtude das quedas de tensão provocadas por instabilidades do arco elétrico, e, em especial, os picos de tensão “b” e “c” traduzem esta situação de instabilidade ocorrida. Nesses dois eventos, mesmo na iminência de curtos-circuitos, pois estavam em torno de 8 V, a fonte reagiu com a alta da corrente, afastando a ameaça de uma possível transferência por curto-circuito. Os valores de dl/dt de subida de corrente, baseados na curva da média móvel, entre os pontos “a” e “b”; e “c” e “d” foram, respectivamente 1,00 A/ms e 1,59 A/ms, já os valores de dl/dt de descida de corrente entre os pontos “b” e “c”; e “d” e “e” foram, respectivamente 0,17 A/ms e 0,11 A/ms. Demonstrando assim, a eficácia desta combinação de K_s e K_d , mesmo em uma soldagem manual e, evidenciando a reação da fonte quando a tensão sofre uma queda em torno de 8 V.

Quanto ao oscilograma do segundo teste deste grupo, conforme Figura 138, é possível observar o aumento dos desvios padrões em relação ao segundo teste do grupo anterior, também mecanizado, devido, provavelmente, à maior $DBCP$ utilizada neste caso. A alta da $DBCP$, apesar de diminuir a penetração, conforme previsto, devido a perda de energia por efeito Joule causada pelo *stick out* maior, também aumenta a proximidade da ponta do arame fundido à poça de fusão, provocando

quedas de tensão maiores e, conseqüentemente, um desvio padrão maior, reflexo de parâmetros menos estáveis em relação ao segundo teste do grupo anterior.

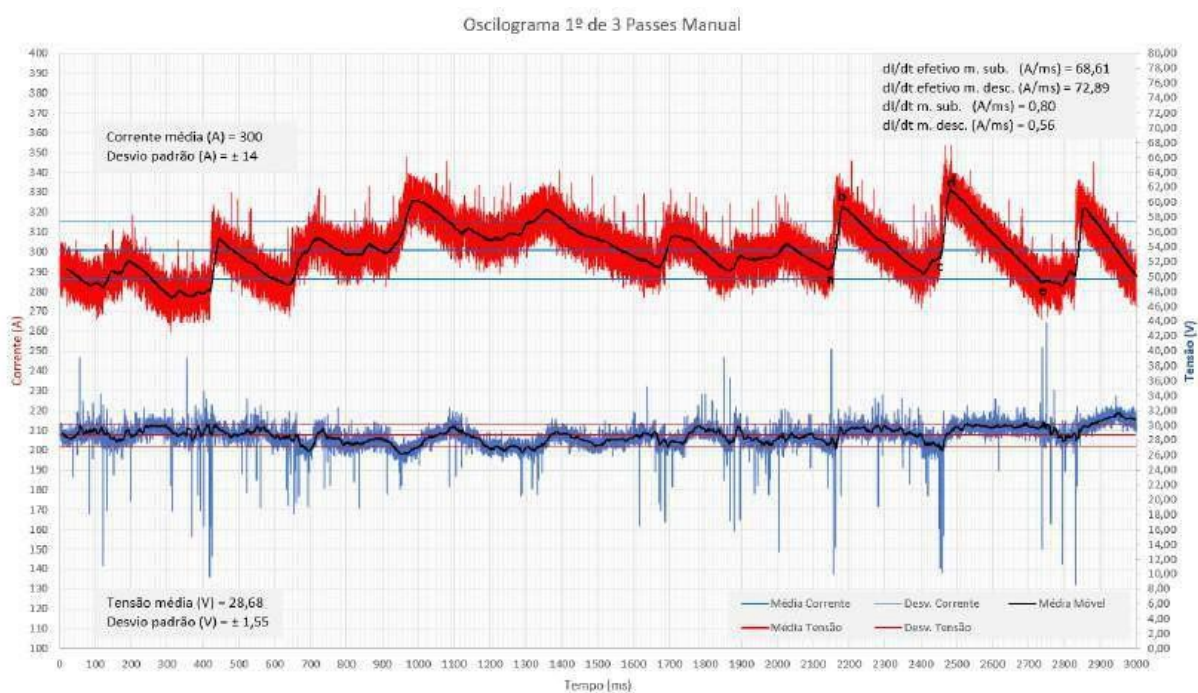


Figura 137 - Oscilograma do DynaFlex-Arc, 1º de 3 passes manual. Fonte: O autor.

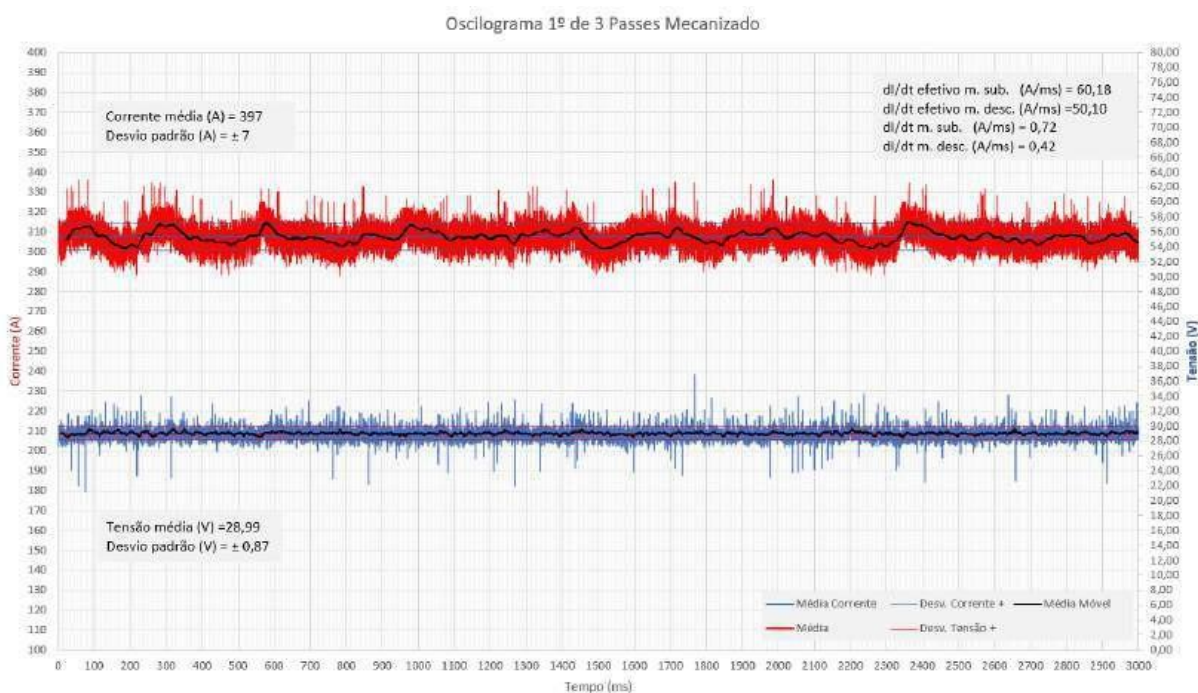


Figura 138 - Oscilograma do DynaFlex-Arc, 1º de 3 passes mecanizada. Fonte: O autor.

Os resultados das aquisições podem ser conferidos na Tabela 23.

Tabela 23 - Parâmetros adquiridos, segundo grupo de testes. Fonte: O autor.

Parâmetros:	Resultados:	
	1º de 3 passes manual	1º de 3 passes mecanizada
dl/dt m. sub. (A/ms)	0,80	0,72
dl/dt m. desc. (A/ms)	0,56	0,42
Im (A)	301	308
Ie (A)	301	308
Um (V)	28,7	29,0
Pm (W)	8.629	8.919

Com relação à condição da junta sobreposta de filete em um tubo fixo, com perfil circular na posição horizontal, tratada neste Subitem, ao contrário da soldagem manual, em que o soldador varia propositalmente, mesmo que minimamente, os ângulos de ataque e de trabalho durante todo o procedimento, a fim de otimizar o controle sobre a poça de fusão, o manipulador mecanizado mantém fixos esses ângulos. Mesmo com os ângulos da tocha em uma posição fixa ao longo de toda a trajetória, foi possível verificar o potencial deste processo, conforme Tabela 24, pois houve poucos defeitos ou descontinuidades como poros, mordeduras ou trincas. No caso das juntas onde foi feito apenas um passe, $kd = 1$, houve porosidades na região dos últimos 10 cm do cordão, na posição sobrecabeça, que é mais propensa a isto, vide Tabela 26.

A referência de posições das macrografias pode ser conferida na Figura 139.

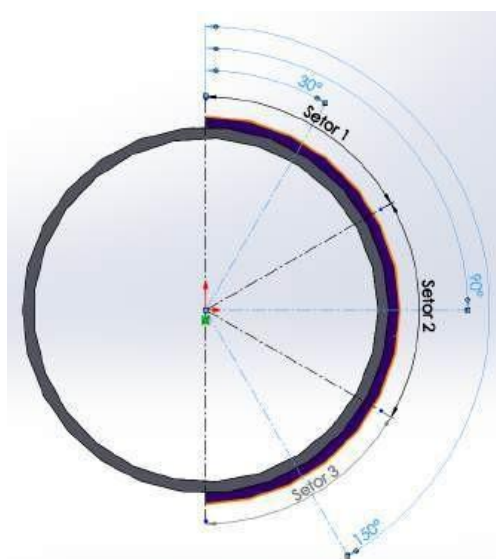









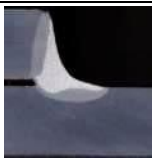















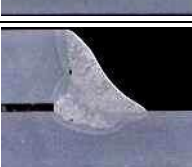
Figura 139 - Posições dos setores e das macrografias extraídas. Fonte: O autor.

Tabela 24 - Soldas com 1 passe, $K_s = 100$ e $K_d = 1$ e DBCP = 14 mm. Fonte: O autor.

	Setor	Cordão	Posição macro	Macro
<i>Dynaflex manual</i>	1		30°	
	2		90°	
	3		150°	
<i>Dynaflex mecanizado</i>	1		30°	
	2		90°	
	3		150°	

Quanto às juntas soldadas com três passes, com $k_d = 5$, também foi possível constatar uma deposição regular, principalmente, sem escorrimento, conforme Tabela 25, que foi a maior preocupação diante das ocorrências nas soldagens exploratórias, mas com registro de falta de fusão, vide Tabela 26. Etapas futuras objetivarão o refinamento dos parâmetros para as diferentes posições de soldagem numa soldagem orbital, gerando, inclusive parâmetros adaptativos, que se alteram ao longo do cordão e das posições de soldagem alcançadas.

