



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Álison Fernandes da Rosa

Processo *Stud Welding*: Caracterização e Experimentação

Florianópolis
2025

Álison Fernandes da Rosa

Processo *Stud Welding*: Caracterização e Experimentação

Tese 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

2025

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

Rosa, Álisson Fernandes da
Processo Stud Welding : Caracterização e Experimentação /
Álisson Fernandes da Rosa ; orientador, Régis Henrique
Gonçalves e Silva, coorientador, Mateus Barancelli
Schwedersky, 2025.
205 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Stud Welding. 3. Drawn-Arc.
4. Arco retraído. 5. Soldagem de Pinos. 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.

Álison Fernandes da Rosa

Processo *Stud Welding*: Caracterização e Experimentação

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 27 de janeiro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Hélio de Miranda, Dr. Eng.

Universidade Federal do Ceará

Prof. Cristiano José Scheuer, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Fábio Antônio Xavier, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

Clóvis Ribeiro Rodrigues, Dr. Eng.

Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A

Ricardo Reppold Marinho, Me. Eng.

Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A

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, 2025

*Dedico este trabalho a todos os brasileiros que contribuem
na forma de tributos para financiar a educação e a
pesquisa brasileira. Que a ciência seja valorizada e retribua
àqueles que a tornam possível.*

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente, à minha esposa, Luiza, cuja presença é um farol de luz e alegria. Sua generosidade, paciência e amor incondicional tornaram esta jornada mais leve, mesmo nos momentos de maior desafio. Sua capacidade de inspirar aqueles ao seu redor, com sua energia contagiante e seu coração acolhedor, fez com que cada obstáculo da minha vida parecesse menor. Sou imensamente grato por sua companhia, por seu apoio irrestrito e por ser, em todos os sentidos, meu porto seguro.
- Às minhas pequenas e fiéis companheiras, Meg e Nina, sou grato por tornarem os momentos durante a pós-graduação mais divertidos e por me lembrarem, diariamente, da beleza das pequenas alegrias da vida.
- Aos meus pais e irmãos, que mesmo de longe, sempre foram um refúgio de amparo. Estar distante da convivência diária com minha família foi um desafio adicional, mas os reencontros breves, as viagens esporádicas e as incontáveis videochamadas trouxeram alento e reforçaram os laços que nos unem.
- Aos meus orientadores, que souberam equilibrar desafios e incentivos, ajudando-me a crescer como pesquisador. Seus ensinamentos foram fundamentais para a realização deste trabalho.
- À CAPES pelo fornecimento de bolsa de estudos e à Petrobras pelo financiamento do projeto “*Stud*”, sob o número de processo 2020/00232-2.
- Aos amigos e colegas de dentro e de fora do laboratório, pelas conversas e momentos de descontração que foram essenciais para manter minha motivação e sanidade ao longo dessa trajetória.
- Aos amigos, Professor Fernando Borges e Doutora Carmem Pereira, pelo amplo suporte e incentivo durante a minha vida acadêmica.

*"Do or do not. There is no try." (Yoda, In: Star Wars: Episode V -
The Empire Strikes Back, 1980)*

RESUMO

O processo de Soldagem de Pinos por Arco Retraído (*Drawn-Arc Stud Welding*) consiste na fixação de um pino metálico à superfície de uma peça por meio de uma pistola de soldagem, onde um arco elétrico é gerado para fundir os materiais e promover a união por coalescência. Após a fusão, o pino é pressionado contra a peça, formando a junta em tempos inferiores a um segundo. A qualidade da solda depende de variáveis técnicas essenciais, como corrente elétrica, tempo de arco, parâmetros de movimento do pino e métodos de proteção (gás ou anel cerâmico), que influenciam diretamente a integridade da junta. Este trabalho tem como objetivo consolidar uma base técnica nacional para a Soldagem de Pinos fornecendo subsídios para a continuidade das pesquisas e aplicações industriais. Foram testadas e caracterizadas tecnologias de controle de corrente, demonstrando que fontes transistorizadas oferecem maior estabilidade dos sinais elétricos em comparação às fontes tiristorizadas. Além disso, verificou-se que a tensão de soldagem aumenta com o parâmetro de recuo do pino, especialmente com o uso do anel cerâmico, destacando a necessidade de ajustes adequados nesses parâmetros. A geometria das pontas dos pinos teve influência significativa na ignição do arco e na formação do colar de fusão. A ponta esférica de alumínio mostrou-se mais eficiente, facilitando a ignição e proporcionando colares uniformes. A ponta cônica exigiu maior energia devido ao volume de fusão maior, enquanto um pino sem ponta alguma (superfície plana) se mostrou inadequada, gerando instabilidade e curtos-circuitos. Nos testes com meios de proteção distintos, o argônio garantiu maior estabilidade, enquanto o CO₂ favoreceu a penetração, mas com instabilidade. O anel cerâmico revelou-se uma alternativa eficaz para proteção da poça de fusão, mas resultou em tensões de arco mais elevadas. A soldagem assistida por campo magnético demonstrou potencial para controle térmico, resultando em menor temperatura no verso da chapa, mas em correntes elevadas na bobina do bocal, a rotação do arco induzida pelo campo magnético comprometeu a estabilidade da solda. A análise dos sistemas de movimentação do pino indicou que os sistemas eletromecânicos com mola e eletroímã apresentaram maior estabilidade no sinal do movimento, enquanto os motorizados foram mais

suscetíveis a oscilações no controle PID, impactando a potência média do processo. Embora tenham sido alcançados avanços significativos na compreensão das variáveis do *Stud Welding*, este estudo tem caráter exploratório. Os resultados obtidos fornecem um ponto de partida para futuras pesquisas, incentivando o desenvolvimento de novas metodologias e aprimoramentos no processo, visando sua melhoria e aumentando sua relevância na indústria.

Palavras-Chave: *Stud Welding*; *Drawn-Arc*; Arco retraído; Soldagem de Pinos

ABSTRACT

The Drawn-Arc Stud Welding process consists of attaching a metallic stud to the surface of a workpiece using a welding gun, where an electric arc is generated to melt the materials and promote fusion by coalescence. After melting, the stud is pressed against the workpiece, forming the joint in less than one second. The weld quality depends on essential technical variables, such as electric current, arc time, stud movement parameters, and protection methods (gas or ceramic ferrule), which directly influence the integrity of the joint. This study aims to develop a national technical framework for Stud Welding, providing support for continued research and industrial applications. Current control technologies were tested and characterized, demonstrating that transistorized power sources offer greater stability in electrical signals compared to thyristor-based sources. Additionally, it was observed that welding voltage increases with the stud lift parameter, especially when using a ceramic ferrule, highlighting the importance of proper parameter adjustments. The geometry of the stud tip significantly influenced arc ignition and weld collar formation. The spherical aluminum tip proved to be the most efficient, facilitating arc ignition and ensuring uniform weld collars. The conical tip required more energy due to the larger melting volume, while a flat-tip stud (without an ignition tip) was inadequate, causing instability and short circuits. Regarding different shielding methods, argon provided greater stability, while CO₂ enhanced penetration but introduced instability. The ceramic ferrule was an effective alternative for protecting the molten pool but resulted in higher arc voltage. Magnetically assisted stud welding showed potential for thermal control, leading to lower temperatures on the backside of the plate. However, at high coil currents in the welding nozzle, the arc rotation induced by the magnetic field compromised weld stability. The analysis of stud movement systems indicated that electromechanical systems with springs and electromagnets provided greater movement stability, whereas motorized systems were more susceptible to oscillations in PID control, impacting the process's average power. Although significant progress has been made in understanding the Stud Welding variables, this study remains exploratory. The results serve as a starting point for future research, encouraging the development of new

methodologies and process improvements, aiming to enhance its performance and increase its industrial relevance.

Key-words: *Stud Welding; Drawn-Arc*

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	21
2. OBJETIVOS..	23
2.1 OBJETIVO GERAL.....	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
3.1 CONTEXTO HISTÓRICO DA SOLDAGEM DE PINOS.....	25
3.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM DE PINOS (<i>STUD WELDING</i>).....	28
3.2.1 Termos e Definições.....	29
3.2.2 Soldagem de Pinos por Arco Retraído	36
3.2.3 Variáveis Tecnológicas e Parametrização da Soldagem de Pinos.....	56
3.2.4 Aplicações Diversas e Relevância para os Campos da Engenharia	74
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	92
4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	93
4.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	97
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	102
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DO CONTROLE DE CORRENTE.....	102
5.1.1 Soldagem de Pinos em Fonte Tiristorizada.....	102
5.1.2 Soldagem de Pinos em Fonte Transistorizada	106
5.1.3 Soldagem de Pinos com corrente Pulsada e Constante	110
5.1.4 Soldagem de Pinos em Polaridades Distintas	117
5.2 INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM E O TEMPO DE ARCO.....	121
5.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS MECÂNICAS DE PROTRUSÃO E RECUO	129
5.3.1 Relação entre protrusão, Penetração e Movimento do pino.....	129
5.3.2 Relação entre Tensão e Recuo	133
5.3.3 Relação entre Recuo, Protrusão, Drop time e Velocidade do Pino	135
5.4 INFLUÊNCIA DA PONTA DO PINO	143
5.5 INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO.....	152
5.6 INFLUÊNCIA DO CAMPO MAGNÉTICO	165
5.7 CARACTERIZAÇÕES DE ASPECTO METALÚRGICO.....	180
5.8 CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DO PINO.....	187
6. CONCLUSÕES	197
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	199
REFERÊNCIAS..	201

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Patente Nº US1410421 de aparato para soldagem de pinos publicada em 21 de março de 1922.	26
Figura 2 – Exemplos de pinos e anéis cerâmicos utilizados em SW.....	36
Figura 3 – Esquemático do processo de Soldagem de pinos por Arco Retraído	37
Figura 4 – Representação do pino tipo SD com anel cerâmico, esquemático de uma pistola típica de SW e pistola comercial de soldagem de pinos	39
Figura 5 – Pistola típica para soldagem de pinos com gás	41
Figura 6 – Resultado típico de uma solda afetada pelo sopro magnético	42
Figura 7 – Representação das causas e soluções para o sopro magnético	44
Figura 8 - Exemplos de pinos suscetíveis ao sopro magnético.....	45
Figura 9 – Anel cerâmico com fluxo e resultado da solda	45
Figura 10 - Comportamento típico do arco em soldagem de pinos ocos (acima) e diagrama esquemático da atuação do arco na extremidade do pino (abaixo). a) Inicialização do arco b) Fase de arco principal	46
Figura 11 – Diagrama esquemático do dispositivo de rotação do arco	47
Figura 12 – Representação comercial da tecnologia MARC para SW	48
Figura 13 - MIAB - Magnetically Impelled Arc Butt Welding	49
Figura 14 – Princípio da soldagem de pinos com campo eletromagnético (B). 49	
Figura 15 – Diagrama esquemático de F_{mag} atuando na coluna de plasma	51
Figura 16 – Representação esquemática do início da rotação do arco e fusão do pino	52
Figura 17 – Comparação da seção transversal entre a soldagem de pinos assistida por campo magnético e com anel cerâmico	53
Figura 18 - Estatísticas dos testes de tração comparativos de soldagem de pinos M12 nas três versões distintas do arco retraído.....	54
Figura 19 – Medição da frequência relativa de incidência do arco na superfície da peça	55
Figura 20 – Comparativo entre técnicas de soldagem de pinos por arco retraído.	56

Figura 21 – Valores de referência sugeridos à parametrização do SW por arco retraído demonstrando valores indicados para o a) diâmetro do pino; b) protrusão; c) recuo; d) tempo; e) corrente	57
Figura 22 – Recomendação técnica para parametrização de corrente e tempo de soldagem de acordo com o diâmetro do pino.....	58
Figura 23 – Oscilograma típico do processo SW por arco retraído evidenciando as principais fases durante o procedimento em operação	60
Figura 24 – Defeito do tipo <i>Cold Plunge</i>	62
Figura 25 – Esquemático dos parâmetros da pistola e movimentação do pino durante a soldagem.....	63
Figura 26 - Recomendação técnica para parametrização de protrusão mínima e máxima de acordo com o diâmetro do pino.....	65
Figura 27 - Recomendação técnica para parametrização do recuo de acordo com o diâmetro do pino.....	66
Figura 28 - Oscilograma típico do processo SW para soldagem de pinos evidenciando as fases do movimento	68
Figura 29 – Diagrama com valores de referência da energia de soldagem SW por arco retraído.....	70
Figura 30 - Temperatura máxima atingida no verso do material de base em aço carbono para diferentes espessuras de acordo com a energia de soldagem ..	71
Figura 31 – Diagrama sobre a parametrização do processo SW por arco retraído	72
Figura 32 – Exemplos de aplicação da soldagem de pinos na engenharia civil (TRILLMICH; WELZ, 2016).....	75
Figura 33 – Princípio da construção composta e diagrama esquemático de forças (KÖCO, 2010)	76
Figura 34 – Diagrama de forças de conectores de cisalhamento em concreto de resistência normal (JÄHRING, 2009)	76
Figura 35 – Exemplo de aplicação em placas de ancoragem para construção composta com pinos conectores de cisalhamento soldados (KÖCO, 2010)....	78
Figura 36 – a) Esquemático da aplicação de placas de ancoragem e b) comportamento de carga de um pino sob carga de tração (TRILLMICH; WELZ, 2016)	79
Figura 37 – Exemplo de aplicação da soldagem de pinos <i>steel deck</i>	80