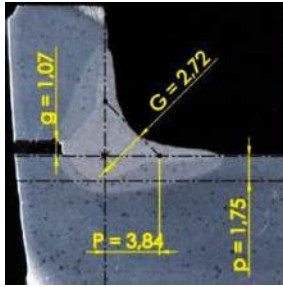
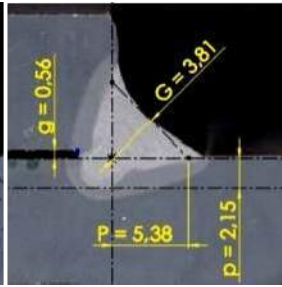
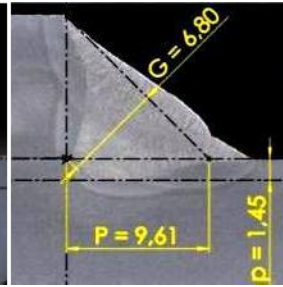
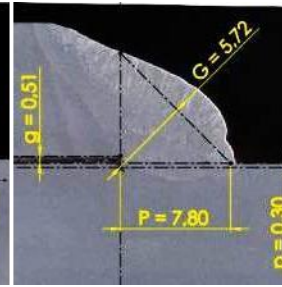
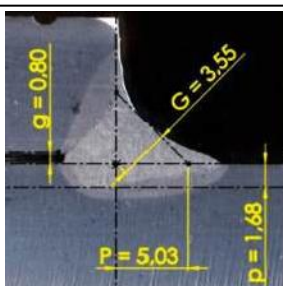
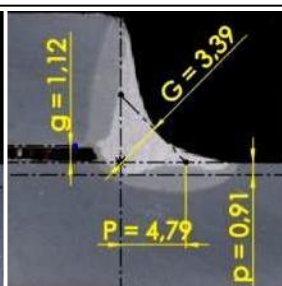
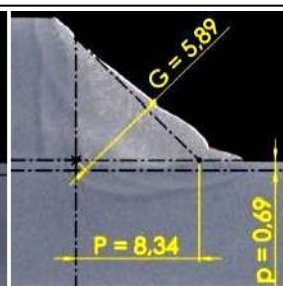
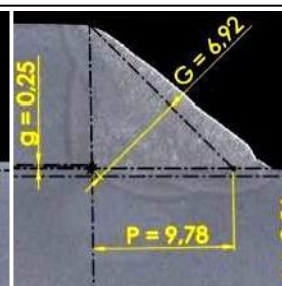
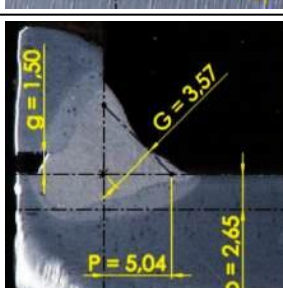
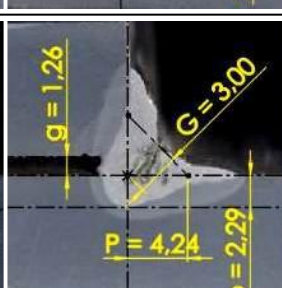
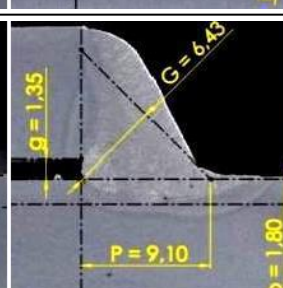
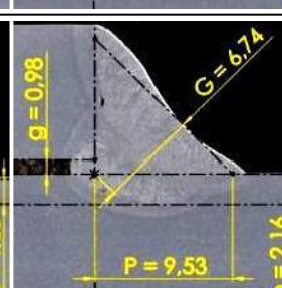
Tabela 25 - Soldas com 3 passes, $K_s = 100$ e $K_d = 5$ e DBCP = 17 mm. Fonte: O autor.

	Setor	Cordão	Posição macro	Macro
<i>Dynaflex manual</i>	1		30°	
	2		90°	
	3		150°	
<i>Dynaflex mecanizado</i>	1		30°	
	2		90°	
	3		150°	

Cabe destacar que em nenhuma das amostras apresentadas a área da ZTA chegou a abranger toda a espessura do duto, minimamente ameaçando perfuração.

As geometrias detalhadas de cada macrografia podem ser conferidas na Tabela 26.

Tabela 26 - Macrografias das secções transversais das juntas soldadas com o *DynaFlex-Arc*.
Fonte: O autor.

Em	Manual 1 passe	Mecanizado 1 passe	Manual 3 passes	Mecanizado 3 passes
30°				
90°				
150°				

*Garganta teórica (G), a perna da solda (P), a penetração (p) e o gap (g).

Em termos de comparação, Nogueira [129] realizou experimentos, sob as mesmas condições dos experimentos realizados para esta testes quanto à posição, tipo de junta, espessura e material, tanto do tubo quanto das calhas, para demonstrar o aumento de penetração com a utilização de sistema de aquecimento por indução do tubo base (sobre o qual uma calha é soldada), com o processo MIG/MAG Pulsado, *pulsed gas metal arc welding (GMAW-P)* para o primeiro passe. Foi obtida uma penetração máxima de 1,3 mm, tensão média de 26,3 V, corrente média de 191 A, velocidade de soldagem de 30 cm/min que resultaram em uma energia de soldagem² de 1,00 KJ/ mm, além de velocidade de alimentação arame de 6 m/min (1,2mm). Em contrapartida, o processo *DynaFlex-Arc* resultou em penetração de 2,65 mm, tensão média de 30,6 V, corrente média de 297 A, velocidade de soldagem de 60 cm/min que resultaram em uma energia de soldagem de 0,90 KJ/mm. No entanto, a velocidade de alimentação de arame no *DynaFlex-Arc* foi de 10 m/min (1,2 mm). Nota-se uma

² Sem considerar eficiências, apenas parâmetros de médias de corrente, tensão e velocidade de soldagem.

vantagem de 100 % de velocidade de soldagem para o *DynaFlex* no primeiro passe. Considerando que ambas as tecnologias devem aplicar 3 passes para a conclusão da junta, fica evidente o potencial ganho de produtividade.

Além disso, cabe destacar que as soldagens feitas com o MIG/MAG pulsado foram realizadas com o robô antropomórfico RES 7 EngeMOVI e, diferente do *DynaFlex-Arc*, foi necessário alterar os parâmetros de soldagem a partir do segundo passe, devido a ocorrência de escorrimento.

Finalmente, a análise do ciclo térmico resultante do teste, referente ao segundo ensaio do primeiro grupo, procedimento de soldagem mecanizada com um único passe, pior condição devido à DBCP mais baixa de 14 mm, conforme Figura 140, confirmou a segurança deste procedimento quanto ao risco de perfuração do duto. A temperatura máxima na região da parede interna da tubulação (T1) permaneceu abaixo de 400 °C, quando o recomendado pelo PRCI [124] é abaixo de 982 °C.

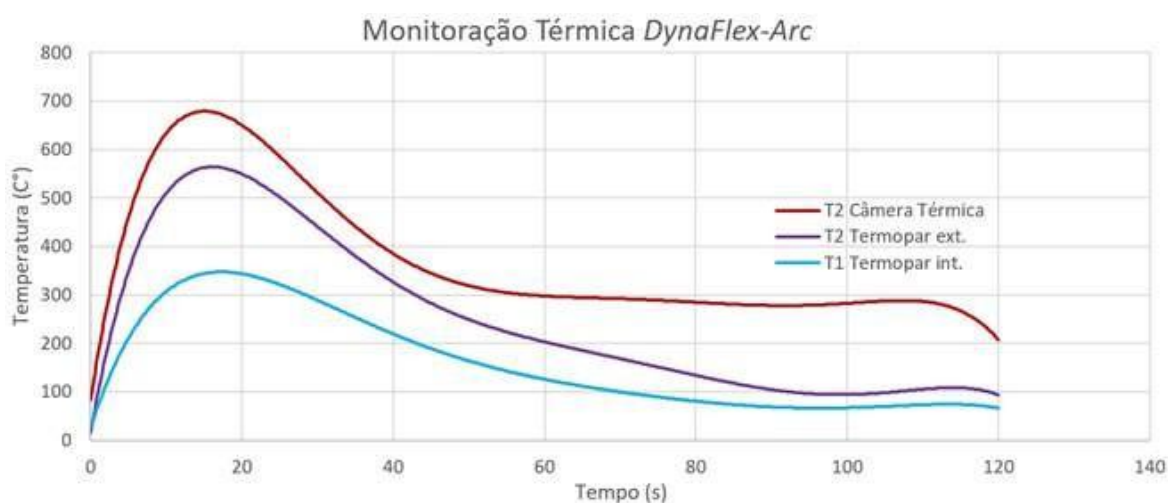


Figura 140 - Sobreposição gráfica dos ciclos térmicos com o *DynaFlex-Arc*, soldagem do 1º grupo de ensaios, com um único passe, mecanizada, $K_s = 100 = K_d = 1$ e DBCP = 14 mm.

Fonte: O autor.

5.6 ESTUDO PROSPECTIVO DA UTILIZAÇÃO DO DYNAFLEX-ARC PARA A SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM INCONEL 625

Em vista da metodologia descrita no Subitem 4.3.2, inicialmente, quanto ao MIG/MAG com transferência globular, conforme Figura 141, é possível observar que, devido às gotas de material de adição fundido serem maiores que o diâmetro do arame, os intervalos longos entre suas ocorrências periódicas de variação de corrente e tensão (baixa frequência de transferência, cerca de 20 Hz), representam fenômenos bem característicos deste tipo de transferência. Além disso, também é possível observar que a transferência ocorre por contato, com característica explosiva da gota, em virtude do surto de corrente frente ao contato prolongado com a poça de fusão.

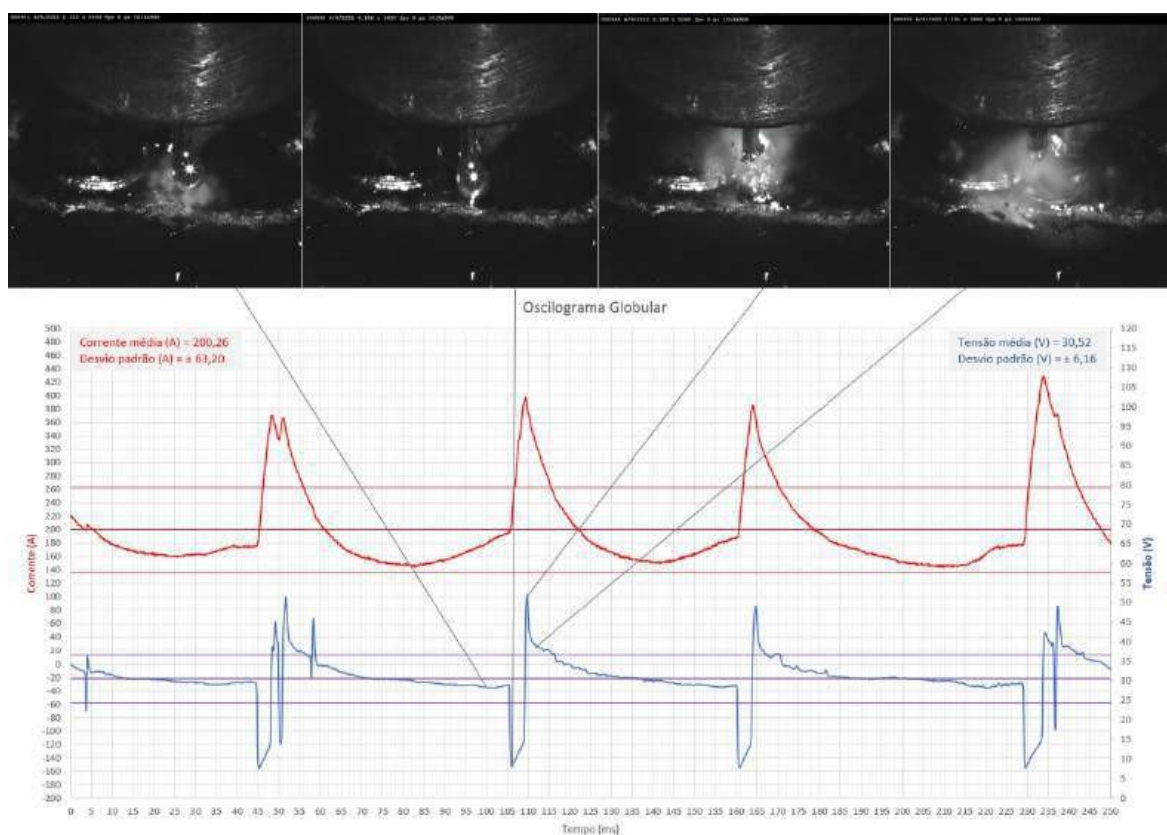


Figura 141 – Oscilograma do processo MIG/MAG globular com contato.
(Vídeo em: <https://youtu.be/pWmAzcHCJZg>). Fonte: O autor.

Na regulagem para *spray*, conforme Figura 142, com maior comprimento de arco, em que é possível observar, conforme esperado para este modo de transferência, ausência de curtos-circuitos e transferências cadenciadas, que se traduzem em variações de tensão de aproximadamente 2 V.

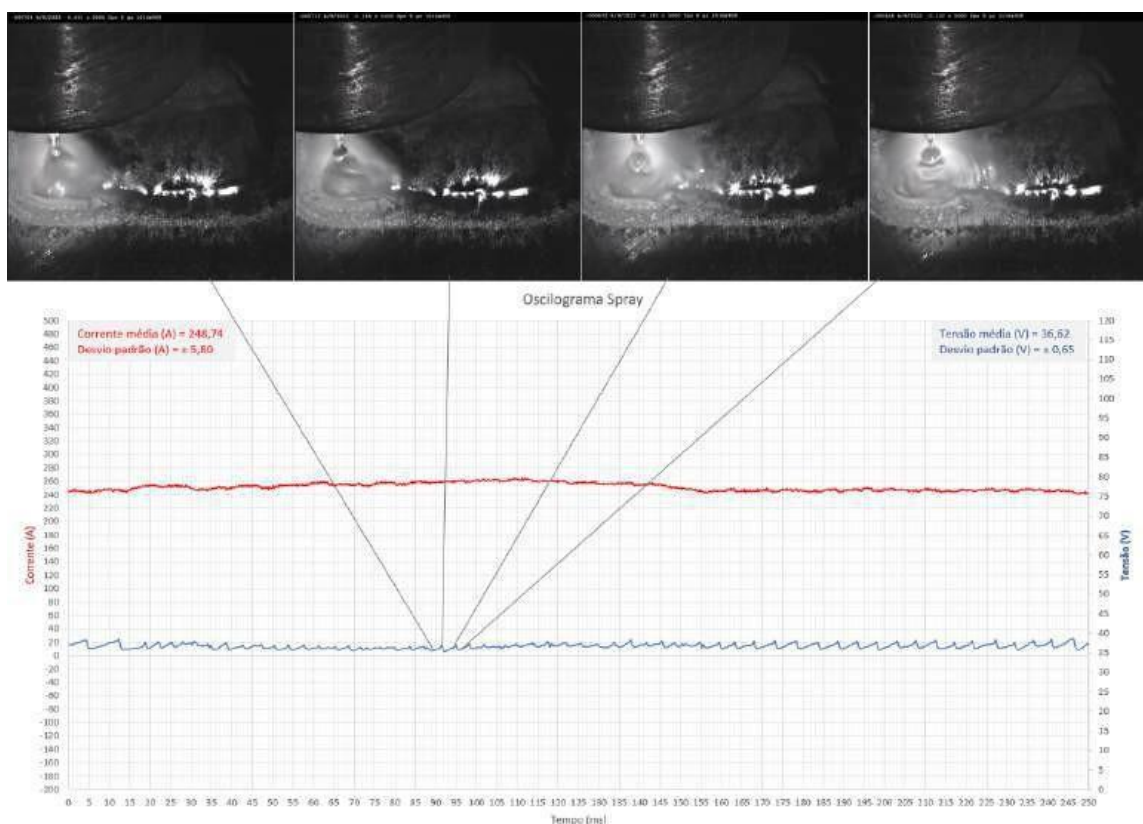


Figura 142 - Oscilograma do processo MIG/MAG *spray*.

(Vídeo em: <https://www.youtube.com/watch?v=93HxEsz8HXw>). Fonte: O autor.

Já no *DynaFlex-Arc*, conforme Figura 143, há ocorrências de curto-circuito, com extinção muito mais rápida (4 a 5 ms para globular e menos de 1 ms para o *DynaFlex*), pois, como era de se esperar, a fonte atua imediatamente sobre a corrente no sentido de manter a transferência em uma condição regular de repetição, sem que ocorram perturbações na poça de fusão a ponto de causarem discontinuidades neste ciclo de atuação. Além destes fenômenos, também é possível observar a formação de um filamento contínuo na ponta do arame, o qual tende a um estreitamento em forma de cone, até ocorrer a projeção de pequenas gotas, menores que o diâmetro do eletrodo, em uma condição com um arco extremamente curto. Contudo, nesta condição, há curtos-circuitos incipientes,

perturbando a transferência metálica, devido, principalmente, à oscilação da tocha, conforme o vídeo referenciado.

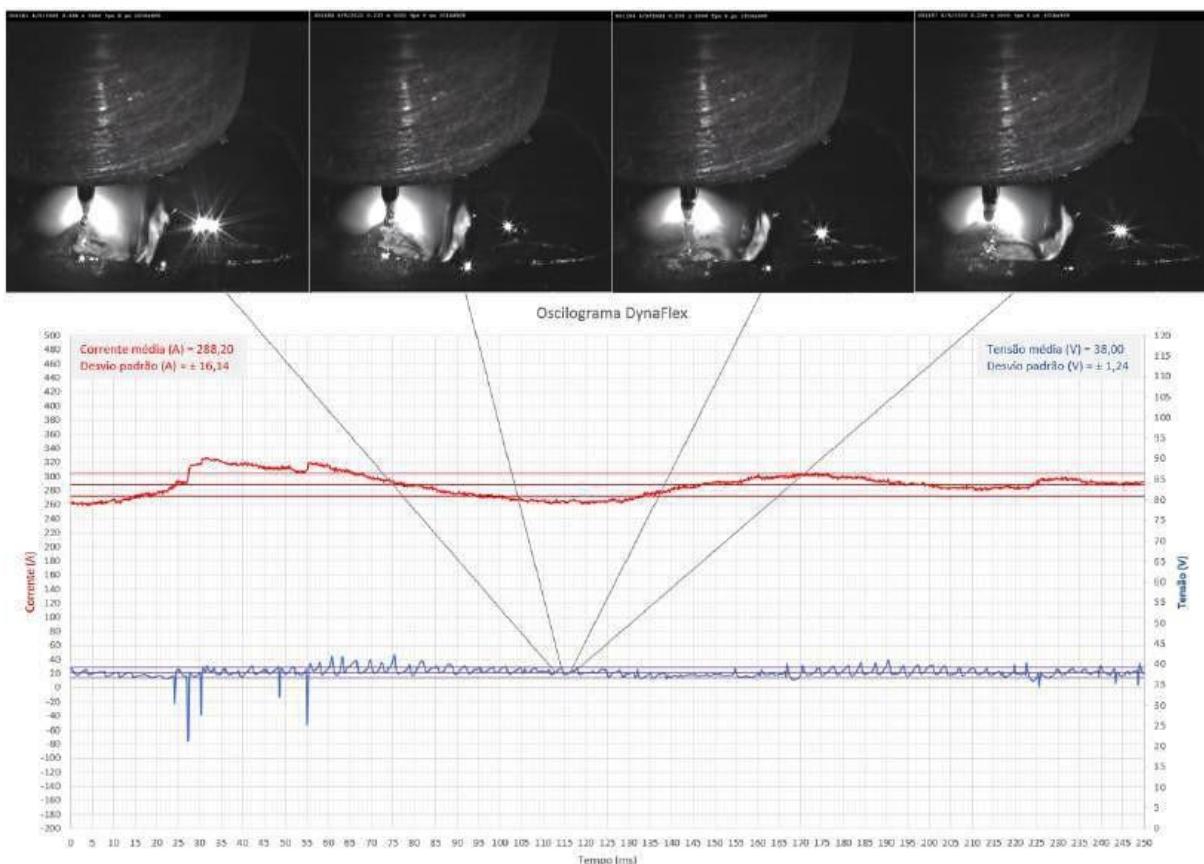


Figura 143 - Oscilograma do processo *DynaFlex-Arc*.
(Vídeo em: youtube.com/watch?v=zuQzESoAwGc). Fonte: O autor.

Os valores dos parâmetros médios aqisitados podem ser observados na Tabela 27.

Tabela 27 - Tensões e correntes médias aqisitadas. Fonte: O autor.

Parâmetros médios	Processos		
	MIG/MAG globular	MIG/MAG <i>spray</i>	<i>DynaFlex-Arc</i>
$U_{\text{méd.}}$ (V)	30,52	36,62	38,00
$I_{\text{méd.}}$ (A)	200,26	248,74	288,20
$P_{\text{méd.}}$ (W)	6.111	9.108	10.951

Diferente de uma condição de alta penetração, como a mostrada por Dutra et al. [7], em que ocorre a formação de uma cratera na poça de fusão promovendo a alta penetração, conforme Figura 144a, no revestimento é possível observar a

formação do cordão com a atuação de um arco curto, conforme Figura 144b, porém atuando praticamente na superfície do material de base devido à frequência de oscilação da tocha e da alta velocidade de soldagem. O fator primordial nesta diferença de resultados é o padrão de movimento da tocha, que, para revestimento, é oscilado com frequência, na ordem de 3 Hz, distribuindo o impacto das gotas, reduzindo o momentum delas [130] e a força do arco, reduzindo sua pressão aparente. Assim como na soldagem MIG AP de união, também na soldagem MIG AP de revestimento o resultado depende de adequada e sistemática compatibilização entre parâmetros elétricos e movimento do arco.

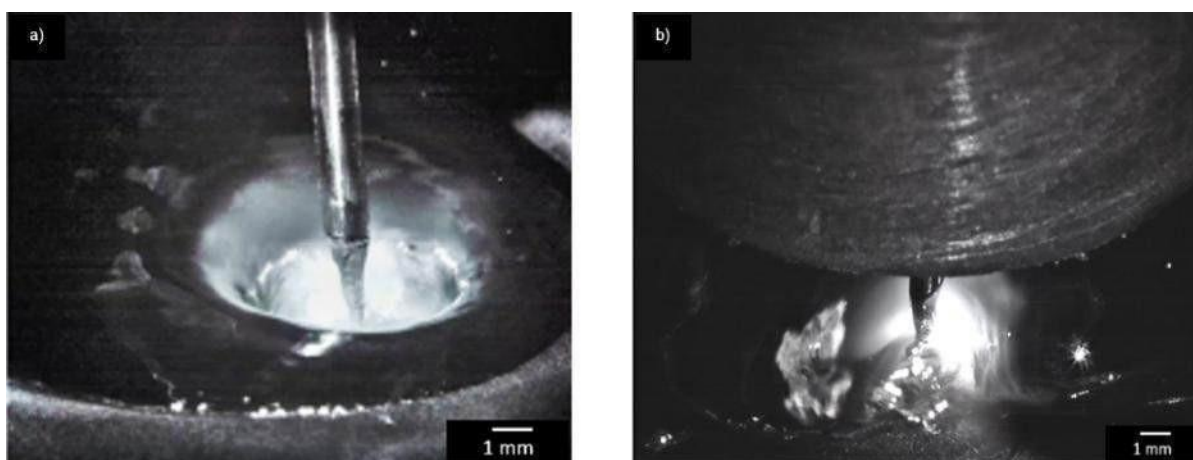


Figura 144 - Diferenças de aplicação do *DynaFlex-Arc*. Fonte: O autor. Em a) Aplicado em alta penetração, com formação de cratera; b) Aplicado em revestimento, sem formação de cratera.

O resultado das soldas realizadas com o MIG/MAG em *spray* e o *DynaFlex-Arc* podem ser observados nas Figura 145 e Figura 146 respectivamente. A principal diferença ficou por conta do espaçamento maior entre as escamas dos cordões executados com o *DynaFlex-Arc*. Devido à redução da frequência de oscilação utilizada para a realização deste revestimento, de 4 Hz para 3 Hz, pois precisou ser menor para eliminar a ocorrência de escorrimento de material, afinal, este processo trabalha com potências maiores, e conseqüentemente com mais pressão do arco que contribui para aumentar a perturbação do metal fundido.

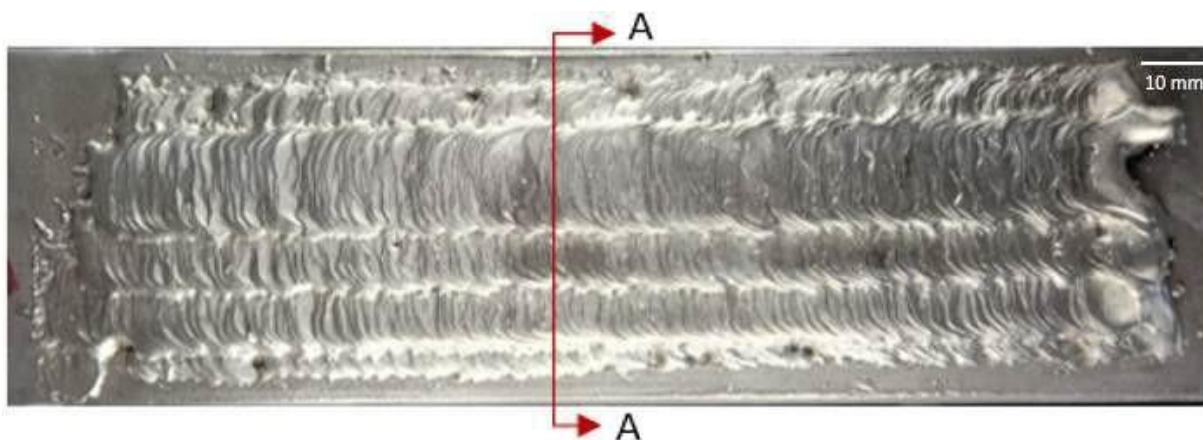


Figura 145 - Aspecto superficial do revestimento feito com o MIG/MAG em *spray*. Fonte: O autor.