Figura 38 – Equipamento automatizado com alimentação automática de pino e anel cerâmico.....	81
Figura 39 – Comparação entre dispositivo vertical e convencional de SW em aplicação de <i>steel deck</i> . a) convencional b) posição ereta	82
Figura 40 – Comparação entre duas aplicações na construção civil. a) Diretamente na viga de aço b) soldagem de pinos através de <i>decks</i> galvanizados	83
Figura 41 – Exemplos de aplicação da soldagem de pinos em engenharia de fachada. Fixação de painéis metálicos (acima), fixação de placas de titânio do museu <i>Guggenheim</i> em Bilbao (abaixo) (TRILLMICH; WELZ, 2016) (NORTHLAND FASTENING, 2020) e (STANLEY, 2024a).....	84
Figura 42 – Exemplos de aplicações da soldagem de pinos na indústria automobilística	85
Figura 43 – Exemplos de aplicações da soldagem de pinos na construção naval	87
Figura 44 – Soldagem subaquática de pinos para fixação de anodos anticorrosivos	88
Figura 45 – Dispositivo de soldagem manual de pinos em ambiente subaquático	90
Figura 46 – Comparação de três condições distintas de umidade na área da soldagem do pino.....	90
Figura 47 – Exemplos de aplicações da soldagem de pinos em HVAC.....	91
Figura 48 – Diagrama esquemático das experimentações e principais análises	92
Figura 49 – Modelos das fontes de soldagem de pinos utilizadas na bancada experimental. a) Soyer/BMK16i, b) Soyer/BMH-22i, c) Tucker/THW 1500, d) IMC – Solda Pino.....	98
Figura 50 - Modelos das pistolas de soldagem de pinos utilizadas na bancada experimental. a) Soyer/PH-3N, b) Soyer/PH-4L, c) Soyer/PH-3N ¹⁶ SRM, d) Tucker/PLM560	99
Figura 51 - Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR/IMC	101
Figura 52 - Sistema de filmagem em alta velocidade.....	101

Figura 53 – Oscilograma do processo <i>Stud Welding</i> por arco retraído com fonte tiristorizada para pino de 10 mm de diâmetro em aço carbono.....	103
Figura 54 – Detalhe na região final do oscilograma da Figura 53	105
Figura 55 - Oscilograma do processo <i>Stud Welding</i> por arco retraído com fonte transistorizada para pino de 10 mm de diâmetro em aço carbono.....	108
Figura 56 - Detalhe na região final do oscilograma da Figura 55.....	109
Figura 57 – Caracterização de diferentes formatos de onda para a mesma corrente média (750A) para a soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono	111
Figura 58 – Comportamento da tensão para diferentes formatos de onda e proteção do arco na soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono	113
Figura 59 – Sobreposição dos sinais de corrente pulsada e constante para verificação de estabilidade do sinal. Corrente média 750A; frequência de pulsação 10Hz.....	114
Figura 60 - Comportamento da potência para diferentes formatos de onda e proteção do arco na soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono	115
Figura 61 – Influência do tipo de corrente e proteção. a) pulsado sem gás, b) pulsado com gás, c) constante com gás, d) constante sem gás	117
Figura 62 - Caracterização de diferentes configurações de polaridade para a mesma corrente média (750A) para a soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono.....	119
Figura 63 – Comportamento da tensão de diferentes formatos de onda e configurações de polaridade para a mesma corrente média (750A) na soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono	120
Figura 64 - Oscilogramas de potência do processo <i>Stud Welding</i> com polaridade positiva e negativa.....	120
Figura 65 - Influência da polaridade. a) CC+ constante, b) CC- constante, c) CC+ pulsado, d) CC- pulsado.....	121
Figura 66 – Medição da resistência elétrica de vinte combinações diferentes de energia (Tabela 1).....	123
Figura 67 – Curva de parametrização de corrente e tempo para a soldagem de um pino de aço carbono de 10 mm de diâmetro para SW a arco retraído	125

Figura 68 – Soldas realizadas com diferentes combinações de parâmetros de tempo e corrente da Tabela 1 para um pino de 10 mm de diâmetro.....	126
Figura 69 – Efeito da diferente regulagem de protrusão em pistola com sistema mecânico de movimentação do pino. a) 4 mm; b) 3 mm; c) 2 mm; d) 1 mm; e) 0 mm	132
Figura 70 – Mapeamento da tensão do arco para diferentes níveis de corrente, valores de recuo e meios de proteção	134
Figura 71 – Exemplos de modo de teste “Lift” (recuo) em diferentes modelos de fontes de soldagem	136
Figura 72 – Influência do recuo sobre a variável “drop time” em pistola com movimentação do pino por eletroimã e mola, modelo Soyer/PH-3N.....	137
Figura 73 – Intervalos de medição do valor de “drop time” apontando o atraso do sistema de medição	140
Figura 74 – Curvas do valor de <i>drop time</i> medidos pelo operador e pela fonte	141
Figura 75 – Relação entre o parâmetro de recuo, tempo de mergulho e velocidade média	142
Figura 76 – Representação das variáveis recuo e protrusão conforme o tipo de ponta do pino.....	143
Figura 77 – Pontas testadas a) esférica b) cônica c) fina d) plana.....	144
Figura 78 – Imagens dos pinos de solda com diferentes geometrias de pontas sendo submetidos à soldagem, a) ponta esférica b) ponta cônica c) ponta fina d) ponta plana.....	147
Figura 79 – Resultado da solda realizada com diferentes tipos de pontas dos pinos porém com os mesmos parâmetros de soldagem a) Ponta esférica, b) ponta cônica c) ponta fina d) ponta plana	148
Figura 80 – Macrografias e inspeção por raio-x. a) com ponta esférica de alumínio, b) ponta cônica c) ponta fina d) ponta plana.....	150
Figura 81 – Curtos-circuitos observados na inicialização do arco piloto com pino sem ponta de ignição (extremidade plana)	151
Figura 82 – Comparação entre soldas realizadas com diferentes tipos de gases e anel cerâmico	153
Figura 83 – Comparação entre tipos de proteção com gases e anel cerâmico	155

Figura 84 – Comparação dos sinais de tensão entre proteções distintas com gás e anel cerâmico	157
Figura 85 – Sinais de corrente para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas	159
Figura 86 - Sinais de tensão para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas	159
Figura 87 - Sinais de potência para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas	160
Figura 88 - Sinais de temperatura no verso da peça soldada para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas	160
Figura 89 – Instante inicial da abertura do arco piloto para as diferentes condições de proteção testadas.....	161
Figura 90 - Instante inicial da abertura do arco principal para as diferentes condições de proteção testadas.....	161
Figura 91 – instante final do arco principal evidenciado diferentes níveis de fusão do pino e da peça.....	162
Figura 92 – Influência da vazão dos gases Argônio, CO ₂ e mistura entre eles	163
Figura 93 – Aparência do colar de solda e macrografias com técnicas distintas de soldagem de pinos por arco retraído. a) Soldagem com anel cerâmico, b) Soldagem com gás, c) Soldagem com gás assistido por campo magnético..	166
Figura 94 - Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino M10 com diferentes pontas de ignição: (a) ponta de esfera de alumínio, (b) ponta cônica e (c) ponta fina (HZ1)	168
Figura 95 – Medição de temperatura referente aos oscilogramas da Figura 94 realizada no verso de uma chapa de aço carbono com 6,4 mm de espessura	169
Figura 96 – Comparativo entre versão convencional com anel cerâmico e campo magnético com gás	170
Figura 97 – Teste de dobramento realizado em duas amostras com parâmetros idênticos e versões distintas em chapa fina de aço (2 mm). a) campo magnético com gás b) anel cerâmico	171

Figura 98 - Teste de dobramento realizado em duas amostras com parâmetros idênticos e versões distintas em chapa de aço (6,4 mm). a) campo magnético com gás b) anel cerâmico	171
Figura 99 – Macrografias das amostras soldadas com campo magnético e anel cerâmico.....	172
Figura 100 – Oscilogramas das duas condições testadas a) campo magnético e gás b) anel cerâmico	172
Figura 101 – Instantes das filmagens em alta velocidade das soldas realizadas com (a) campo magnético e (b) soldagem convencional com anel cerâmico	173
Figura 102 – Radiografia realizada em bocal comercial concebido para soldagem com campo magnético e gás.....	173
Figura 103 – Resultado das soldas realizadas variando o valor de corrente na bobina do bocal entre 210, 400, 600, 810 mA.....	175
Figura 104 - Resultado das soldas realizadas variando o valor de corrente na bobina do bocal entre 1005, 1200, 1350 e 1500 mA.....	176
Figura 105 – Representação do metal fundido sendo lançado da ponta do pino pela força centrífuga do campo gerado	179
Figura 106 – Micrografia da região soldada por SW a arco retraído para diferentes diâmetros de pinos de aço baixo carbono revestido com níquel ...	183
Figura 107 – Perfil de dureza para solda realizada com pino M10 de aço carbono classe 5.8, em chapa de aço inoxidável 304	184
Figura 108 - Perfil de dureza para solda realizada com pino M10 de aço inoxidável classe A2-50, em chapa de aço inoxidável 304	186
Figura 109 – Caracterização do movimento do pino representado na norma ISO 14555	188
Figura 110 – Representação da tecnologia com eletroímã e mola para movimentação do pino	190
Figura 111 - Representação da tecnologia com eletroímã e mola para movimentação do pino com amortecimento.....	190
Figura 112 - Comparação do resultado típico de formação do colar a) sem amortecimento b) com amortecimento	192
Figura 113 – Comparação do movimento do pino a) sem amortecimento, evidenciando os respingos gerados e b) com amortecimento.....	193

Figura 114 - Comparação das macrografias a) sem amortecimento e b) com amortecimento do pino.....	193
Figura 115 - Representação da tecnologia motor movimentação do pino	194
Figura 116 – Medição do valor de recuo programado na fonte para pistola motorizada.....	195

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do processo *Stud Welding* foi um avanço significativo nos métodos de fixação industrial, oferecendo soluções rápidas e confiáveis em um vasto espectro de aplicações. Esse processo é essencial para a indústria, pois une peças metálicas (pinos) com alta integridade estrutural, minimizando pontos críticos e eliminando a necessidade de perfurações ou preparações de superfície extensas. A crescente demanda por produtividade e qualidade nos processos industriais impulsionou o desenvolvimento de diversas variantes da soldagem a arco elétrico, gerando impactos econômicos consideráveis em diferentes setores.

A importância da soldagem de pinos vai além de sua aplicação prática, influenciando diretamente a produção, a qualidade dos produtos e a viabilidade econômica em indústrias críticas. Em um contexto de demandas por construções rápidas, veículos mais seguros e infraestrutura durável, a soldagem de pinos torna-se indispensável. Sua velocidade de operação, com soldas realizadas em milissegundos, permite que linhas de montagem atinjam elevados índices de produção sem comprometer os padrões de qualidade. A robustez das soldas também contribui para a longevidade e confiabilidade dos produtos finais, como edifícios, veículos e maquinários.

O processo *Stud Welding* é amplamente empregado em setores como a construção civil (HAN et al., 2015; XUE et al., 2008), automotivo (LLORENTE, 2014), naval (LEE et al., 2009), segurança e defesa (CHO; SHIN; YI, 2016), utilizando sub-modalidades como Arco Retraído (*Drawn-Arc*), Ciclo Curto (*Short-Cycle*) e Descarga Capacitiva. Na construção civil, é usado na fixação de estruturas metálicas, como escadas, painéis de revestimento e controle de forças cisalhantes do concreto. Na indústria automotiva, fixa componentes estruturais como suportes de motor e forrações, enquanto na indústria naval, é essencial na fixação de chapas de aço e assoalhos de convés. No Brasil, contudo, o processo ainda não é amplamente consolidado, em parte devido às demandas industriais tradicionais e à falta de conhecimento técnico.

O *Stud Welding* destaca-se pela rapidez, fusão completa na interface pino/peça, facilidade de uso e capacidade de unir pinos de diferentes diâmetros e materiais. A baixa deformação resultante é um ponto positivo em aplicações com tolerâncias dimensionais restritas. Além disso, em situações específicas, os pinos

podem ser até mesmo brasados em um material de base por meio deste processo (SEILKOPF; NORBERT, 2001).

Para garantir a qualidade do *Stud Welding*, é essencial entender variáveis como corrente elétrica, tempo de soldagem, projeto do pino e o funcionamento da pistola de soldagem, no entanto, a literatura existente sobre o processo ainda é escassa. Trillmich e Welz, (2016) abordam essas variáveis, mas faltam experimentos práticos que validem muitas de suas afirmações, sendo que, o conhecimento técnico é fundamental para otimizar o processo, especialmente em setores críticos como petróleo, gás e defesa, onde as soldas devem atender a padrões rigorosos.

Nesse contexto, a presente pesquisa visa preencher uma lacuna crítica na literatura sobre o processo de soldagem de pinos, podendo, inclusive, servir como uma base de consulta e breve referência em língua portuguesa para engenheiros, técnicos e pesquisadores. Enquanto processos de soldagem a arco, como MIG/MAG e TIG, possuem vasta literatura consolidada, com detalhamentos técnicos, testes práticos e validação científica amplamente documentados, o *Stud Welding* carece de materiais igualmente abrangentes. Os manuais internacionais e as literaturas especializadas sobre *Stud Welding* são limitados, pouco divulgados, e geralmente não incluem demonstrações práticas ou análises de desempenho dos equipamentos. Essa escassez de informações torna difícil a otimização e a aplicação robusta do processo em ambientes industriais.

Com base em experimentos de caracterização de diferentes temas deste processo de soldagem a arco, a presente pesquisa oferece uma contribuição significativa tanto para a ciência quanto para a indústria, fornecendo dados práticos que até então eram raramente explorados. Além disso, este trabalho se propõe a servir como um ponto de partida para o desenvolvimento de futuras pesquisas que possam aprofundar cada um dos subtemas abordados. Ao consolidar uma base de conhecimento técnico e científico, abre-se a oportunidade para que novos estudos ampliem a compreensão sobre variáveis específicas do processo, suas aplicações em diferentes setores e o aprimoramento de suas técnicas. Dessa forma, este estudo se estabelece não apenas como uma importante referência imediata, mas também como uma plataforma para o contínuo avanço tecnológico do *Stud Welding*, essencial para a competitividade e a inovação da indústria moderna.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta tese é realizar um estudo experimental preliminar sobre diferentes aspectos do processo *Stud Welding* por Arco Retraído (*Drawn-Arc*), fornecendo uma base inicial de conhecimento sobre suas variáveis principais e aplicações. A pesquisa busca explorar diversos subtemas relacionados ao processo, com foco em identificar parâmetros críticos, comportamentos do arco e técnicas de monitoramento e inspeção que possam contribuir para o aprimoramento e maior entendimento da soldagem de pinos. A intenção é oferecer dados experimentais que possam servir como ponto de partida para futuros estudos mais aprofundados e para a evolução da aplicação do *Drawn-Arc* em diferentes contextos industriais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre as submodalidades e técnicas de *Stud Welding* por arco retraído (*Drawn-Arc*), destacando os principais parâmetros de processo e suas aplicações, com foco em identificar lacunas no conhecimento existente.
- Avaliar experimentalmente os parâmetros críticos do processo, como corrente elétrica, tempo de soldagem e tipo de proteção (gás, cerâmica e capo magnético), explorando suas influências na qualidade da solda e na integridade da junta.
- Analisar o comportamento do arco durante o processo, utilizando oscilogramas e sinais elétricos para monitorar e ilustrar as variações dinâmicas, a fim de compreender melhor os efeitos das variáveis envolvidas.
- Desenvolver metodologias preliminares de monitoramento e inspeção para o controle da qualidade das juntas soldadas, utilizando dados experimentais para sugerir critérios e procedimentos que possam ser aprimorados em estudos futuros.
- Validar parametrizações alternativas para o processo, explorando novos ajustes de corrente, tempo e proteção, com o objetivo de identificar

combinações que possam oferecer maior confiabilidade e eficiência em diferentes cenários de aplicação.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO DA SOLDAGEM DE PINOS

As origens da implementação industrial da soldagem de pinos é uma área de pesquisa que ainda não recebeu uma suficiente dedicação por parte de pesquisadores da área de engenharia de soldagem. Apesar dos avanços em relação aos primeiros equipamentos e testes que ocorreram no início do século XX, as origens deste processo ainda não foram completamente elucidadas pela história. Algumas publicações indicam que os primeiros testes bem-sucedidos de soldagem de pinos por arco elétrico (*Stud Welding*), de forma manual, foram realizados entre 1915 e 1918 pelo engenheiro britânico Harold Martin juntamente com Louis John Steele e Andrew Edward McCarthy, onde a tecnologia foi usada nos processos de produção aplicados no estaleiro da Marinha Real Britânica em Portsmouth, uma cidade portuária do condado de Hampshire, na Inglaterra (KAPLER; NOWACKI; SAJEK, 2019) (TRILLMICH; WELZ, 2016).

Um ano depois, em 1919, Martin, Steele e McCarthy empreenderam muitos esforços tentando obter proteção patentária para suas soluções técnicas. Em junho de 1920, foi apresentado a primeira solicitação de patente no Escritório de Patentes dos Estados Unidos e somente em 1922 foi publicada sob o número US1410421A (MARTIN; MCCARTHY; STEELE, 1922) (Figura 1). Logo após, em julho do mesmo ano, também foram solicitados pedidos aos órgãos da administração pública da França (MARTIN; MCCARTHY; STEELE, 1921) e da Dinamarca (MARTIN; MCCARTHY, ANDREW EDWARD STEELE, 1922) e pedidos na Grã-Bretanha em janeiro e novembro de 1921 (STEELE; MARTIN; MCCARTHY, 1922) (STEELE; MARTIN; MCCARTHY, 1922, 1923). Estes últimos, todos relacionados com melhorias no método anteriormente proposto. Nos anos seguintes, em 1925, os direitos autorais foram cedidos à empresa Handstock Ltd. de Londres, uma Corporação da Grã-Bretanha e Irlanda (STEELE; MARTIN; MCCARTHY, 1925).

Figura 1- Patente N° US1410421 de aparato para soldagem de pinos publicada em 21 de março de 1922.

UNITED STATES PATENT OFFICE.

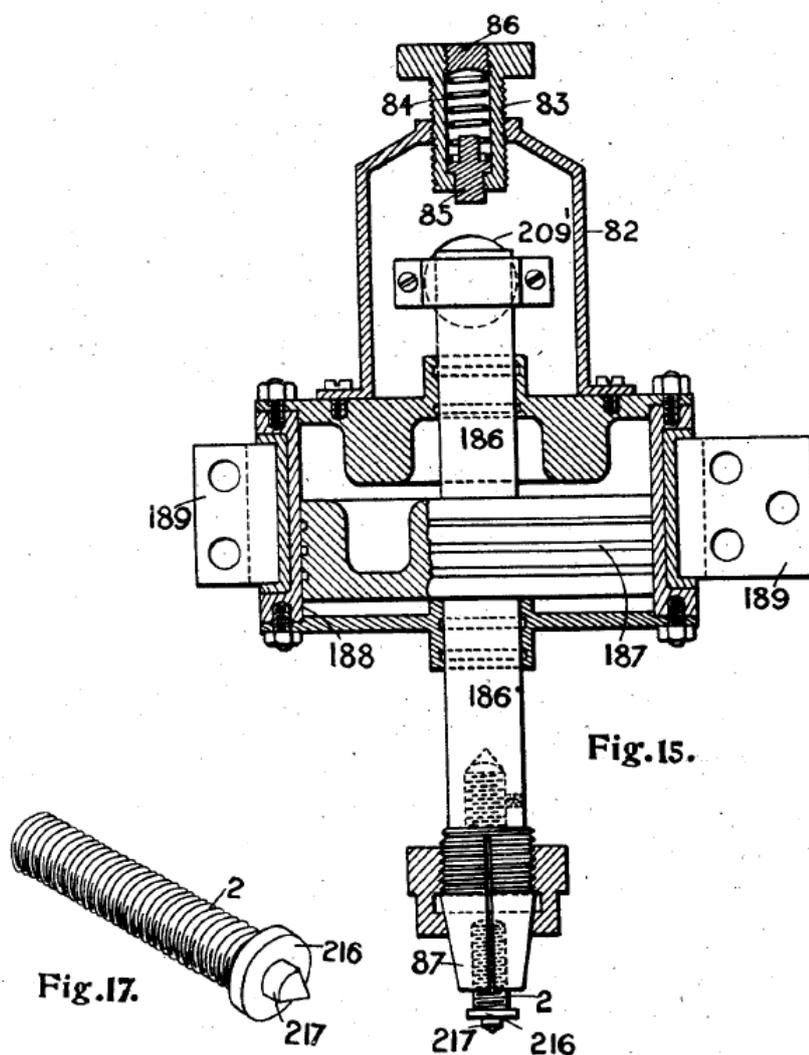
LOUIS JOHN STEELE, OF PORTSMOUTH, AND HAROLD MARTIN AND ANDREW EDWARD McCARTHY, OF SOUTHSEA, ENGLAND.

ELECTRIC WELDING.

1,410,421.

Specification of Letters Patent. Patented Mar. 21, 1922.

Application filed June 21, 1920. Serial No. 390,555.



Inventors
 Louis John Steele
 Harold Martin and
 Andrew Edward McCarthy
 by
 W. S. Evans
 Attorney.

Entretanto, os resultados esperançosos obtidos pelos inventores britânicos supracitados não se popularizaram conforme se esperava. Um dos motivos para isso pode ter sido o fato de que, neste período da história (pós-guerra), a demanda por equipamentos militares diminuiu drasticamente e a Grã-Bretanha já não era um parceiro comercial atrativo e era a única parte interessada na aplicação da tecnologia de soldagem de pinos. As chances de aplicação da soldagem de pinos diminuíram ainda mais devido à Crise de 1929, também conhecida como Grande Depressão (KAPLER; NOWACKI; SAJEK, 2019). Representada por uma forte recessão econômica, a crise atingiu o capitalismo internacional no final da década de 1920 e também marcou a decadência do liberalismo econômico, naquele momento, e teve como causas a superprodução e especulação financeira.

Nesta época, de fato, a soldagem de pinos já era possível, contradizendo algumas afirmações de que, mais tarde, a técnica fora inventada nos EUA. Publicações encontradas, as quais remontam a origem do SW, apontam a década de 1930 como o período em que a tecnologia *Stud Welding* surgiu, porém, em outro continente, por meio de implementações industriais realizadas pelos trabalhadores do Estaleiro Naval do Brooklyn em Nova Iorque/EUA (CARY, [s.d.]). No entanto, o maior número de informações acerca da origem deste processo de soldagem, data entre os anos de 1939 e 1940, sendo amplamente divulgado como originário dos Estados Unidos, especificamente no Estaleiro Naval *Mare Island*, situado em Vallejo, no condado de Solano, Califórnia. Neste local, situava-se a primeira instalação da Marinha dos Estados Unidos no Oceano Pacífico. Ademais, é relevante mencionar que a cidade abrigava um dos trabalhadores responsáveis pela aplicação de pinos roscados de aço, cujo empenho em aprimorar o método de fixação de tais peças merece ser destacado.

Eduard “Ted” Nelson – ou também Edward F. Nelson, conforme as assinaturas nas patentes – era um operário de estaleiro da época que aprimorou a instalação de pinos por meio de um aparato que se configura como uma pistola portátil e automática de soldagem de pinos. Com este aparato, era possível agilizar a aplicação de pinos roscados que fixavam estruturas metálicas nas embarcações. Afirma-se que esta inovação tecnológica teria economizado algumas milhões de horas-homem de trabalho, fato que rendeu até um prêmio ao inventor por parte da Marinha americana (KAPLER; NOWACKI; SAJEK, 2019). Desta forma, Nelson figura atualmente, na maioria das fontes bibliográficas deste processo, como o precursor da soldagem de

pinos por arco elétrico e, ao mesmo tempo, fundador da empresa que carrega seu sobrenome, a *Nelson® Stud Welding & Fastening*, sendo hoje uma marca da empresa americana *Stanley Engineered Fastening*.

Isto aconteceu em meados da década de 1930, quando as ideias dos construtores navais britânicos Harold Martin, Louis John Steele e Andrew Edward McCarthy e suas soluções tecnológicas de patentes, já expiradas, foram revisitadas pela empresa Nelson®. Em 1938 a empresa apresentou onze pedidos de patentes para a concepção de um "aparelho de soldagem" que permitiria a soldagem de pinos de aço com grandes áreas metálicas soldadas. Nelson afirmou que a qualidade das juntas oferecidas por essa solução seria superior àquela obtida com técnicas de soldagem manual da época e que a produtividade seria maior do que a obtida até então (KAPLER; NOWACKI; SAJEK, 2019). Outro nome que é, raras vezes, mencionado é o nome de Andrew Foott-Stephens, que supostamente conduziu testes nos Estados Unidos em 1940 e também seria um suposto co-fundador da Nelson®, porém, sem referências precisas (KAPLER; NOWACKI; SAJEK, 2019).