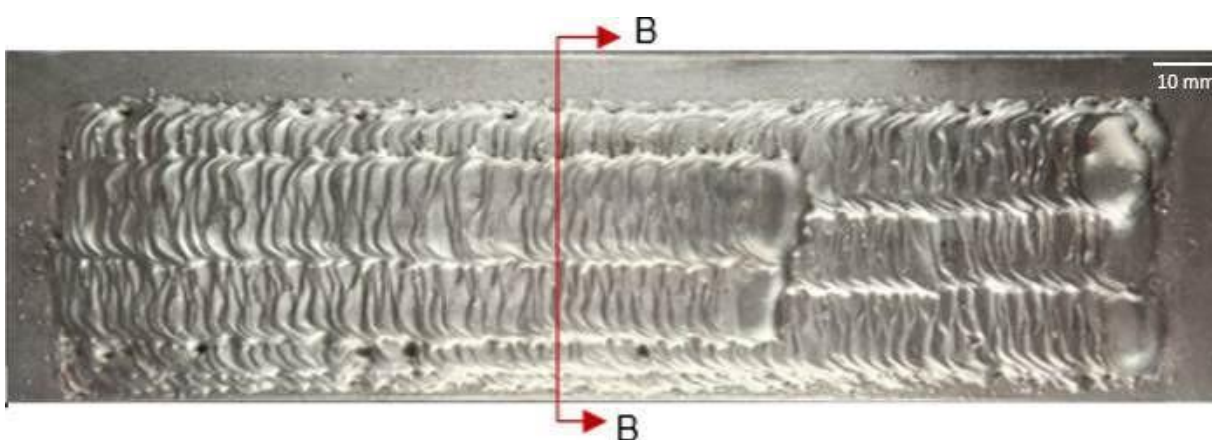


Figura 146 - Aspecto superficial do revestimento feito com o *DynaFlex-Arc*. Fonte: O autor.

A diferença entre as macrografias da seção transversal pode ser observada, quanto ao reforço médio maior registrado pelo processo MIG/MAG em *spray*, conforme Figura 147, e pela penetração média maior registrada pelo processo *DynaFlex*, conforme Figura 148. Este resultado referente à penetração também é influenciado pela potência mais alta que implica em um aquecimento maior do material de base resultando em uma imposição de arame em uma profundidade maior na poça de fusão.

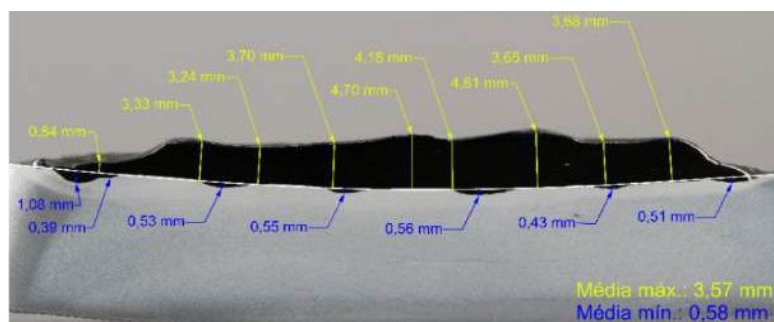


Figura 147 - Macrografias referentes à secção A-A (MIG/MAG, *spray*). Fonte: O autor.

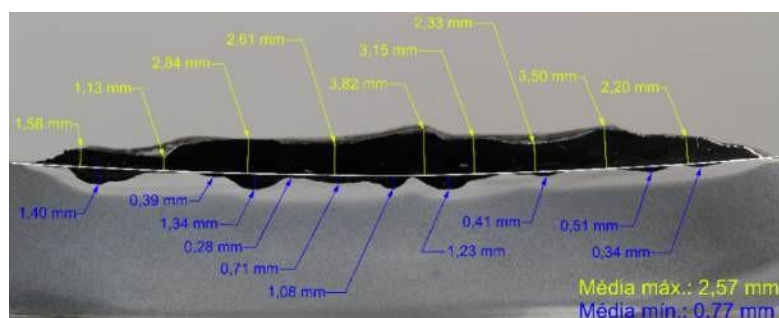


Figura 148 - Macrografias referentes à secção B-B (*DynaFlex-Arc*). Fonte: O autor.

Em última análise, o resultado das medições com o MIG/MAG em *spray* e o *DynaFlex* podem ser conferidas na Tabela 28 e Tabela 29, respectivamente. Não foram notadas vantagens apreciáveis do *DynaFlex* na regulação utilizada, apesar da observada viabilidade de uso do processo. Trabalhos futuros tratarão do estudo e desenvolvimento continuado, direcionado para adaptação e avaliação do *DynaFlex* a revestimentos metálicos.

Tabela 28 - Composição química das soldas com o MIG/MAG em *spray*. Fonte: O autor.

Concentração	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Fe (%)	Nb (%)	Outros (%)
Camada 1	55,00	18,26	7,06	17,18	3,25	<1,00%
Camada 2	65,50	19,21	8,38	2,96	4,43	<1,00%
Camada 3	67,00	18,83	8,91	0,80	3,60	<1,00%

Tabela 29 - Composição química das soldas com o *DynaFlex-Arc*. Fonte: O autor.

Concentração	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Fe (%)	Nb (%)	Outros (%)
Camada 1	47,15	14,25	6,04	30,78	2,56	<1,00%
Camada 2	64,20	18,42	8,47	4,93	3,74	<1,00%
Camada 3	66,00	19,00	8,71	2,04	3,32	<1,00%

6 CONCLUSÕES

O *DynaFlex-Arc* difere do MIG/MAG convencional não apenas por maior dinâmica da fonte, mas também devido a possibilidade de programar valores de K_s diferentes de valores de K_d , os quais irão, conseqüentemente, controlar os efeitos indutivos ao longo do processo. Dessa forma, é possível promover rampas variadas de subida de corrente, com a versatilidade de combiná-las com diferentes rampas de descida de corrente, com o objetivo de evitar ou minimizar as ocorrências de instabilidades do arco durante a soldagem. Além disso, a arquitetura da fonte permite realizar os ajustes de K_s e de K_d de forma independente, também durante a soldagem.

Quanto às soldagens exploratórias de união de chapas espessas de aço nas posições horizontal e sobrecabeça, conforme constatado nos experimentos-base, taxas de subida de corrente na faixa de 70 A/ms, resultantes do uso de um parâmetro de $K_s = 100$, mostraram-se suficientes para impedir a transferência por curto-circuito, preservando a transferência metálica em *spray* em *streaming*. Neste sentido, apesar de os testes terem demonstrado que, quanto maior o valor de K_s , maior será a estabilidade, é possível concluir que, para os parâmetros e condições testadas, mesmo fora de posição, a combinação de faixas de valores de K_s mais altos com faixas de valores de K_d mais baixos, como por exemplo $K_s = 100$ e $K_d = 10$, é capaz de promover uma soldagem estável e produzir uma solda de qualidade.

Nota-se também, pelos vídeos, além do problema resultante da subida muito lenta (já comentada na tese), que a descida de corrente também não pode ser muito lenta, pois senão a corrente se mantém em patamares muito altos por muito tempo, resultando num elevado comprimento de arco por muito tempo, descaracterizando o arco curto do MIG AP.

A diminuição e suavização da faixa de variação de corrente, promovidas pelos efeitos indutivos bem controlados, com destaque para a mitigação da ameaça de surtos de corrente que representam riscos à estabilidade da transferência metálica e para o amortecimento da oscilação da poça após a reignição do arco, constituem um avanço tecnológico nas operações de soldagem em modo de tensão.

Em vista dos estudos e dos resultados apresentados, em oposição ao paradigma da literatura, que recomenda que a soldagem sobrecabeça seja limitada a aplicações com energias baixas, o *DynaFlex-Arc* comprovou a sua viabilidade e eficácia na manutenção de uma transferência em *spray* em *streaming*, com um arco extremamente curto e em uma condição de poça de fusão em forma de cavidade, de maneira estável, que resultaram em uma solda de qualidade. Demonstrando, assim, seus benefícios quanto às taxas de deposição e penetração, também fora de posição.

Logo, conclui-se que os MIG APs podem quebrar o paradigma de que a soldagem MIG/MAG em altas correntes (*spray*) não pode ser usada fora da posição plana devido ao escorrimento. Além disso, estes processos estão mudando conceitos de soldagem de juntas de filete, devido à sua capacidade de alta penetração.

Quanto ao *humping*, as condições de alto desempenho do MIG/MAG (arco enterrado) dependem da tecnologia da fonte de energia de soldagem. A fonte de energia convencional estabiliza o arco com uma potência menor do que a fonte de energia habilitada para *Dynaflex-Arc* permite. Essa limitação da fonte de energia convencional funde o arame na mesma taxa de alimentação (taxa de fusão), mas a uma corrente menor e com maior *stickout* (é necessário mais aquecimento resistivo).

Também conclui-se que, devido à maior pressão do arco na condição do *Dynaflex-Arc*, a formação de *humping* foi observada a velocidades mais baixas do que na condição do MIG/MAG convencional. A poça de solda é mais intensamente "empurrada" para baixo e para trás, resultando em um fluxo mais intenso de metal fundido para a parte traseira da poça alongada, levando a acumulações de massa que solidificam como protuberâncias e são conhecidas como *humping*, um defeito de soldagem.

Quanto às análises realizadas com as ferramentas de histogramas do SAP, estas não foram consideradas eficazes para as análises dos dados resultantes das soldagens realizadas com o *Dynaflex-Arc*. Por se tratar de uma ferramenta desenvolvida para a análise dados resultantes de transferências em curto-circuito, as características das curvas de um processo em *spray* não atenderam às premissas do programa. Contudo, as ferramentas do SAP para a construção de ciclogramas de tensão e corrente mostraram-se eficientes para a análise e comparação quanto à estabilidade de de soldagens realizadas com o *DynaFlex-Arc*.

Quanto ao estudo da viabilidade do *DynaFlex-Arc* para a aplicação de reparo por abraçadeiras soldáveis em dutos API 5L em operação *onshore*, apesar de ser considerado um processo concebido para executar soldagens de alta penetração, características de um processo de arco enterrado (*buried arc*), de fato, o que a variante tem potencial de proporcionar, é o controlabilidade da penetração, de forma a proporcionar soldas com menores penetrações, mas ainda altas, com arcos mais curtos (menor aporte térmico), e seguras quanto ao risco da ocorrência de falhas provocadas por defeitos de *burn through*. O resultado foi um processo de alto desempenho, com melhor penetração e maior velocidade de soldagem quando comparado ao MIG/MAG Pulsado. Além disso, possui vantagens intrínsecas sobre o processo convencional por Eletrodo Revestido, como a realização de soldas com menor teor de hidrogênio, reduzindo assim a ameaça de ocorrências de TIH.

Quanto à exploração da soldagem de revestimento com Inconel 625, a posição vertical de soldagem somada, principalmente, ao movimento oscilatório descendente da tocha, impediu a formação da cratera na poça de fusão e os níveis de penetração registrados em experimentos feitos por Dutra [7], permitindo assim, características de processo adequadas a revestimentos. Assim como nas soldas de união, também em revestimento o resultado obtido depende de uma adequada combinação dos parâmetros elétricos com a configuração de movimento da tocha.