Atualmente, o processo *Stud Welding* tem experimentado um significativo crescimento em sua presença global, com o estabelecimento de fabricantes e marcas em diversos países ao redor do mundo. Na Alemanha, destacam-se empresas como *Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik*, HBS GmbH, Bolte GmbH e KÖCO GmbH. Nos Estados Unidos, empresas como Nelson® e *Midwest Fasteners* são reconhecidas nesse mercado. Na Holanda, a empresa *Silicon* se destaca como prestador de serviços para soldagem de pinos de ancoramento. Na China, a *Iking Group* e *Hanyang Stud Welding Inc.* são uma das principais fornecedoras nesse segmento. No Japão, a *NSW - Nippon Stud Welding Co. Ltd* também é uma empresa relevante nesse setor. Esses são apenas alguns exemplos que mostram que a soldagem de pinos está difundida mundialmente e que o processo possui relevância no mercado. Dessa forma, embora haja certa incerteza e divergências sobre as origens exatas do processo *Stud Welding* e suas aplicações em larga escala, a sua relevância na indústria global são notáveis atualmente.

3.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM DE PINOS (*STUD WELDING*)

A soldagem de pinos por arco elétrico (*Stud Welding*) é um processo de união, por fusão de materiais metálicos, que envolve a fixação de um pino (*stud*) à superfície

de uma peça por meio de calor e pressão. De modo geral, na soldagem por arco elétrico, um arco é gerado entre um eletrodo (consumível ou não) e a peça, utilizando uma fonte de corrente elétrica. No processo SW, o arco elétrico funde a extremidade de um pino e a superfície de uma peça, ambos metálicos, criando uma poça de fusão. Em seguida, o pino é forçado contra a superfície da peça que está parcialmente líquida, com movimento controlado, permitindo que o material fundido se solidifique e forme uma junta sólida, chamada de colar de solda.

Este processo de soldagem pode ser realizado por diversas sub-modalidades, incluindo a soldagem de pinos por Arco Retraído, do acrônimo utilizado neste trabalho como SW-AR, (ou do inglês *Drawn Arc Stud Welding*), soldagem de pinos por arco elétrico oriundo de uma Descarga Capacitiva, SW-DC, (ou do inglês *Capacitor Discharge Stud Welding*). Independentemente das distintas nomenclaturas, o processo se difere, sobretudo, pelo tempo e energia de soldagem, mecanismos da pistola que executam o movimento do pino e pelo tipo de controle da corrente.

3.2.1 Termos e Definições

A tecnologia de soldagem de pinos e suas diretrizes relativas a consumíveis e procedimentos, abrangendo o processo em sua totalidade, têm sido objeto de referência em diversas normas internacionais, nas quais cada uma atribui uma designação específica a esse processo. É importante lembrar que isso não se resume apenas ao SW mas também é comum aos demais processos de soldagem a arco.

Trillmich e Welz (2016) citam que, inicialmente, o “*Drawn-Arc Stud Welding*” era empregado utilizando-se um anel cerâmico para proteger a poça de fusão. A soldagem sem o uso desse anel cerâmico era uma exceção e ocorria apenas em casos de pinos de pequeno diâmetro (menor que 8 mm). Devido ao controle do processo de soldagem por meio de contatores, os tempos de soldagem abaixo de 100 ms não eram possíveis de serem alcançados. Com o surgimento dos primeiros tiristores em 1962, um banco de capacitores poderia ser conectado para acionar o processo de soldagem. No entanto, devido ao movimento mais lento do atuador dentro da pistola de soldagem, um arco piloto de baixa corrente era acionado inicialmente durante a elevação, e o banco de capacitores era ligado somente durante o mergulho, ou seja, após o desligamento do solenóide.

A partir de 1963, essa tecnologia começou a ser utilizada na indústria automobilística para soldar pinos em forma de T, alcançando tempos de soldagem de até 10 ms. Assim, esse processo ficou conhecido como "*Drawn-Arc Capacitor Discharge Stud Welding*". Em termos de requisitos e gerenciamento de qualidade, esse processo é semelhante ao processo conhecido hoje como "*Tip Ignition*" (o que viria a se tornar, no futuro, a Descarga Capacitiva). Na época, como ambos os processos fornecem energia por meio de uma descarga de capacitores, o termo "*Capacitor Discharge Stud Welding*" abrange tanto o processo "*Tip Ignition*" quanto o "*Drawn-Arc Capacitor Discharge Stud Welding*". No entanto, este último é atualmente pouco praticado, sendo substituído pelo "*Short-Cycle Stud Welding*" (soldagem de pinos em ciclo curto).

Os avanços na tecnologia de semicondutores de potência levaram ao desenvolvimento de tiristores que poderiam ser conectados para formar retificadores controlados. Isso ampliou a faixa de tempo de soldagem para aproximadamente 20 ms ou mais, especialmente para a soldagem de pinos em chapas finas. Essa tecnologia foi introduzida como "*Draw-Arc Short-Cycle Stud Welding*" (soldagem de pinos por arco retraído em ciclo curto). Nesse caso, o mecanismo relativamente lento das pistolas de solda ou cabeçotes era sincronizado por meio de sequências de movimento adequadas ao curto tempo de arco.

Hoje, as diferentes variantes da soldagem de pinos evoluíram e foram padronizadas de acordo com diferentes normas técnicas internacionais. As principais normas, e que serão utilizadas como referências no presente trabalho, que classificam e abordam alguns termos envolvidos neste processo de soldagem são:

- Normas ISO (*International Organization for Standardization*)

ISO 14555 - *Welding: Arc Stud Welding of Metallic Materials,*

Classifica os processos de soldagem de pinos como:

- "*Drawn-Arc Stud Welding with Ceramic Ferrule or Shielding Gas*" (> 100 ms)
- "*Short-Cycle Drawn-Arc Stud Welding*" (< 100 ms)
- "*Stud welding with tip ignition*" (< 10 ms)

ISO 13918 - *Welding: Studs and ceramic ferrules for arc stud welding;*

Classifica os processos de soldagem de pinos como:

- “*Drawn-Arc Stud Welding with Ceramic Ferrule or Shielding Gas*”
- “*Short-Cycle Drawn-Arc Stud Welding*”
- “*Stud welding with tip ignition*”

ISO 4063 - *Welding, brazing, soldering and cutting: Nomenclature of processes and reference numbers:*

Esta última, classifica e numera os processos como:

- “*Drawn-Arc Stud Welding with Ceramic Ferrule or Shielding Gas (783)*”
- “*Short-Cycle Drawn-Arc Stud Welding (784)*”
- “*Capacitor Discharge Drawn-Arc Stud Welding (785)*”
- “*Capacitor Discharge Stud Welding with Tip Ignition (786)*”

- Normas AWS (*American Welding Society*):

ANSI/AWS C5.4-1993 – *Recommended Practices for Stud Welding*: Classifica o processo em duas famílias principais, “*Arc Stud Welding*” e “*Capacitor Discharge Stud Welding*”. Esta última, subdivide-se em *Contact Method*, *Gap Method* e *Drawn-Arc Method*.

AWS A3.0/A3.0M:2020 - *Standard Welding Terms and Definitions*: Classifica o processo apenas como “*Arc Stud Welding*” (SW). Porém, não classifica suas sub-modalidades, como a Descarga Capacitiva.

AWS D1 .1/D1 .1 M:2020 - *Structural Welding Code Steel*: Adota a designação “*Stud Welding*” (SW) para se referir ao processo. Também não faz referência ao processo a subvariações do processo.

Assim como o processo de soldagem em si, as normas também classificam e adotam nomenclaturas para consumíveis e componentes conexos aos processos. Neste caso, a normal ISO13918:2008 apresenta siglas e nomenclaturas para os diferentes tipos de pinos e anéis cerâmicos. Os principais tipos de pinos normalizados são:

- **Pino RD (*Reduced Diameter*):** Este tipo de pino tem um diâmetro reduzido na extremidade que é soldada à peça. Normalmente são pinos roscados com ponta em formato de cone. Existem especificações e dimensões que variam com base no diâmetro da rosca, desde M6 até M24, incluindo detalhes como diâmetro do eixo, altura e ângulo de inclinação.
- **Pino PD (*Threaded Stud "pitch"*):** Semelhante ao RD, referem-se a pinos roscados com especificações particulares de passo da rosca (*pitch*).
- **Pino UD (*Unthreaded Stud*):** Pino liso com diâmetro interno. Normalmente pode variar de 6 a 16 mm em diâmetro.
- **Pino SD (*Shear Connector*):** Pino conector de cisalhamento. Destinado a aplicações estruturais, com dimensões variando significativamente para acomodar diferentes cargas de cisalhamento.
- **Pino CD (*Capacitor Discharge*)** - Especificamente projetados para o processo de soldagem por descarga de capacitiva, estes pinos geralmente têm uma pequena projeção na base (ponta fina) que facilita a soldagem em termos de contato.
- **Pino IT (*Internally Threaded*)** - Pinos com rosca interna, permitindo a fixação de componentes adicionais após a soldagem. Varia de M5 a M12, com especificações detalhadas para dimensões como diâmetro do eixo, profundidade da rosca interna e altura.
- **Pino PT (*Threaded Stud "pitch"*)** – Semelhante ao PD, são pinos roscados com especificações de passo da rosca (*pitch*) para uso com Descarga Capacitiva.
- **Pino UT (*unthreaded stud*):** Pinos lisos, sem rosca interna ou externa para uso com Descarga Capacitiva.
- **Pino PS (*Threaded stud with flange "pitch"*)**. Pino com rosca e flange. Possuem um flange para aumentar a área de contato com a peça de trabalho, variando de M3 a M10 em diâmetro e com especificações de passo da rosca (*pitch*). Recomendado para uso com o processo *Short-Cycle*.
- **Pino US (*unthreaded stud*):** Pino sem rosca similar ao modelo UD, mas com variações nas dimensões para diferentes aplicações. Recomendado para uso com o processo *Short-Cycle*.
- **Pino IS (*Internal Thread*):** Semelhantes ao IT, são pinos com rosca interna, recomendados para uso com o processo *Short-Cycle*.

- **Anel Cerâmico para Pino com Rosca (PF):** Dimensões específicas são fornecidas para ponteiras cerâmicas usadas com pinos roscados, variando de PF 6 a PF 24.
- **Anel Cerâmico para Pino sem Rosca e Conector de Cisalhamento (UF):** As dimensões variam desde o UF 6 ao UF 25. Atualmente, é possível encontrar anéis cerâmicos para pinos SD com aberturas de desgaseificação ligeiramente maiores (TRILLMICH, 2023)
- **Anel Cerâmico para Pino com Rosca e Eixo Reduzido (RF):** Há uma variação de tamanho do RF 6 ao RF 24. Existem duas formas diferentes apresentadas: "*Shallow*" (rasa) e "*High*" (alta), que podem indicar diferentes alturas ou formas do anel para se adaptar a diferentes tipos de pinos.

De acordo com a classificação da norma ISO 13918:2008, os pinos utilizados em soldagem por *Stud Welding* são categorizados de acordo com a especificação do processo, o que é indicado pela última letra de sua sigla. Por exemplo, os pinos que terminam com a letra "D" são apropriados para o processo de arco retraído (*Drawn Arc*), enquanto aqueles terminando em "S" são para o processo *Short-Cycle*. Por fim, os pinos que terminam com "T" são utilizados no processo de *Tip Ignition*, que corresponde à soldagem por Descarga Capacitiva. Este sistema de nomenclatura fornece uma maneira sistemática de identificar rapidamente o tipo de pino e o processo de soldagem mais adequado para uma aplicação específica. Isso se aplica para os anéis cerâmicos, conforme pode ser observada a letra F na sigla que indica "*Ferrule*".

A nomenclatura das normas técnicas para os pinos e conectores de solda por *Stud Welding* foi estabelecida para padronizar e especificar os diferentes tipos de pinos, no entanto, novos tipos de pinos e conectores foram incorporados e nomeados para atender às necessidades específicas de diferentes indústrias em uma variedade de aplicações. Cada novo componente visa melhorar a aplicação em diferentes contextos de trabalho, como:

- **Pinos Âncoras Refratários (*Refractory anchor studs*)** - Destinam-se à fixação de mantas isolantes por meio de arames ou espetos de arame do tipo "asa de gaivota". São usados no revestimento de fornos, aquecedores, chaminés, culatras da indústria de petróleo e processos petroquímicos e em outras situações onde temperaturas extremas não são encontradas (SILICON, 2024)

- **Pinos de Isolamento (*Insulation Pins*)** - Projetados para a fixação de material isolante em aplicações de HVAC, tubulações e construção.
- **Pinos de Aterramento (*Grounding Studs*)** - Especialmente desenhados para proporcionar uma conexão de aterramento segura em equipamentos elétricos ou estruturas.

Os pinos utilizados também podem apresentar diferentes configurações nas suas extremidades, refletindo variações nas técnicas de soldagem e na evolução tecnológica das fontes. Embora ainda não haja um consenso definitivo sobre o impacto exato que as diferentes geometrias das pontas dos pinos têm sobre o processo de soldagem, supõe-se que no início da implementação deste processo, as fontes de soldagem menos avançadas tecnologicamente necessitavam de elementos adicionais para facilitar a iniciação do arco elétrico. Com o avanço tecnológico, as pontas dos pinos evoluíram e, hoje em dia, as mais comuns são:

- **Esfera de Alumínio:** Utilizada exclusivamente para arco retraído, a ponta com esfera de alumínio é usada para melhorar a ignição durante a abertura do arco. O alumínio tem uma condutividade térmica alta, o que ajuda a iniciar o arco de solda mais facilmente. Bargani et al. (2016) explora o impacto do uso de pontas de alumínio (Al) nos pinos sobre o desempenho e nas propriedades das juntas soldadas. A pesquisa revela que, sem a ponta de alumínio, as reações de oxigênio com carbono resultam em soldas porosas, que não passam nos testes de flexão necessários. Foi descoberto que mesmo pequenas concentrações de alumínio, tão baixas quanto 0,13% em peso, agem como desoxidantes eficazes, prevenindo a formação de porosidade na zona de solda. No entanto, quando a concentração de alumínio atinge 0,95% em peso, devido à formação de ferrita delta (δ -ferrite), a conexão de solda de pino não passa no teste de flexão. Aumentos ainda maiores de alumínio, até 1,35% em peso, resultam em um aumento significativo da dureza do metal de solda, de cerca de 400 HV para 800 HV.
- **Ponta Cônica:** A ponta cônica, normalizada pela ISO 13918:2008 para diferentes modelos de pinos, tem como propósito focar a energia da soldagem em um local específico. Ainda que a influência exata dessa configuração de ponta seja tema de pesquisa e não esteja completamente esclarecida por fontes confiáveis, é notável

que atualmente ela seja amplamente adotada, principalmente em pinos de aço carbono e aços inoxidáveis. Bargani; Ghaini e Mazroi (2016), mostraram que pinos sem esfera e somente com a ponta cônica, apresentaram defeitos na soldagem de pinos SD (tempo e corrente elevados). Isso sugere uma preferência operacional, baseada na experiência acumulada, para a utilização de gás de proteção para este tipo de pino.

- **Ponta fina:** A ponta fina, normalizada pela ISO 13918:2008, quase que exclusivamente utilizada em processos de soldagem por descarga capacitiva ou em subvariantes que requerem menor energia de solda (*short-cycle* ou campo magnético), desempenha um papel fundamental na concentração da energia de soldagem e na iniciação do arco elétrico. Fundamentalmente tem a função de centralizar a ignição do arco.
- **Ponta Abaulada:** A ponta abaulada é primariamente aplicada na variante de soldagem chamada *short-cycle*. Ademais, o baixo ângulo específico projetada na ponta desse tipo de pino desempenha um papel importante ao promover a varredura do arco elétrico com baixa energia sobre sua superfície (REITER; DIBIASI, 2006). Alguns modelos de pinos podem apresentar a ponta abaulada juntamente com uma ponta fina. A Figura 2 mostra alguns modelos de pinos que podem ser aplicados pelas diferentes variantes do SW.

Figura 2 – Exemplos de pinos e anéis cerâmicos utilizados em SW



Adaptado (Stud Master, 2024)

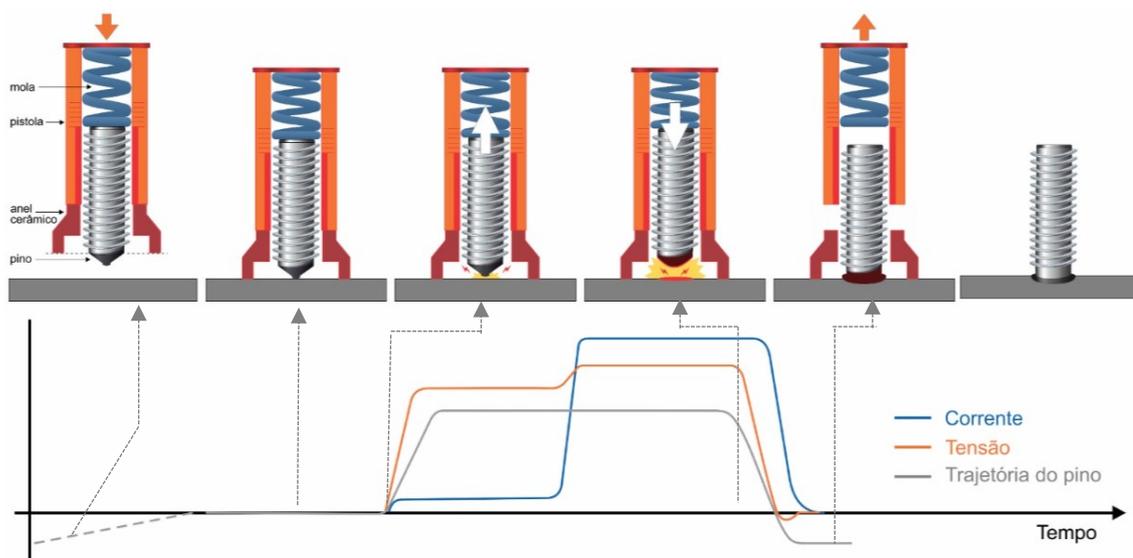
3.2.2 Soldagem de Pinos por Arco Retraído

O processo SW-AR envolve um procedimento sequencial para garantir uma união adequada entre o pino e a peça. A Figura 3 ilustra um esquemático que representa as etapas da soldagem por SW-AR. Inicialmente, ocorre a preparação do equipamento e alimentação da pistola com os consumíveis de soldagem, onde o pino e o anel cerâmico são posicionados na pistola. Em seguida, a pistola é direcionada para o local da soldagem, posicionando o pino na posição desejada. Neste estágio inicial, o pino é parcialmente comprimido por uma mola, criando uma sobreposição de material que será fundida durante o processo de soldagem. Ao pressionar o botão de acionamento da pistola, a fonte de soldagem fornece corrente elétrica controlada para estabelecer o arco elétrico, enquanto um atuador (como um solenóide ou motor) puxa o pino no sentido contrário à superfície da peça. Essa ação de recuo do pino comprime ainda mais a mola dentro da pistola, enquanto existe a geração de um arco elétrico entre a ponta do pino e a superfície da peça. O calor do arco elétrico funde as superfícies em contato, promovendo a fusão completa. Após um tempo

predeterminado (tempo de soldagem), a mola é liberada, permitindo que o pino avance em direção à superfície da peça e mergulhe na poça de fusão.

Por fim, o metal do pino e da peça solidifica, formando a junta soldada que é moldada pelo anel cerâmico. Nesse momento, a pistola de soldagem é afastada e o anel cerâmico é removido, indicando que o processo de soldagem foi concluído.

Figura 3 – Esquemático do processo de Soldagem de pinos por Arco Retraído



Fonte: O autor

O conhecimento básico deste procedimento, que envolve o posicionamento, o estabelecimento do arco elétrico, a fusão das superfícies e a solidificação do metal, é essencial para obter uma solda de qualidade sem a presença de defeitos. Nesse sentido, a soldagem de pinos por arco retraído é um processo amplamente estudado em diversas áreas ao longo dos anos e utilizado em distintos lugares ao redor do mundo. Um exemplo pode ser conferido no trabalho de Chambers (2001), que reuniu as principais informações sobre este processo em formato de artigo, considerando os princípios de funcionamento, materiais utilizados e sua aplicação.

3.2.2.1 Soldagem de Pinos com Anel Cerâmico

A soldagem de pinos por Arco Retraído (SW-AR) pode ser considerada a versão mais versátil do processo SW. Nesta modalidade, utiliza-se no entorno do pino o anel cerâmico, do inglês “*ferrule*” que pode ser traduzido como uma espécie de virola ou ponteira, geralmente fabricado com materiais refratários com percentuais,

aproximados, de misturas de óxidos de alumínio (Al_2O_3 , 35%) e magnésio (MgO , 12%) e dióxido de silício (SiO_2 , 53%). Esses materiais são escolhidos por suas propriedades de resistência ao calor, isolamento elétrico e capacidade de suportar altas temperaturas.

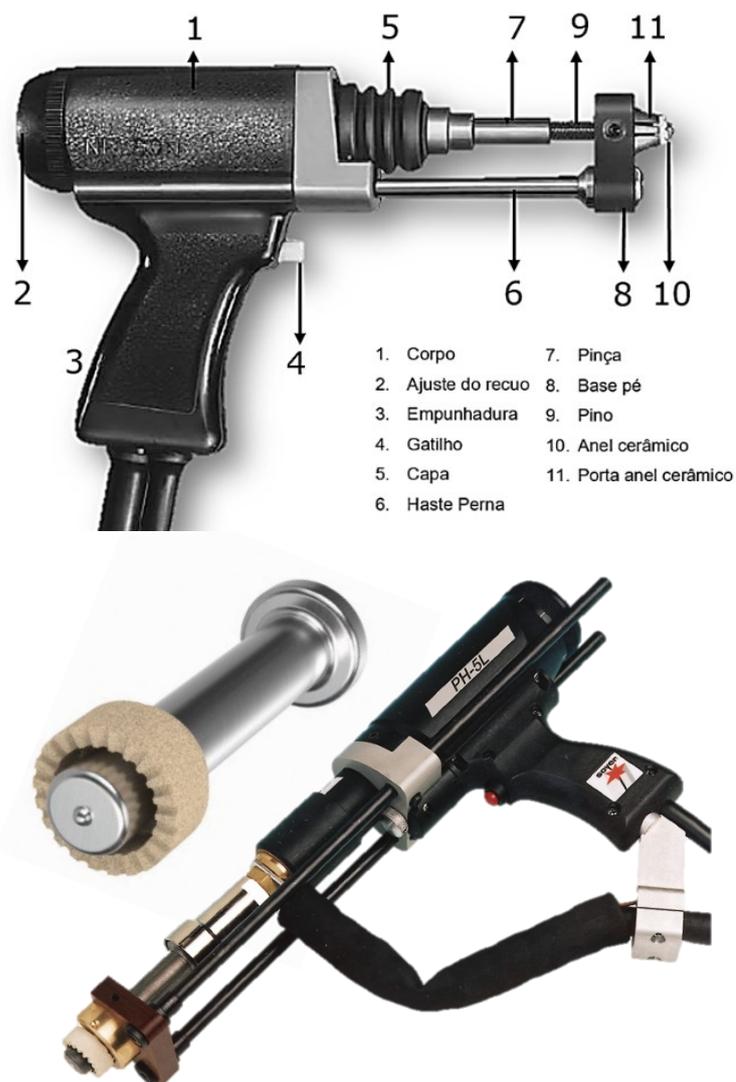
Devido ao seu papel na proteção da solda e ao contato direto com a poça de fusão, é geralmente aconselhável que componentes desse tipo permaneçam em ambientes com umidade controlada. Isso visa evitar a exposição da solda ao hidrogênio, um fator crítico na qualidade do processo de soldagem. Estudos indicam que, em condições ideais de aplicação, as concentrações típicas de hidrogênio para a soldagem de pinos por arco retraído são de aproximadamente 3 ± 1 ml/100g (BRÄTZ; HENKEL, 2020). Apesar disso, foi constatado que os anéis cerâmicos apresentam uma influência relativamente baixa no teor de hidrogênio das soldas de pinos por arco retraído, quando operados em condições atmosféricas normais. A qualidade da solda é significativamente prejudicada apenas quando os anéis cerâmicos forem expostos à umidade por longos períodos, absorvendo quantidades consideráveis de água (CRAMER; BÖHME; JENICEK, 2011).

Além de se comportarem como isolantes elétricos eficazes, e auxiliar na proteção da pistola de soldagem e de seus componentes, os anéis cerâmicos auxiliam no controle e sustentação da poça de fusão, sobretudo em posições forçadas, moldando-a em torno do pino soldado para formar o colar de solda. Também concentram o arco em uma região reduzida sobre a peça, estabilizando-o e reduzindo o risco de sopro magnético além de proteger e ao mesmo tempo expulsar os gases atmosféricos e vapores gerados durante a abertura do arco pelos canais de desgaseificação na parte inferior do anel. Além disso, o anel cerâmico contribui para a redução da taxa de resfriamento da solda e minimiza os efeitos nocivos da radiação promovida pelo arco, protegendo o operador contra possíveis respingos de solda (TRILLMICH; WELZ, 2016). É de importância ressaltar que o anel cerâmico é descartável, sendo ele utilizado, portanto, uma única vez, pois após a soldagem do pino a cerâmica perde parcialmente suas propriedades de expansão, além de acumular impurezas provenientes da solda no seu interior.