Apesar de o percentual de 2,04% de ferro encontrado na terceira camada da solda realizada pelo *DynaFlex-Arc*, considerado baixo em uma aplicação de revestimento [131], e do acabamento obtido, notou-se ainda uma transferência metálica com perturbações do *streaming*. A movimentação da tocha e, em consequência, do arco e do streaming, promovem diferentes condições para curtos-circuitos incipientes em relação à condição de poça em cratera, indicando que os parâmetros K_s e K_d devem ser estudados para esta condição. Além disso, apesar de a metodologia do trabalho não ter contemplado variação de velocidade de soldagem, a maior velocidade de arame do *Dynaflex* indica claro potencial para aumento de velocidade de soldagem, maior produtividade e menor diluição.

Conclui-se nesta parte do escopo, portanto, que há potencial de aplicação de revestimento com o uso do *DynaFlex* em equipamentos destinados à indústria de petróleo e gás, especialmente em sistemas de produção *offshore*, que são severamente expostos a condições de abrasão e corrosão.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à abrangência deste trabalho e à definição intrínseca do conceito do *DynaFlex-Arc*, que, como o próprio nome sugere, alia a dinâmica da fonte à flexibilidade do arco, algumas considerações são feitas a seguir, no sentido de apontar a possibilidade de avanços nos estudos já realizados e, assim, ampliar o horizonte para o desenvolvimento de novas aplicações para este processo:

- As características de potência do *DynaFlex-Arc* proporcionaram uma maior penetração, apesar de ter um limite de velocidade inferior para a formação de *humping*, com a estabilidade da poça de fusão fornecida pelo controle independente de indutância eletrônica de subida e descida de corrente. Supõe-se que a vantagem de penetração do *DynaFlex-Arc* possa ser ainda maior para aplicações reais com chanfro, e tal comparação será o foco de futuros estudos, sob diferentes condições de soldagem encontradas na indústria offshore;

- Parametrizações sinérgicas: as condições de alto desempenho do MIG/MAG (*DynaFlex-Arc*; arco enterrado) só são alcançadas como resultado da parametrização integrada. O trinômio corrente de soldagem, controle de indutância e velocidade de soldagem deve ser especialmente considerado. Trabalhos futuros terão como foco o desenvolvimento da parametrização do *DynaFlex-Arc* e da configuração geral de soldagem para velocidades mais altas, com o objetivo de gerar parametrizações sinérgicas amplas, para diferentes condições de soldagem;

- Para a soldagem de abraçadeira em dutos, parametrizações orbitais devem envolver parâmetros dinâmicos, com ajustes para as diferentes condições de poça e transferência metálica que se estabelecem nas diferentes posições de soldagem;

- Desenvolvimento de ferramentas estatísticas para análise de dados provenientes de soldagens com o *DynaFlex-Arc*;

- Trabalhos futuros podem agregar no sentido de recategorizar o processo;

- Por fim, com o objetivo de explorar mais os efeitos indutivos controlados pela fonte, fica a sugestão do desenvolvimento de um processo adaptativo, baseado na leitura das variações de tensão ao longo do processo, com um sistema que possa fazer os ajustes necessários nos valores de K_s e K_d , a fim de promover a estabilidade da soldagem *on the fly*. Em consonância, ferramentas de aprendizado de máquina e IA podem ser adotadas para estes fins.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Global Energy Monitor, “<https://globalenergymonitor.org/>,” Dec 2020. [Online]. Available: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-fossil-infrastructure-tracker/summary-tables/>. [Acesso em 18 Jan 2022].
- [2] PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., “N-2163- Soldagem e Trepanação, Tubulações Industriais e Dutos em Operação,” Revisão G, Comissão de Normalização Técnica, 2021.
- [3] R. H. G. Silva, M. B. Schwedersky, C. M. Schaeffer, R. A. Bernardi e A. F. Da Rosa, *Estudo da viabilidade da variante do processo MIG/MAG de alta performance dynaflex-arc na execução manual e mecanizada de reparo por abraçadeiras soldáveis de dutos em operação.*, 2022.
- [4] R. H. G. Silva, D. Galeazzi, M. B. Schwedersky, F. K. Mendonça, A. V. Bonamigo e C. Marques, “An adaptive orbital system based on laser vision sensor for pipeline GMAW welding,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 22 Jun 2021.
- [5] DVS - Deutscher Verband Für Schweissen und Verwandte Verfahren E.V., *Technical Bulletin DVS 0973 - Overview of Process Control Variants for Gas-Shielded Metal-Arc Welding*, Nov 2017.
- [6] R. G. Júnior, *Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG*, Florianópolis: UFSC, 2002.
- [7] J. C. Dutra, R. H. G. Silva, K. C. Riffel e C. Marques, “High-performance GMAW process for deep penetration applications,” *Welding in the World*, pp. 64:999-1009, 24 May 2020.
- [8] J. C. Dutra, R. H. G. Silva, R. A. Bernardi, M. B. Schwedersky, C. Marques e K. C. Riffel, “A new interpretative basis for the high performance GMAW process.,” *Soldagem & Inspeção*, 27 Ago 2021.

- [9] R. H. G. e. Silva, J. C. Dutra, M. B. Schwedersky, C. Marques, C. K. Riffel e R. A. Bernardi, "Dynamically - Flexible Arc - A Novel Interpretation for the High Performance GMAW," *International Ocean and Polar Engineering Conference*, 16-21 June 2019.
- [10] AWS - American Welding Society, *Welding Handbook - Welding Science and Technology*, 9ª ed., vol. 2, 2004, p. 680.
- [11] H. E. Kennedy, "Inert Monatomic Gas Shielded Metal Arc Welding Process". EUA Patente 2.532.410, Oct. 1950.
- [12] A. Lesnewich, "Gas Shielded Arc Welding". EUA Patente 2.859.329, Abril 1958.
- [13] A. Muller, "Method of Arc Welding". EUA Patente 2.504.867, April 1950.
- [14] A. Muller, Plainfield, G. J. Gibson, Somerville, N. E. Anderson e S. Plains, "Electric Arc Welding". EUA Patente 2.504.868, April 1950.
- [15] P. J. Modenesi, *Fontes de Energia para Soldagem a Arco*, D. d. E. M. e. d. Materiais, Ed., Universidade Federal de Minas Gerais , 2009.
- [16] P. Kah, G. O. Edigbe, B. Ndiwe e R. Kubicek, "Assessment of arc stability features for selected gas metal arc welding conditions," *Applied Sciences*, 11 September 2022.
- [17] S. Egerland, "A Contribution to Arc Length Discussion," *Soldagem & Inspeção*, Aug 2015.
- [18] J. C. Dutra, *Ciência e Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico*, Florianópolis : Alfa Centauri, 2023.
- [19] A. Scotti e V. Ponomarev, *Soldagem MIG/MAG*, São Paulo - S.P.: Artliber, 2014.
- [20] M. Amin, "Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding," *Metal Construction* , pp. 272-278, 1983.

- [21] B. Mvola, P. Kah e P. Layus, "Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 4243-4265, 30 November 2018.
- [22] D. Galeazzi, R. H. G. Silva, I. O. Pigozzo, A. F. Rosa, A. S. Pereira e C. Marques, "Analysis of current pulse during short-circuit phase in CMT version of GMAW process under view of additive manufacturing," *Welding in the World*, vol. 66, pp. 1369-1380, 2022.
- [23] J. C. Dutra e R. H. G. Siva, "Thermal-pulsed MIG/MAG welding applied to the repair of cavitation erosion on large-scale hydraulic turbines," *Welding and Cutting*, vol. 8, pp. 27 - 30, 2009.
- [24] J. Huang, T. Chen, D. Huang e T. Xu, "Study on the Effect of PulseWaveform Parameters on Droplet Transition, Dynamic Behavior of Weld Pool, and Weld Microstructure in P-GMAW," *Metals*, vol. 199, nº 13, pp. 1-21, 2023.
- [25] J. Norrish, "Evolution of Advanced Process Control in GMAW: Innovations, Implications, and Application," *Welding Research*, pp. 161-175, june 2024.
- [26] S. R. Barra, *Influência do Processo MIG/MAG Térmico Sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida*, Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2003.
- [27] H. D. Filho, *MIG/MAG CCC - Avanços na tecnologia de controle da transferência metálica como solução para o passe de raiz*, Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- [28] A. M. Quites, *Soldagem MAG de chapas finas: controle adaptativo*, Florianópolis, SC: Universidade de Federal de Santa Catarina, 1989.
- [29] M. Amin, "Synergic pulse MIG welding," *Metal Construction*, pp. 349-353, 13 June 1981.
- [30] B. Mvola, P. Kah, J. Martikainen e H. E, "Applications and benefits of adaptive pulsed GMAW," *Mechanika*, pp. 694-701, 22 12 2013.

- [31] J. C. Dutra, R. G. Junior, R. H. G. Silva e M. A. Oliveira, "PROCESSO DE SOLDAGEM POR CURTO-CIRCUITO CONTROLADO". Brasil Patente PI 0504965-2, 13 Março 2007.
- [32] R. H. G. Silva, D. Galeazzi, M. B. Schwedersky, F. K. Mendonça, A. V. Bonamigo e C. Marques, "An adaptative orbital based on laser vision sensor for pipeline GMAW welding," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 22 June 2021.
- [33] TU Dresden, Institut für Fertigungstechnik / Professur Fügetechnik und Montage, "Steigerung der Wirtschaftlichkeit der MSG-Schweißprozesse durch konsequente Nutzung".
- [34] M. Suban e J. Tusek, "Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used," *Journal of Materials Processing Technology*, Dec 2001.
- [35] J. C. Dutra, "MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito - Fontes de Soldagem versus Gases do Arco," *Soldagem Insp.*, pp. 019-024, Mar 2008.
- [36] V. L. Jorge, R. Gohrs e A. Scotti, "Active power measurement in arc welding and its role in heat transfer to the plate," *Weld World*, 24 April 2017.
- [37] M. Lara, V. V. Díaz, M. Camus e T. V. Da Cunha, "Effect of transverse arc oscillation on morphology, dilution and microstructural aspects of weld beads produced with short-circuiting transfer in GMAW," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 5 Aug 2020.
- [38] C. K. Alexander e M. N. Sadiku, Fundamentos de Circuitos elétricos, 5ª ed., AMGH, 2016, p. 894.
- [39] Y. S. Kim e T. W. EAGAR, "Analysis of metal transfer in gas metal arc welding.," *Welding Journal*, vol. 72, pp. 269s-278s, 1993.
- [40] A. Lesnewich, "CONTROL OF MELTING RATE AND METAL TRANSFER IN GAS-SHIELDED METAL-ARC WELDING PART II-CONTROL OF METAL TRANSFER Axial-spray transfer preferred to globular transfer and to

rotating-spray transfer to assure maximum arc stability and minimum spatter.," *Welding Journal*, vol. 37, pp. 418s - 425s, September 1958.

- [41] IMC - Soldagem, "Manual de Instruções - Fonte de soldagem DIGIPlus A7," IMC, 2015. [Online]. Available: https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/manual_Digiplus%20DC-ACe%20AC3C%20_8aEd.pdf. [Acesso em 25 Out 2023].
- [42] R. H. G. Silva, *SOLDAGEM MIG/MAG EM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO CIRCUITO*, U. F. d. S. C. - U. -, Ed., Florianópolis, S.C., 2005.
- [43] R. H. G. Silva, J. Dutra e R. Gohr, "Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) - Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente.," *Soldagem e Inspeção.*, vol. 13, pp. 070-081, Jan 2008.
- [44] S. I. Poloskov, Y. S. Ishchenko, V. A. Lebedev e O. B. Getskin, "Control of droplet transfer in consumable electrode welding with short circuiting of the arcing gap.," *Welding International* , pp. 873-875, 2001.
- [45] S. K. Choi, S. H. Ko, C. D. Yoo e Y. S. Kim, "Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW Part 2 : Short-Circuit Transfer Mode.," *Welding Journal*, pp. 45s -51s, 1998.
- [46] G. R. B. Ferreira , R. M. M. Filho, A. Scotti e M. L. Lagares Jr. , "Exploring a locus of maximum metal transfer stability of the short-circuiting GMAW process based on the reignition voltage peaks.," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, September 2021.
- [47] O. Liskevych e A. Scotti, "Influence of the CO2 content on operational performance of short-circuit GMAW.," *Weld World*, pp. 217 - 224, 18 October 2015.

- [48] P. Kah, R. Suoranta e J. Martikainen, "Advanced gas metal arc welding process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 655-674, September 2012.
- [49] DVS - Deutscher Verband Für Schweissen und Verwandte Verfahren E.V., "Merkblatt - DVS 0909-1 - Grundlagen des MSG-Hochleistungs-Schweißens mit Massivdrahtelektroden Definitionen und Begriffe," Sep 2000.
- [50] DVS - Deutscher Verband für Schweissen und Verwandte Verfahren E.V., "Merkblatt - DVS 0909-2 - Grundlagen des MSG-Hochleistungsschweißens mit Massivdrahtelektroden - Anwendungstechnische Hinweisen," Jun 2003.
- [51] L. Zhifeng e X. Yimin, "Heat source modeling, penetration analysis and parametric optimization of super spray MAG welding," *Scientific Reports*, 2023.
- [52] K. Kudla, K. Makles e J. Iwaszko, "The Technological, Economic, and Strength Aspects of High-Frequency Buried ArcWelding Using theGMAWRapid HF Process.," *Materials*, 26 March 2025.
- [53] R. H. G. Silva, P. D. Matos, G. C. Zanella e C. M. Schaeffer, "Study of Humping Formation in the Conventional GMAW Process in Comparison to Dynamically Flexible Arc for Offshore Industry," *The International Society of Offshore and Polar Engineers ISOPE*, 19 Jun 2023.
- [54] N. W. Dreveck, L. D. Barbeta, D. Bond e G. O. Verran, "Influence of Push and Pull Techniques on High-Speed Buried-Arc GMAW Process," *Soldagem & Inspeção*, jun 2020.
- [55] D. Galeazzi, *Desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura aditiva por deposição a arco usando a variante GMAW com alimentação dinâmica CMT*, U. F. d. S. Catarina, Ed., Florianópolis, 2024, p. 274.
- [56] V. M. N. Ueta, *UMA PROSPECÇÃO DE VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS COM VISTAS À RECUPERAÇÃO OU AUMENTO DE ESPESSURA DE CHAPAS DE AÇO DE EMBARCAÇÕES*, UFSC, Ed., Florianópolis, SC: Universidade de Santa Catarina, 2025.

- [57] D. Galeazzi, R. H. G. Silva, A. B. Viviani e P. R. Jaeger, "Evaluation of thermal and geometric properties of martensitic stainless steel thin walls built by additive manufacturing cold metal transfer (CMT) process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 2151–2165, 2022.
- [58] E. Craig, "A Unique Mode of GMAW Transfer," *Welding Journal*, Sep 1987.
- [59] A. M. Torbati, R. M. Miranda, L. Quintino, S. Williams e D. Yapp, "Optimization procedures for GMAW of bimetal pipes," *Journal of Materials Processing Technology*, 21 Jan 2011.
- [60] Lincoln Electric, *RapidArc Weld Process Overview*.
- [61] V.B. Rajan, "Essential Welding Variables Final Report 278-T-06," The Lincoln Electric Company, 2011.
- [62] Lincoln Electric, "Rapid X vs RapidArc," [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hMsffWyD9B4>. [Acesso em 24 Jun 2025].
- [63] A. S. Pereira, *Influência e Flexibilidade do Controle Eletromecânico da Transferência Metálica do Processo GMAW-AD*, UFSC, Ed., Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2024.
- [64] A. S. Pereira, D. Galeazzi, R. H. G. Silva e C. Marques, "Analysis of the effect of current pulse in the short-circuit phase on metal transfer in GMAW process with dynamic feeding," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024.
- [65] J. C. Dutra, R. G. Junior, R. H. G. Silva e M. A. Oliveira, "PROCESSO DE SOLDAGEM POR CURTO-CIRCUITO CONTROLADO". República Federativa do Brasil - Instituto Nacional da Propriedade Industrial Patente 0504965-2, 13 Mar 2007.

- [66] J. C. Dutra e R. H. G. Silva, "MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente - Sistemas CCC e STT - Fundamentos," *Soldagem e Insp.*, pp. 092-096, 2008.
- [67] H. D. Filho, R. H. G. Silva e J. C. Dutra, "Comparação do Processo MIG/MAG em Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente (CCC) com o Processo STT na Soldagem de Passes de Raiz de Dutos.," *Informe Conjuntura & Informação*, 2013.
- [68] CLOOS, "Rapid Weld," [Online]. Available: <https://www.cloos.de/de-en/cloos-tv/rapid-weld-thats-what-efficiency-looks-like/>. [Acesso em 16 out 2023].
- [69] CLOOS, "Processes," [Online]. Available: <https://www.cloos.de/de-en/processes/details/rapid-weld/>. [Acesso em 16 Out 2023].
- [70] J. Brabec, S. Jezek, L. Benes, A. Kriz e P. Majrich, "Suitability Confirmation for Welding Ultra-High Strength Steel S1100QL Using RapidWeld Method," *Manufacturing Technology*, Feb 2021.
- [71] Fronius, "Fonius.com," [Online]. Available: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/pcs>. [Acesso em 27 06 2025].
- [72] Fronius, "Youtube," [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=doILyzlJANg>. [Acesso em 27 06 2025].
- [73] Fronius, "Fronius.com," [Online]. Available: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/welding-wiki-en>. [Acesso em 27 06 2025].
- [74] Fronius, *PMC - PULSE MULTI CONTROL - The optimised pulsed arc*, 2021.
- [75] J. Shen, Z. Wang, S. Hu, H. Yang, D. Wu, H. Wang e B. Li, "Robot Welding Process Research of Shield Machine Parts," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 55, Dec 2019.

- [76] “Lorch SpeedArc,” Lorch, Jan 2019. [Online]. Available: <https://www.lorch.eu/downloads-public/technische-datenblaetter/Factsheet-SpeedArc-en.pdf>. [Acesso em 17 Oct 2023].
- [77] W. Wei, X. Jiayang, Z. Zhanhui e Y. Ping, “Comparative study of 316L depositions by two welding current processes,” *Materials and Manufacturing Processes*, 18 Jul 2019.
- [78] W. Leilei, X. Jiayang e W. Qiang, “Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel,” *Materials Science & Engineering A*, 23 Feb 2019.
- [79] LORCH, “SpeedArc and SpeedArc XT,” [Online]. Available: <https://www.lorch.eu/en/solutions/innovations/speed-processes/speedarc-xt>. [Acesso em 22 Jun 2025].
- [80] W. Wu, C. Wen, J. He, Y. Li, W. Xu, P. Yao e W. Zeng, “Effect of Different Welding Modes on Morphology and Property of SS316L Stainless Steel Deposition by Robotic Metal-Inert Gas Welding,” *Materials*, 12 Sep 2024.
- [81] “ForceARC,” EWM, [Online]. Available: <https://schweisstechnik.lu/forcearc.pdf>. [Acesso em 16 Out 2023].
- [82] DIN, “DIN 1910-4:1991-04,” Deutsches Institut für Normung, 1990. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-1910-4/1672930>. [Acesso em 20 Jun 2025].
- [83] DIN, “DIN 1910-4:1979-08,” Deutsches Institut für Normung, [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-1910-4/1846325>. [Acesso em 20 Jun 2025].
- [84] J. Chen, C. Schwenk, C. S. Wu e M. Rethmeier, “Predicting the influence of groove angle on heat transfer and fluid flow for new gas metal arc welding processes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21 Sep 2011.

- [85] M. Dompablo, “New solutions in coldArc and forceArc welding technology,” *Welding International*, Jan 2013.
- [86] EWM, *MIG/MAG Welding Dictionary*, Mündersbach, 2020.
- [87] EWM, *ForceArc puls*, Mündersbach, 2019.
- [88] R. A. Bernardi, K. C. Riffel, L. C. Maia e R. H. G. Silva, “Otimização de Processo MIG de Alta Penetração Utilizando Controle de Indutância,” em *XLIII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem 06 a 09 de Novembro de 2017*, Joinville - SC, Brasil, 2017.
- [89] C. M. Schaeffer, R. H. G. Silva, M. B. Schwedersky, C. Marques, D. Galeazzi e A. B. Viviani, “DynaFlex-Arc – Estudo de sua flexibilidade para aplicação em soldagem de revestimento com Inconel 625,” em *Rio Oil & Gas*, Rio de Janeiro, 2024.
- [90] M. B. Schwedersky, *ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO TIG DUPLO ELETRODO*, U. F. d. S. Catarina, Ed., Florianópolis, SC: UFSC, 2015.
- [91] W. Bao, H. Liu, F. Wang, J. Du, Y. Wang, H. Li e W. Ye, “Keyhole critical failure criteria and variation rule under different thickness and multiple materials in K-TIG welding.,” *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 48-59, Jun 2024.
- [92] S. Yuriko, O. Yosuke e S. Tomokazu, “Process parameters and their effect on metal transfer in gas metal arc welding: a driving force perspective,” *Welding in the World*, 2024.
- [93] H. Baba, H. Komen, T. Igarashi, K. Kadota, T. Era, H. Terasaki e M. Tanaka, “Stabilization of High-Current Buried-Arc Welding Using Large Diameter ϕ 1.6mm Wire by Low-Frequency Modulated Voltage Control,” *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, vol. 39, pp. 75-86, Mar 2021.
- [94] N. W. Dreveck, T. M. D. Borba, O. C. d. M. Filho, H. N. Ferraresi e D. Bond, “Buried Arc Application in Hybrid Laser-Arc Welding of Thermo-Mechanical

Control Process Steels,” *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 14 Dec 2023.

- [95] B. Hayato, T. Era, T. Ueyama e M. Tanaka, “Single pass full penetration joining for heavy plate steel sing high current GMA process,” *Weld World*, 2017.
- [96] B. J. Bradstreet, “Effect of Surface Tension and Metal Flow on Weld Bead Formation,” *Welding Journal*, vol. 47, nº 6, pp. 314 - 322, 1968.
- [97] W. F. Savage, E. F. Nippes e K. Agusa, “Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding: increasing welding speed beyond a critical limit results in weld-bead undercutting and/or humping which are related to arc force and its distribution,” *Welding Research Supplement* , pp. 212 - 224, 1979.
- [98] L. Wang, J. Chen, C. Wu e J. Gao, “Backward flowing molten metal in the weld pool and its influence on humping bead in high-speed GMAW,” *Journal Of Materials Processing Technology*, vol. 237, pp. 342-350.
- [99] A. Gondim, K. C. Riffel, L. C. Maia, M. O. Skowronski, R. A. Bernardi e T. B. M. R. dos Santos, “Relatório - Avaliação dos Efeitos da Indutância e da Corrente Pulsada no Processo MIG Buried Arc,” Labsolda, Florianópolis, 2019.
- [100] J. C. Dutra e R. G. Silva, “MIG/MAG - short-circuit metal transfer - control of the current wave form - fundamentals of the CCC and STT systems,” *Welding International*, pp. 92-96, Mar 2009.
- [101] M. Suban e J. Tusek, “Methods for the determination of arc stability,” *Journal of Materials Processing Technology*, 2003.
- [102] R. H. G. Silva e J. C. Dutra, “Controlled short-circuiting MIG/MAG welding (CCC) - Process analysis tools,” *Welding and Cutting*, vol. 3, nº 8, 2009.
- [103] IMC - Soldagem, *Manual do Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem - SAP*, 2005.