Na soldagem por arco retraído com anel cerâmico, é comum utilizar o tipo de pino com a esfera de alumínio na ponta. A presença dessa esfera de alumínio é justificada em itens anteriores do presente trabalho. O pino e o anel cerâmico são inseridos na pistola de soldagem, a qual deve ser específica para variante a arco

retraído. A F ilustra a pistola de soldagem usada nessa variante, bem como, apresenta um esquemático descrevendo as principais partes de uma pistola para soldagem de pinos.

Figura 4 – Representação do pino tipo SD com anel cerâmico, esquemático de uma pistola típica de SW e pistola comercial de soldagem de pinos



Fonte: Adaptado de (GRAINGER, 2023), (SOYER, 2024) e (CHAMBERS, 2001)

3.2.2.2 Soldagem de pinos com gás de processo

Na soldagem a arco, diferentes gases são utilizados para criar um ambiente protegido ao redor do arco elétrico e da poça de fusão. Isso ajuda a prevenir a oxidação e contaminação do metal de solda pela atmosfera. Os gases mais comuns

usados na soldagem a arco incluem Argônio (Ar), Dióxido de Carbono (CO₂) e misturas entre eles. Cada um desses gases confere características distintas ao processo de soldagem, afetando a penetração, a estabilidade do arco, a aparência do cordão de solda, entre outros fatores.

A soldagem de pinos com gás de proteção é uma técnica que garante a integridade e qualidade das soldas exatamente como nos demais processos de soldagem a arco. Além do uso de um anel cerâmico para proteção da poça de fusão, há a possibilidade de empregar um gás no processo viabilizado por um bocal especial, sem a utilização de um anel cerâmico. A utilização de gás desempenha múltiplas funções na soldagem de pinos. Além de proteger o metal fundido do ar atmosférico, um tempo de fluxo apropriado antes da fase de arco (pré-gás) e depois da fase de arco (pós-gás) é necessário para garantir que o ambiente esteja adequadamente protegido antes do início da soldagem e depois, na fase de solidificação do metal. Além disso, uma certa vazão de gás de proteção de 4 a 6 l/min, evita a presença de ar atmosférico na região da poça de fusão, reduzindo a oxidação e minimizando a formação de porosidades indesejáveis. Ele também pode exercer influência na distribuição de calor no arco e diminuir a tensão, a depender do tipo de gás utilizado (TRILLMICH; WELZ, 2016) (DVS, 2000a).

A escolha da composição do gás varia de acordo com o tipo de material a ser soldado. Normalmente são utilizadas misturas que contenham de 75 a 98% de argônio e de 2 a 25% de CO₂. Para aços ao carbono e inoxidáveis, recomenda-se o uso de misturas contendo aproximadamente 72% de argônio e 18% de CO₂. Já na soldagem de alumínio e suas ligas, é obrigatório a utilização de argônio puro ou misturas de argônio e hélio (DVS, 2000b). No entanto, é importante ressaltar que a utilização do gás de proteção sem o anel cerâmico, pode resultar na perda do controle geométrico da poça de fusão e na formação de um colar assimétrico em torno do pino. Esse efeito é especialmente notável em situações em que há poças de fusão mais fluidas que tendem a escorrer em posições forçadas, fora da posição plana ou na aplicação de pinos com diâmetro acima de 16 mm. Nessas circunstâncias, a presença do anel cerâmico é fundamental para manter a integridade geométrica da solda. Por esse motivo, em alguns casos, o uso de um anel cerâmico combinado com a proteção gasosa, pode ser empregada. A Figura 5 ilustra uma pistola típica para soldagem de pinos com gás. Um canal de fluxo gasoso na placa pé e um bocal metálico de grande

diâmetro são as diferenças básicas entre o modelo que usa anel cerâmico e o modelo que utiliza gás

Figura 5 – Pistola típica para soldagem de pinos com gás

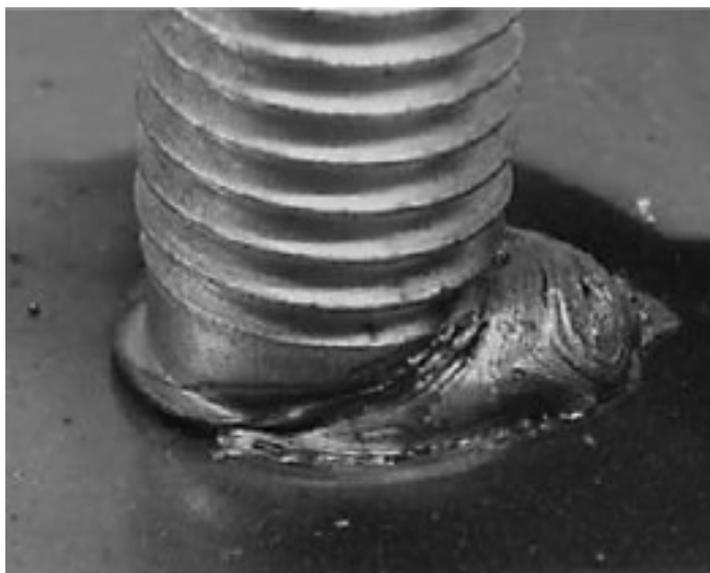


Fonte: (SOYER, 2024)

3.2.2.3 Soldagem de pinos com gás assistido por campo magnético

De maneira similar a vários métodos de soldagem, o processo *Stud Welding* também evoluiu desde sua concepção, adaptando-se às crescentes inovações tecnológicas que emergiram com o tempo. Estudos como este procuram explorar os princípios físicos e os parâmetros que influenciam esse método de soldagem de pinos, com o objetivo de aprimorar a qualidade das juntas soldadas. Em especial, focam-se no desenvolvimento de estratégias avançadas para o controle, o monitoramento e a redução de desafios durante o processo. Um exemplo, em específico, é o desvio do arco, ou também conhecido por sopro magnético (*Arc Blow*) que é um problema corriqueiro neste processo de soldagem, tendo seu efeito prático demonstrado na Figura 6, na soldagem de um pino roscado.

Figura 6 – Resultado típico de uma solda afetada pelo sopro magnético



Fonte: (HBS BOLZENSCHWEISSEN GMBH, 2023)

O sopro magnético é um fenômeno que ocorre na soldagem a arco devido ao desbalanceamento do campo eletromagnético ao redor do arco elétrico, comprometendo a estabilidade e a qualidade da fusão. Esse desvio da coluna do arco pode resultar em soldas assimétricas e falta de fusão, sendo um desafio especialmente em processos que utilizam corrente contínua (CC). Uma das principais causas do sopro magnético está no posicionamento inadequado do aterramento. Quando esses cabos são conectados em apenas um lado da peça, o campo magnético se torna assimétrico, deslocando o arco para uma das direções. A solução é distribuir o aterramento em pontos estratégicos para estabilizar o campo eletromagnético. Além disso, a geometria assimétrica da peça pode alterar a distribuição do campo magnético, desviando o arco para longe da área ideal de fusão.

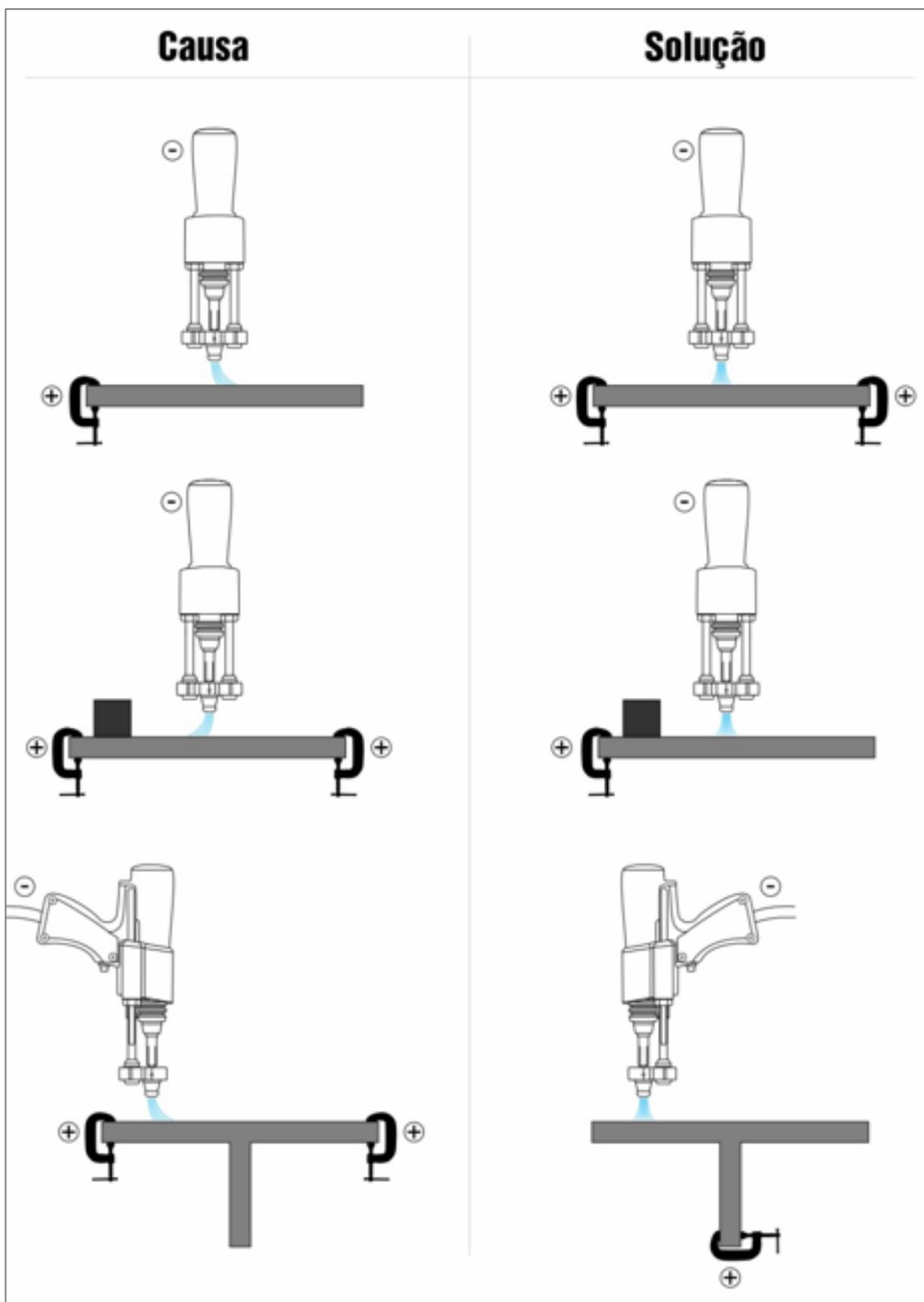
Outro fator relevante é o efeito de borda, em que a proximidade da solda com as extremidades da peça faz com que as linhas de fluxo magnético se concentrem, intensificando o sopro magnético. Além disso, a diferença de massa da peça influencia a estabilidade do arco, especialmente quando há variações significativas de espessura ou quando a peça está conectada a uma estrutura maior. Esse desbalanceamento pode ser mitigado com múltiplos pontos de aterramento ou ajuste da posição do cabo-obra.

Existem várias maneiras de mitigar o sopro magnético, incluindo, usar um controle de corrente pulsada de alta frequência ou corrente alternada (exemplo do

arco submerso ou do *hotwire*) para reduzir a intensidade do campo magnético durante a soldagem. Utilizar dispositivos magnéticos externos para direcionar o campo e minimizar seu impacto no arco também pode gerar sucesso. Adicionalmente, em algumas situações, pode-se empregar técnicas que utilizam gás de proteção para estabilizar o arco e reduzir os efeitos do sopro magnético, ou usar configurações específicas do equipamento de soldagem que ajudam a controlar a forma como o campo magnético afeta o arco.

A Figura 7 mostra algumas das situações citadas, onde é possível verificar as principais causas e possíveis soluções para minimizar o sopro magnético na soldagem de pinos. Percebe-se que a utilização de dois cabos-obra posicionados simetricamente entre a pistola e a distribuição de massa metálica uniforme, próximo à solda, são as principais estratégias para solucionar este problema.