- [104] W. R. Niz, *Influência da Taxa de Subida da Corrente na Regularidade do Processo Mig/Mag por Curto-Circuito*, Goiânia: Universidade Federal do Goiás, 2022.
- [105] D. Souza, M. L. Rossi, F. Keocheguerians, V. C. Nascimento, L. O. Vilarinho e A. Scotti, "Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito," *Soldagem e Inspeção*, vol. 16, pp. 022-032, Jan 2011.
- [106] C. Dumitru, *Avaliação do uso do curto-circuito controlado (CCC) na soldagem de passes de enchimento pelo processo MIG/MAG duplo arame.*, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
- [107] LIU, Wenji; XIAO, Yu; YANG, Jiasheng; ZHU, Pengfei., "Influence factors and control methods of droplet transfer in narrow gap P-GMAW overhead welding position.," *Transactions of the China Welding Institution*, vol. 45, pp. 58-63, 2024.
- [108] E. W. Teichmann, *Desenvolvimento de Processos Alternativos para o Revestimento Interno com Inconel 625 de Tubos API*, U. F. d. S. Catarina, Ed., Florianópolis, SC: UFSC, 2016.
- [109] C. M. Schaeffer, *Adequação do Procedimento de Soldagem por Arco Submerso para Revestimento com o Arame Inconel 625*, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, S.C.: IFSC, 2017.
- [110] T. E. Abiove, D. G. McCartney e A. T. Clare, "Laser Cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 232-240, 2015.
- [111] F. C. A. Madalena, C. P. Alvarães, L. F. G. Souza, J. C. F. Jorge e L. S. Araújo, *Mechanical and Microstructural Properties of the Inconel 625 alloy weld overlay obtained by electroslag welding process*, Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- [112] M. M. Silva, B. A. Araújo, T. M. Maciel e M. A. Santos, "Estudo de revestimento de liga Ni aplicados em aço carbono submetidos a ensaios de

- arrancamento," *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, vol. 10, nº 2, pp. 56-61, 2015.
- [113] R. S. Machado, C. Marques, A. B. Viviani e R. H. G. Silva, "REVESTIMENTO POR SOLDAGEM FORA DE POSIÇÃO EM PAINÉIS DE CALDEIRAS DE TERMOELÉTRICAS -MIG/MAG PULSADO VERSUS CONVENCIONAL," *9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 2017.
- [114] J. C. Dutra, R. H. G. Silva, C. Marques e A. B. Viviani, "A new approach for MIG/MAG cladding with Inconel 625," *Weld World*, pp. 1201-1209, 26 Jul 2016.
- [115] R. S. Carvalho, M. Kindermann, J. C. Dutra e N. G. Bonacorso, "ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE TECIMENTO NAS CARACTERÍSTICAS DOS CORDÕES EM OPERAÇÕES DE REVESTIMENTO DE MODO AUTOMATIZADO," *6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 11 Apr 2011.
- [116] E. Craig, "A Unique Mode of GMAW Transfer," *Welding Journal*, pp. 51-55, Sep 1987.
- [117] J. C. Dutra, *Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na soldagem MIG/MAG*, Florianópolis, S.C.: UFSC, 1989.
- [118] LABSOLDA / GRANTE / PETROBRAS, "LABSOLDA, projetos realizados.," LABSOLDA, 23 Outubro 2024. [Online]. Available: <https://labsolda.ufsc.br/projetos/realizados/888-processos-de-reparos-alternativos-soldagem-em-operacao-de-abracadeiras-aparafusadas-e-bujao-capote>. [Acesso em 25 Agosto 2025].
- [119] T. C. Nguyen, D. C. Weckman, D. A. Johnson e H. W. Kerr, "High speed fusion weld bead defects," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, 6 Jul 2006.

- [120] Z. Hongjie, H. Tao, W. Yong e W. Qian, "Effects of fillet weld size and sleeve material strength on the residual stress distribution and structural safety while implementing the new sleeve repair process," *Materials*, 05 Dez 2021.
- [121] ASME, *PCC-2- POST CONSTRUCTION CODE*, New York, NY, 2018.
- [122] ASME, "B31.3 - Process Piping," New York, NY, 2014.
- [123] ISO, *5817 - Welding - Fusion welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections*, International Standard, 2003.
- [124] Pipeline Research Council International - PRCI - , "Final Report, Project Number R 2269-01R," Arlington, Virginia, 2006.
- [125] L. Zhang, Z. Guo, W. Zhou, G. Gl e B. HAN, "Effect of welding speed and welding current on humping bead of vertical high-speed GMAW," *Transactions of the China Welding Institution*, Abr 2020.
- [126] R. H. G. Silva, L. E. d. S. Paes, R. C. Barbosa, F. Sartori e M. B. Schwedersky, "Assessing the effects of solid wire electrode extension (stick out) increase in MIG/MAG welding.," *Journal of the Brazillian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018.
- [127] T. C. Nguyen, "The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding," *Science And Technology Of Welding And Joining*, vol. 10, nº 4, pp. 447 - 459, 2005.
- [128] G. Goett, R. Kozakov e D. Uhrlandt, "Emissivity and temperature determination on steel above the melting point.," *Weld World*, pp. 595 - 602, 2013.
- [129] R. R. Nogueira, *Avaliação da técnica de aquecimento indutivo aplicada à soldagem de dutos em operação utilizando o processo MIG/MAG*, UFSC, Ed., Florianópolis, S.C., 2021.

- [130] A. Scotti e C. E. A. L. Rodrigues, "Determination of the Momentum of Droplets Impinging on the Pool during Aluminium GMAW," *Soldagem Insp.*, vol. 14, pp. 336-343, Dez 2009.
- [131] American Petroleum Institute, *API 6A - Specification for Wellhead and Tree Equipment*, 2004.
- [132] M. Elham, M. B. Seyer, A. Omran e A. M. Hasan, "Analysis of liquid pipelines accidents causes, consequences, and contributing factors: A review study," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, n° (2021) 21:348–362, 02 Jan 2021.
- [133] Fox M. R; Lamm A. V., "Keystone Pipeline Rupture Investigation," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, pp. 21:738-746, 27 Mar 2021.
- [134] J. Tiratsoo, P. Hopkins e R. King, *Managing Pipeline Threats: Principles and methods of pipeline protection and safety assurance*, Houston, TX: Clarion Technical Conferences LLC, 2020.
- [135] TRANSPETRO, "<https://www.roubonosdutos.com.br/>," [Online]. Available: https://www.roubonosdutos.com.br/?gclid=Cj0KCQiAqbyNBhC2ARIsALDwAsCM61nJIIS57Rxm28SLdsXhw4p-SOQojc8EMhr-CfQrIQZHxnvoFZsaAllUEALw_wcB. [Acesso em 07 dez 2021].
- [136] PETROBRAS, "<https://petrobras.com.br/>," 07 jun 2019. [Online]. Available: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/lancamos-programa-para-prevenir-furto-em-oleodutos.htm>. [Acesso em 07 dez 2021].
- [137] C. Pengchao, L. Rui, F. Kuan e Z. Xiaoming, "Research and method for in-line inspection technology of girth weld in long-distance oil and gas pipeline," *Journal of Physics*, 2021.
- [138] PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A, "N-2098- Inspeção de Dutos Terrestres em Operação," Revisão F, 2014.

- [139] PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., “N-2786- Avaliação de Defeitos em Oleodutos e Gasodutos Terrestres e Submarinos Rígidos em Operação.,” Revisão B, Comissão de Normalização Técnica, 2019.
- [140] M. V. Biezma, M. A. Andrés, D. Agudo e E. Briz, “Most fatal oil & pipeline accidents through history: A lessons learned approach,” nº 110 (2020) 104446, 2020.
- [141] S. Zangeneh, “Fitness-For-Service Assessment and Failure Analysis of Hydrogen-Induced Cracking in a Pipeline Steel,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, p. (2021) 21:1875–1887, 24 Set 2021.
- [142] Al-Taie, Ihsan; Murray, Alan; Gray, Malcolm J; O’Brien, Jhon; Knauf, Gerhard; Santos, Bill; Lu, Minxu; Zhou, Joe;, *Oil and Gas Pipelines - Integrity and Safety Handbook*, R. W. Revie, Ed., Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [143] K. C. Riffel, *Análise e desenvolvimento de técnicas inovadoras para a soldagem in-service*, UFSC, Ed., Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina , 2019.
- [144] API Standard 1104, “Welding Pipeline and Related Facilities,” 9th Edition, 1999.
- [145] G. Dalpiaz, *Manutenção de dutos/tubulações - Soldagem em operação*, CENPES/PDISO/TMC, 2016.
- [146] J. J. Oliveira, *Análise e reparo de dutos corroídos - Um estudo de caso para reparo por dupla calha*, P. U. Católica, Ed., Rio de Janeiro , 2016.
- [147] W. Qian, H. Tao, W. Hongtao, X. Shihang, L. Yuxin e W. Yong, “Burn-through prediction during in-service welding based on residual strength and high-temperature plastic failure criterion,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 15 Dez 2020.
- [148] D. Bourgeois e B. Alexandrov, “Hydrogen-assisted cracking fracture analysis using high-speed camera and delayed hydrogen cracking test,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 13 Jan 2022.

- [149] J. C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. , 2015 .
- [150] P. Gong, A. Turk, J. Nutter, F. Yu, B. Wynne, P. del Castillo e M. Rainforth, “Hydrogen embrittlement mechanisms in advanced high strength steel,” *Acta Materialia*, 16 Nov 2021.
- [151] American Welding Society - AWS, “D1.1/D1.1M, Structural Welding Code - Steel,” Miami, FL, 2006.
- [152] A. Kromm, T. Lausch, D. Schroepfer, M. Rhode e T. Kannengiesser, “Influence of welding stresses on relief cracking during heat treatment of a creep-resistant 13 CrMoV steel,” *Welding in the World*, pp. 819-829, 12 Março 2020.
- [153] T. Han, L. Han , Q. Wu, S. Xu, J. Sun e Y. Wang, “Analysis of the dynamic evolution behavior of radial deformation and cracks during in-service welding instability based on experiments,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 206, October 2023.
- [154] ASME, *Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code.*, New York, NY, 2015.
- [155] PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. , “N-2737- Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre,” Revisão B, Rio de Janeiro, 2014.
- [156] PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., “N-2726- Terminologia de Dutos,” Revisão B., Comissão de Normalização Técnica, 2017.
- [157] B. h. Jong, J. C. Yun, K. J. Ik, Y. S. Jung, K. M. Cheol e K. P. Young, “Influence of welding processes and weld configuration fatigue failure of natural gas branch pipe,” *International Journal of Pipe Vessels and Piping*, 5 Jun 2021.

APÊNDICE A – ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA FONTE IMC QUE VIABILIZAM A VARIANTE DYNAFLEX-ARC

Em termos de processo, esta flexibilidade do arco em atuar em uma condição extremamente crítica, frente à ameaça constante de ocorrência de curtos-circuitos, é possível graças à dinâmica da fonte transistorizada de soldagem IMC [41, 6] que age prontamente antes que ocorram eventos de instabilidade, ou, caso ocorram, consegue restabelecer rapidamente a condição de trabalho antes que a transferência metálica do regime seja descaracterizada. Esta dinâmica, associada à possibilidade de ajustar a intensidade do efeito indutivo³, que irá controlar as taxas de variação tanto de subida quanto de descida da corrente (di/dt), com a vantagem de combinar valores diferentes entre si, viabiliza a aplicação deste processo de soldagem em diversas condições.

Assim, o ajuste do efeito indutivo é promovido a partir de valores virtuais de indutância de subida (L_s) e de valores virtuais de indutância de descida (L_d), que são definidos pela indutância de referência (L_r) de entrada do *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT) e pelos valores de entrada do divisor de subida (K_s) e do divisor de descida (K_d), conforme equações (1) e (2).

$$L_s = \frac{L_r}{K_s} (H) \quad (1)$$

$$L_d = \frac{L_r}{K_d} (H) \quad (2)$$

Desta forma, os valores de K_s e K_d podem ser programados pelo operador da fonte em uma escala adimensional que vai de 1 a 600, com resolução de 1 unidade, e, assim, alterar a frequência de chaveamento do IGBT com o objetivo de emular a atuação de diferentes L_s e L_d , considerando uma indutância nominal de referência (L) de 0,02 H, conforme Figura 149. Além disso, graças a este recurso, também é possível ajustar a intensidade do efeito indutivo em tempo real [6].

³ De acordo com Dutra [35], convencionou-se a utilização do termo “indutância” quando o fenômeno se refere a fontes convencionais, e do termo “efeito indutivo” quando se refere a fontes transistorizadas.

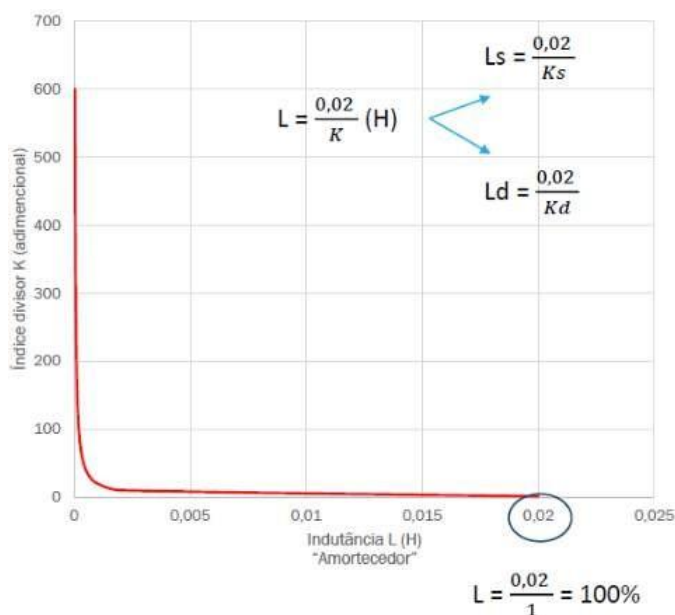


Figura 149 - Comportamento da curva do gráfico das Equações de L_s e L_d .

Um exemplo de parte de um diagrama elétrico, com aplicação em soldagem, baseado na lógica descrita acima pode ser observado na Figura 150.

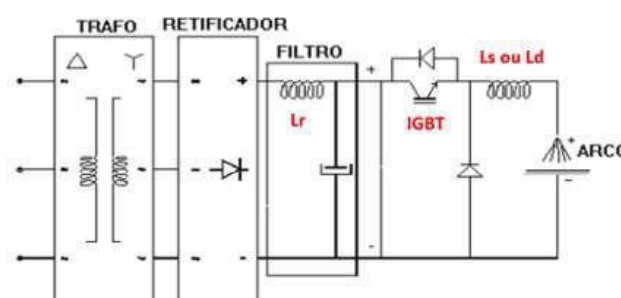


Figura 150 - Parte de um diagrama elétrico com controle de indutância via IGBT. [41].

A atuação de diferentes efeitos indutivos de subida e de descida podem ser verificados, conforme experimento realizado por Dutra et al. [7], onde foi simulado um curto-circuito em uma bancada, com um ajuste de $K_s = 100$ e $K_d = 1$, que promoveram diferentes L_s e L_d , resultando em um di/dt de subida de 70 A/ms e um di/dt de descida de 0,3 A/ms. Assim, foi possível demonstrar a atuação da fonte em uma condição de curto-circuito, além do comportamento da curva de corrente, controlada por diferentes valores de di/dt em um único evento de instabilidade, conforme Figura 151. Assim, é possível observar, diante de um curto-circuito (queda de tensão), a subida rápida da corrente, e, após o desfazimento do curto, o seu retorno lento para o regime de trabalho.

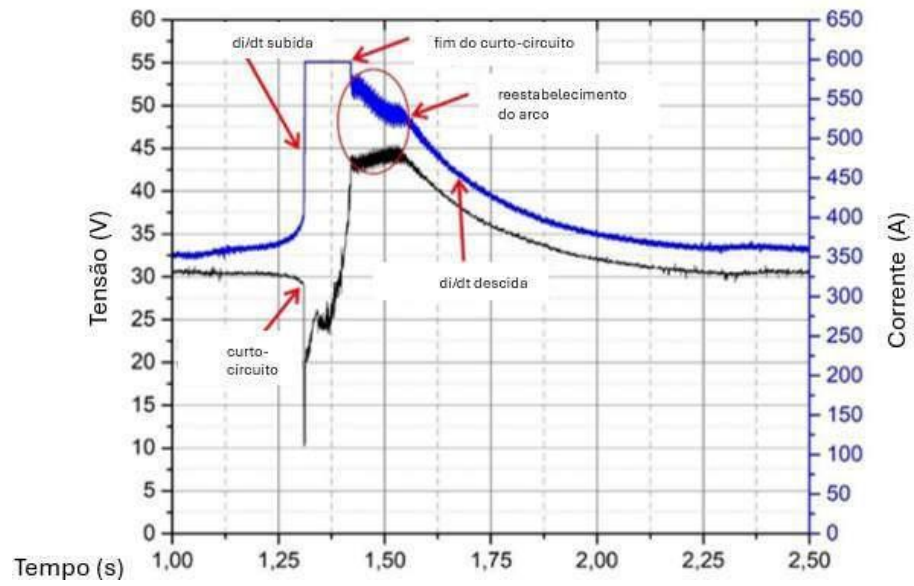


Figura 151 - Gráfico demonstrando os efeitos na curva de corrente causados por diferentes L_s e L_d [7].

ANEXO A - DVS MEDIA PROCESS CONTROL VARIANTS FOR GMAW



PROCESS CONTROL VARIANTS FOR GMAW

Gas-shielded metal arc welding (GMAW) is the most frequently used arc welding method. The welding equipment currently on the market is predominantly digitally controlled and programmable. It permits new process variants with specifically adjusted technological characteristics. New terms and names are being coined, and used in a company-specific way. The purpose of this poster is to help users to orient themselves when it comes to the various process control variants for GMAW.

classification acc. to the technical bulletin DVS 0973

Designation	Manufacturer	Controlled short arc	1) Controlled short arc	2) Low-spatter short arc	3) Energy-reduced short arc	4) High-performance short arc	5) Modified spray arc	6) Pulsed arc	7) Modified pulsed arc	8) Alternating current process	9) Combined process variant	10) Cyclic wire movement
ColdWeld	Ocos	x								x		
ControlWeld	Ocos	x	x									
RapidWeld	Ocos						x					
coldArc	EMM	x	x	x								
forceArc	EMM						x					
noArc	EMM	x	x	x								
CMT Advanced	Fronius	x	x	x	x				x	x	x	
CMT (Cold Metal Transfer)	Fronius	x	x	x	x							x
CMT Pulse	Fronius	x	x					x		x	x	
LSC (Low Spatter Control) / LSC Advanced	Fronius		x	x	x							
PCS (Pulse Controlled Spray Arc)	Fronius						x					
PMIC (Pulse/Mode Control)	Fronius							x				
WaveArc	Kemppi	x	x									
WaveThin	Kemppi	x		x								
InsuArc	Kjellberg	x	x		x	x						
SpeedArc	Lorch	x					x					
SpeedGald	Lorch	x	x	x								
SpeedPulse	Lorch						x	x				
SpeedFlex	Lorch	x	x									
SpeedUp	Lorch	x					x	x		x	x	
ColdMIG	Merko	x	x	x								
DeepARC	Merko						x					
HighHP	Merko	x						x			x	
ProSMITH	Merko											x
SSA (SpeedShurArc)	Oerlikon	x	x	x	x							
FOCUSARC	Rehm	x		x			x					
FOCUSPLUS	Rehm								x			
POWERARC	Rehm	x		x								

classification by the manufacturer

GMA (Cold MIG/MAG Arc)	DMSE / ESS	x	x	x								
HC MAG (Hot Controlled MIG/MAG)	DMSE / ESS	x	x	x					x			
PowerPulse	DMSE / ESS							x				x
DMT (Digital MIG/MAG Technology)	DMSE / ESS						x					
coldArc pulse	EMM							x				
forceArc pulse	EMM								x			
noArc pulse	EMM							x				
HypoSitArc	EMM	x	x		x							
Superpulse	EMM											x
Advanced SoftArc (ASD)	Oerlikon									x		
Cold Double Pulse (CDP)	Oerlikon							x			x	
HPS (High Penetration Speed)	Oerlikon						x					
SoftArc	Oerlikon									x		
Soft Silence Pulse (SSP)	Oerlikon							x	x			
Spray Model	Oerlikon									x		

Technological allocation

The GMAW process control variants essentially belong to gas-shielded metal arc welding (13 - inert-gas metal arc welding (MG, 131) / active-gas metal arc welding (MAG, 135). Electronically controlled GMAW process variants can also be categorized into the familiar arc types of short arc, mixed arc, spray arc and pulsed arc. Unlike classic GMAW, GMAW process control variants specifically alter the characteristics in order to deliver specific benefits.

Process window

The process variants extend the possible process window for GMAW (red areas).

- Controlled/modified short arc**
With controlled short-arc processes, the equipment electronics detect both the short circuit and the arc phase and balance them separately. This can even be split into several temporal sectors (intervals) (sector-based control).
- Low-spatter short arc**
With these types of controlled short-arc processes, control measures ensure that the current is below a specific critical value at the time of re-ignition of the arc (conclusion of the short-circuit phase).
- Energy-reduced short arc**
This type of controlled short-arc process is specially parameterised for low energy input. Low-energy short-arc processes aim to either have a low energy consumption during welding or to keep the heat input into the workpiece low.
- High-performance short arc**
The deposition rate of the short-arc process can be increased through process control by shifting the transition to the mixed arc to higher wire feed rates. Compared with the mixed arc, the short arc introduces less energy into the workpiece and requires less dressing (spatter). The desired behaviour is achieved through special current shaping during the short-circuit and arc phases.
- Modified spray arc**
The focused arc and the shortened metal transfer of the modified spray arc results in a higher energy density and a higher arc pressure deep into the melt pool. This is an advantage when welding adjusted joint geometries (e.g. narrow gaps and small weld preparation angles).
- Pulsed arc**
The welding power source periodically switches to a higher impulse current that allows for a selective and well controllable metal transfer, while the background current exclusively takes care of ionizing the arc zone and heating the end of the electrode as well as the

surface of the base material. Through the current impulses a metal transfer in sync with the pulse frequency is achieved. Based on the controlled droplet transfer with a defined droplet volume, the filler material can be supplied specifically.

7. Modified pulsed arc
Controlled pulsed arc processes have more parameters, which generally require control on the basis of synergy characteristics. The variety of pulsed arc parameters in possible combination with other effects, control strategies and arc types produces a wide range of options for modifying the pulsed arc with a view to optimizing specific process characteristics.

8. Alternating current processes
Controlled changing of the polarity using additional power electronics during certain phases of the welding process adds another degree of freedom to the process control. Benefits primarily result from good bridging characteristics and in applications with low energy introduction and dilution.

9. Combined process variants
Modifications to process control in the timing of each individual metal transfer are no longer visible to the naked eye, the arc shape appears "averaged" to the human eye as a special shape with specific characteristics. The same applies to the heat conduction, the energy input, the penetration profile, the weld surface (e.g. weld ripples). Combined process variants break through this perception and effect, by enabling the timing of these effects to be resolved. By doing so they in turn achieve special new characteristics.

10. Cyclic wire movement
Cyclic modification of the wire feed rate can already be a feature of combined process variants if the individual process variants have different wire feed rates. This increases the demands placed on the wire feed system. Process variants that cyclically change the direction of the wire feed place even higher demands on the wire feed system.

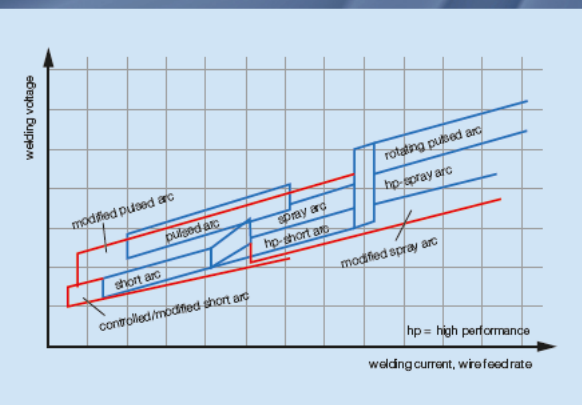


Figura 152 - Poster com as familias de variantes do processo MIG/MAG HP [5].