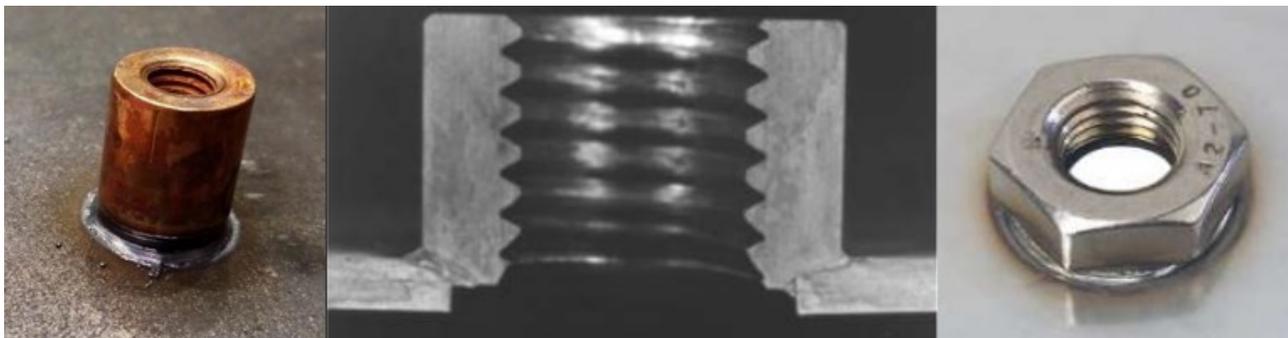
Figura 7 – Representação das causas e soluções para o sopro magnético



Fonte: Adaptado (ISO 14555, 2014)

Além disso, o fato do sopro magnético também pode ser intensificado na soldagem de elementos com furos passantes como porcas, pinos com rosca interna ou pinos ocos (*Hollow Studs*) (Figura 8).

Figura 8 - Exemplos de pinos suscetíveis ao sopro magnético



Fonte: (ZHANG et al., 2021)

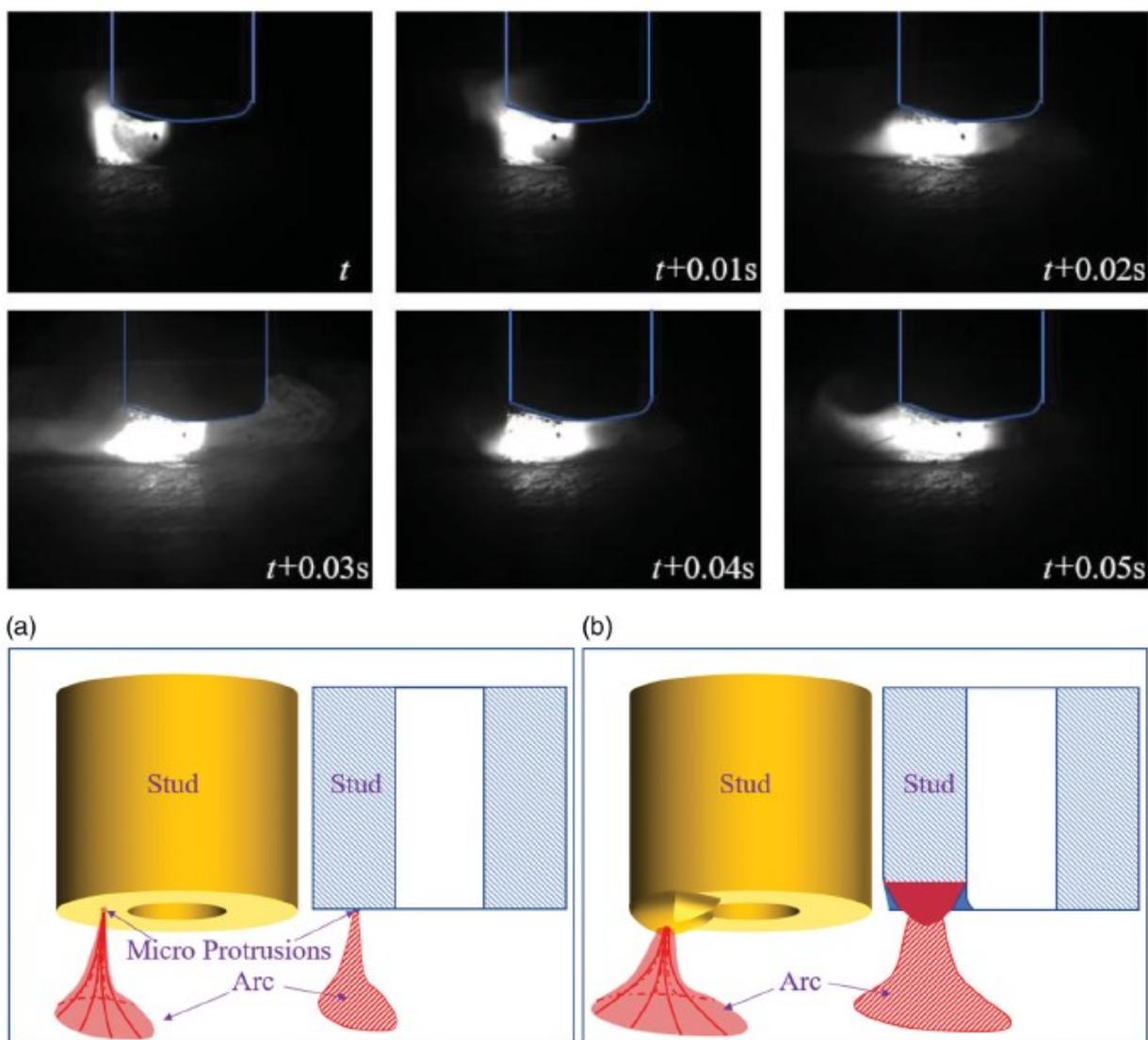
Zhang et al. (2021) cita que a fusão não uniforme do pino ocorre porque micro protrusões na extremidade do pino, criadas durante sua usinagem, fazem com que o arco elétrico se inicie em um desses pontos (Figura 10). Isso leva à fusão localizada que forma um cone invertido devido à gravidade e tensão superficial, fazendo que o arco migre para a ponta desse cone para minimizar o comprimento do arco e a energia do sistema. Para mitigar este problema o autor investiga o impacto do uso de fluxos na melhoria da qualidade da solda no processo. Considerado uma alternativa de baixo custo, no estudo foi utilizado um pó de fluxo de soldagem com uma composição principal de Fe_3O_4 (magnetita), FeO (óxido de ferro) e pó de alumínio para otimizar as influências interativas do pó de fluxo de soldagem e dos parâmetros do processo de soldagem (Figura 9).

Figura 9 – Anel cerâmico com fluxo e resultado da solda



Fonte: (ZHANG et al., 2021)

Figura 10 - Comportamento típico do arco em soldagem de pinos ocos (acima) e diagrama esquemático da atuação do arco na extremidade do pino (abaixo). a) Inicialização do arco b) Fase de arco principal



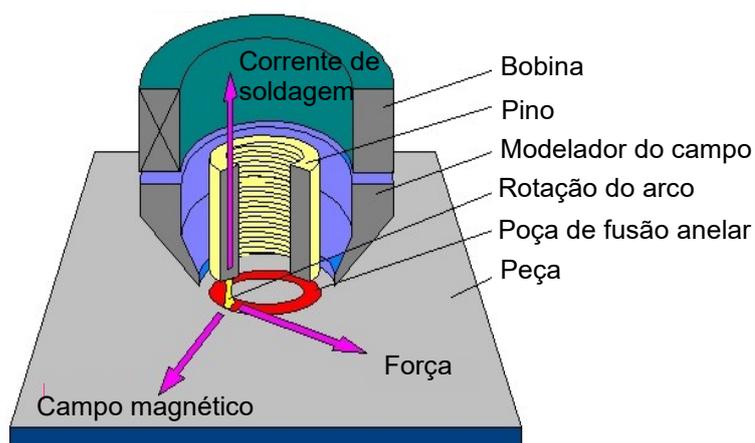
Fonte: (ZHANG et al., 2021)

O formato anelar do pino (eletrodo) não contribui para um bom desempenho do arco em realizar fusão uniforme nesse caso. Esta dificuldade já foi relatada em outros processos como o Plasma-MIG Coaxial, que possui um eletrodo de tungstênio com formato similar ao pino com furo passante (OLIVEIRA, 2006). Devido a sua geometria relativamente complexa para um eletrodo de soldagem, estudos são realizados para tentar identificar e solucionar esta problemática na soldagem de pinos, como os trabalhos de Zhang *et al.* (2022), Cempírek (2021) e Zhang *et al.* (2023). Em todos estes trabalhos, a utilização de técnicas avançadas de controle de arco, como o uso

de campos magnéticos compensatórios, foi empregada como estratégia para reduzir ou eliminar o sopro magnético durante a soldagem de pinos com furos passantes.

A ideia sobre a aplicação de campo magnético que serve gerar um efeito de varredura conferida pelo arco de toda a superfície do pino, mesmo em situações onde os pinos possuem furos passantes ou em soldas de elementos do tipo porcas sextavadas, não é nova. Durante a década de 1990, a empresa alemã *HBS Bolzenschweißen GmbH*, especialista em soldagem de pinos, começou a desenvolver em parceria com a Universidade *Otto von Guericke* de Magdeburgou na Alemanha, uma tecnologia denominada MARC (*Magnetic Rotating Arc*) (Figura 12). A sigla MARC representa arco rotativo magnético, sendo empregada especificamente pela própria empresa HBS para a soldagem de pinos e porcas. A Figura 11 representa um esquemático da empresa para explicar como o arco atua no processo, rotacionando em toda a superfície do pino oco ou de uma porca. Alguns anos depois, um método muito similar, é apresentado pela fabricante alemã *Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH*, também especializada em soldagem de pinos, e foi denominado como *Bolzenschweißen im radialsymmetrischen Magnetfeld* ou SRM, sob a patente nº DE102004051389 (REITER e DIBIASI, 2006).

Figura 11 – Diagrama esquemático do dispositivo de rotação do arco



Fonte: Adaptado (HBS BOLZENSCHWEISSEN GMBH, 2023)

Nestes dois métodos comerciais, a diferença fundamental em relação ao processo a arco retraído tradicional era o uso de um campo magnético explicado como “radialmente simétrico” pela *Soyer GmbH*. Até então, essa era uma nova tecnologia que foi comercializada e fornecida exclusivamente por essas empresas e sua proteção

patentária a tornou pouco comum em outros fabricantes de equipamentos de soldagem.

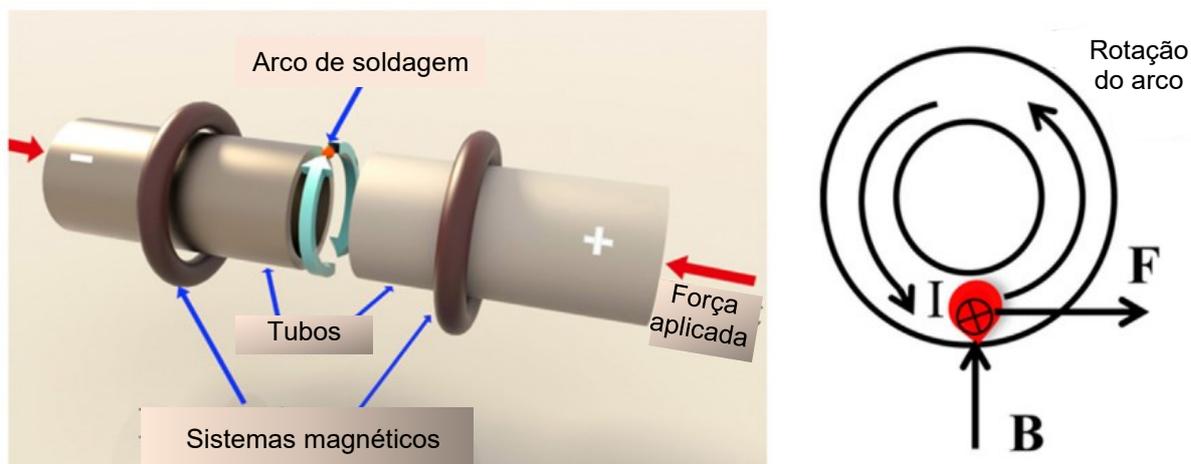
Figura 12 – Representação comercial da tecnologia MARC para SW



Fonte: (HBS BOLZENSCHWEISSEN GMBH, 2023)

Apesar desta inovação tecnológica para soldagem de pinos, o uso de campos magnéticos para auxiliar no processo de soldagem não é exclusivo do *Stud Welding*. As patentes da tecnologia de campo magnético já relatavam sobre a similaridade com o processo de soldagem MBP – *Schweißen*. De acordo com a norma DIN 1910-100:2008-02 e sob número (185), da norma EN ISO 4063 trata-se de um processo de soldagem por pressão e arco elétrico. O processo também é conhecido como soldagem MBL, *Magnetarc* ou MIAB (*Magnetically Impelled Arc Butt Welding*) (KACHINSKIY et al., 2002) (VENDAN et al., 2011). Os componentes a serem soldados são fixados rigidamente no equipamento de soldagem, mantendo uma pequena lacuna pré-determinada entre suas extremidades. Inicia-se o processo com a abertura de um arco elétrico de corrente contínua entre as extremidades dos componentes. Um campo magnético radial estático é aplicado por meio de bobinas instaladas ao redor de cada secção dos tubos, resultando num movimento acelerado do arco ao redor da circunferência da junta, causando o aquecimento e fusão uniforme das extremidades dos componentes. A fase de aquecimento é mantida por alguns segundos e, em seguida, passa-se para o segundo estágio do processo no qual os componentes são unidos mediante a aplicação de uma pressão de recalque predefinida (TWI, 2023). A Figura 13 apresenta um esquemático desta tecnologia.

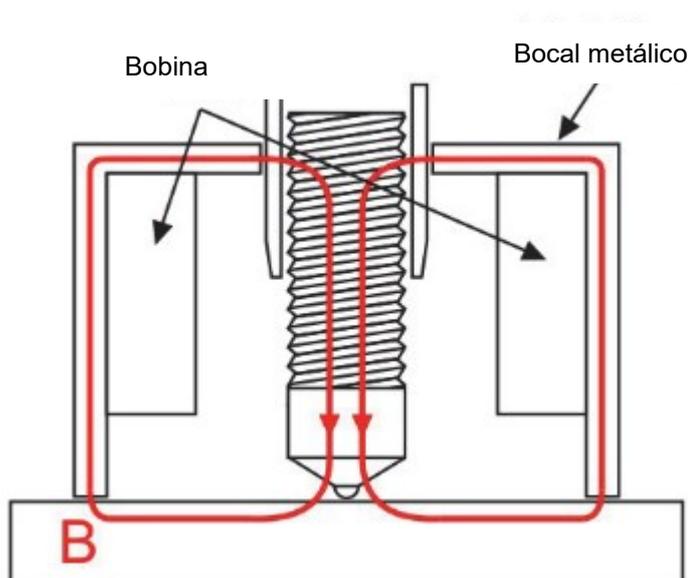
Figura 13 - MIAB - Magnetically Impelled Arc Butt Welding



Fonte: (PENG et al., 2021)

No caso do *Stud Welding* com campo magnético, é empregado um bocal de proteção (sem anel cerâmico), o qual libera automaticamente a vazão de gás que envolve a área de soldagem e alimenta uma bobina com uma pequena corrente elétrica quando o gatilho é pressionado gerando um campo eletromagnético entre o bocal e o pino (Figura 14).

Figura 14 – Princípio da soldagem de pinos com campo eletromagnético (B)



Fonte: (HARTZ-BEHREND et al., 2014)

Os efeitos do campo eletromagnético, como a densidade de corrente gerada pela bobina no bocal durante a soldagem são explicados por Cramer *et al.* (2014) e Hartz-Behrend *et al.* (2014), de acordo com a (1).

$$j_{el} = \frac{I_{el}}{\pi r^2_{const.}} \quad (1)$$

em que:

- j_{el} : é a densidade de corrente elétrica (A/m²)
- I_{el} : é a corrente elétrica total (A)
- $\pi r^2_{const.}$: é a coluna de plasma como um cilindro de raio constante

Após um tempo pré-determinado, o pino é afastado e um arco piloto é iniciado. As etapas subsequentes do processo são semelhantes à soldagem com anel cerâmico, exceto pelo uso do campo magnético gerado por uma bobina elétrica no bocal metálico. Esse campo provoca uma força resultante que atua perpendicularmente ao arco, resultando em um movimento lateral (Equação 2). Esse movimento do arco permite uma fusão uniforme e controlada da superfície do pino e da peça (HARTZ-BEHREND *et al.*, 2014).

$$f_{mag} = j_{el}B \quad (2)$$

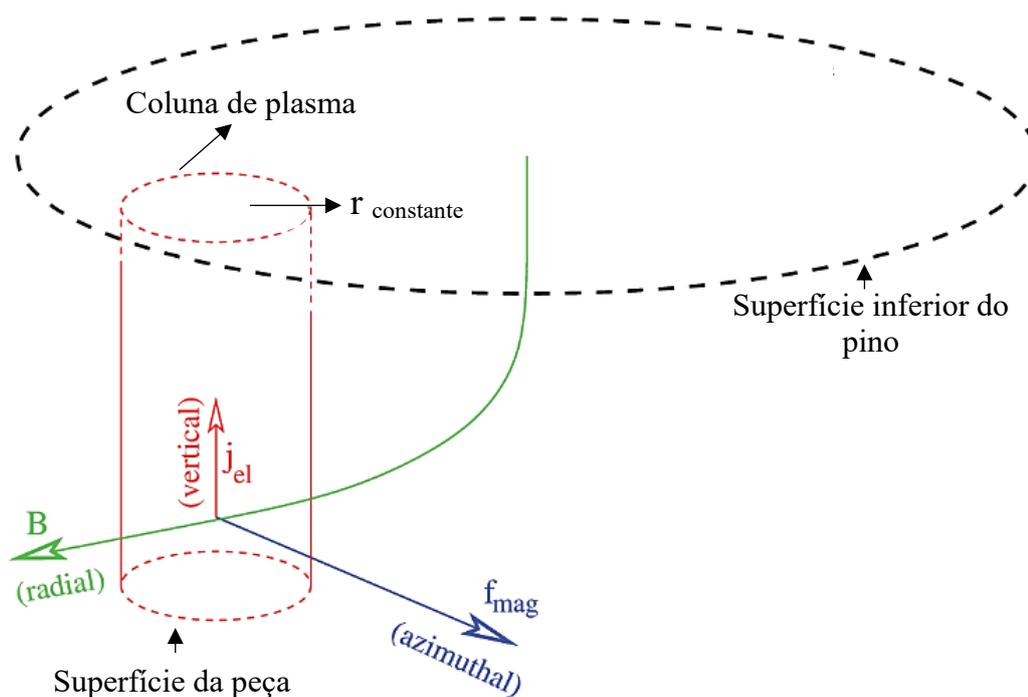
em que:

- f_{mag} : é a força magnética por unidade de volume (N/m³)
- j_{el} : é a densidade de corrente elétrica (A/m²)
- B : é o campo magnético aplicado pela bobina (T, Tesla)

Hartz-Behrend *et al.* (2014) consideram, para efeitos de simplificação, a coluna de plasma como um cilindro de raio constante, transportando uma corrente elétrica estacionária (I_{el}) dirigida para cima, onde o ponto catódico da coluna de plasma situa-se, geralmente, em uma posição deslocada do centro do pino durante a liberação da corrente principal. Um campo magnético (B) produzido pela bobina gera principalmente uma componente radial na parte inferior da coluna de plasma,

apontando para fora (Figura 15). Como resultado, uma força magnética F_{mag} , dada pela (2), é produzida e arrasta o núcleo do plasma de forma tangencial ao diâmetro do pino, gerando assim um movimento aproximadamente circular da coluna de plasma.

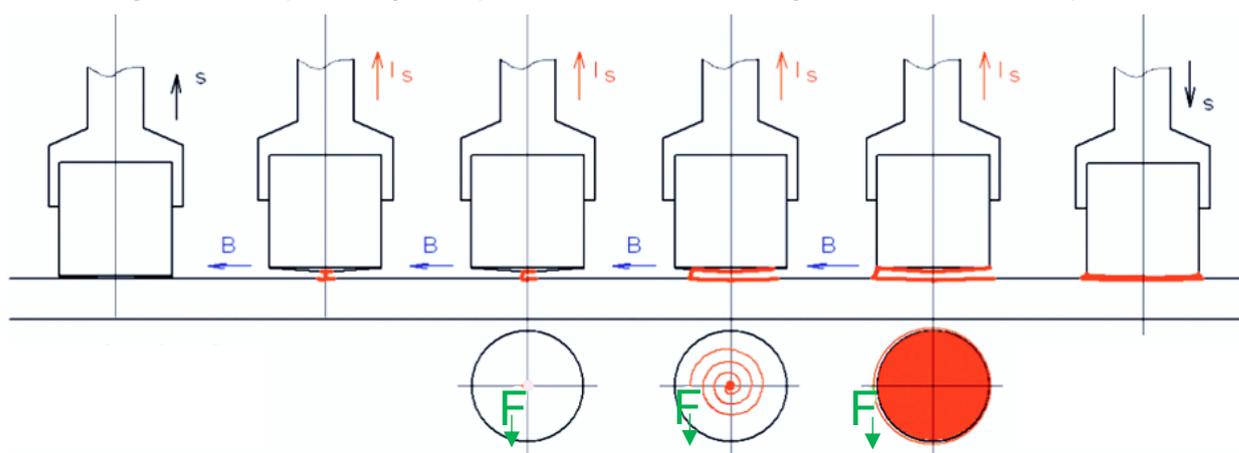
Figura 15 – Diagrama esquemático de F_{mag} atuando na coluna de plasma



Fonte: Adaptado (HARTZ-BEHREND et al., 2014)

Cramer et al. (2014), somente demonstra a inicialização do arco no centro do pino por meio de um esquemático do processo na Figura 16. Na representação, uma inclinação na superfície do pino auxilia o início do efeito de rotação e fusão promovido pelo arco no centro do pino e, posteriormente, promove a fusão uniforme em uma condição de espiral até as bordas. O movimento do arco sob o pino parece minimizar as perdas de energia, resultando em uma maior eficiência da fusão do arco e distribuição uniforme sobre a peça. Como consequência, é possível reduzir os valores de corrente e tempo de soldagem, ao mesmo tempo em que se obtém uma junta de qualidade e com formação do colar conforme exemplificado na Figura 17.

Figura 16 – Representação esquemática do início da rotação do arco e fusão do pino



Fonte: (CRAMER et al., 2014)

Reiter e Dibiasi (2006) mencionam que é imprescindível para este tipo de soldagem que o pino apresente uma superfície com um ângulo de inclinação de $4^\circ \pm 2,5^\circ$. Além disso, na patente do processo também é recomendado que a distância pela qual o pino é afastado da superfície da peça (valor do recuo), varie entre 1 e 2,5 mm, no máximo. Embora o texto da patente não forneça uma explicação mais detalhada sobre a tecnologia, menciona-se apenas que esse ângulo na face do pino, combinado com a aplicação do campo magnético, permite uma varredura completa da superfície do pino pelo arco, iniciando-se a partir do centro. No entanto, não são fornecidos detalhes adicionais sobre o motivo específico para essa configuração angular, tampouco foram encontrados trabalhos na literatura que comprovem os reais benefícios decorrentes dessa abordagem.

Para estudar os efeitos provocados pelo campo magnético, Zhang et al. (2023) também desenvolveram um dispositivo experimental, similar aos comerciais, para aprimorar o movimento do arco de soldagem. De acordo com os resultados, devido à aplicação da força magnética, foi constatada a uniformidade da fusão na face do pino, redução na ocorrência de defeitos de falta de fusão localizada e porosidade. Em outro estudo, Zhang *et al.* (2022) afirma que esta técnica também refinou o tamanho de grão na solda e alterou as propriedades mecânicas devido ao menor aporte térmico à peça e à uma taxa de resfriamento mais lenta.

De fato, há notáveis diferenças entre a soldagem de pinos com anel cerâmico e a soldagem de pinos assistida por campo magnético, sobretudo no quesito de penetração (CRAMER et al., 2014). A análise da seção transversal, como mostrada na Figura 17, revela essas distinções de forma clara. Conforme indicado nas

legendas, a soldagem assistida por campo magnético demandou uma energia de soldagem mais baixa, aproximadamente 6 kJ, em comparação com a soldagem tradicional de pinos com anel cerâmico, que exigiu cerca de 20 kJ. É importante ressaltar que o impacto direto de uma energia de soldagem mais elevada envolve contrações térmicas e uma zona fundida ligeiramente maior devido ao maior aporte de energia. Além disso, a soldagem com anel cerâmico impõe limitações quanto à espessura da peça soldada devido ao calor gerado no verso da chapa durante o processo. Por outro lado, ao utilizar a assistência do campo eletromagnético na soldagem de pinos, é possível reduzir o aporte térmico, o tempo de soldagem e, conseqüentemente, a temperatura no verso da chapa.

Figura 17 – Comparação da seção transversal entre a soldagem de pinos assistida por campo magnético e com anel cerâmico



*Solda assistida com campo magnético
(Zona fundida menor);
Energia de soldagem: 6,0 kJ;
Corrente e tempo de soldagem: 1170 A; 220ms;
Tensão resultante: 23 V
Corrente na bobina: 1,1 A
Gás: Ar + 18%CO₂*

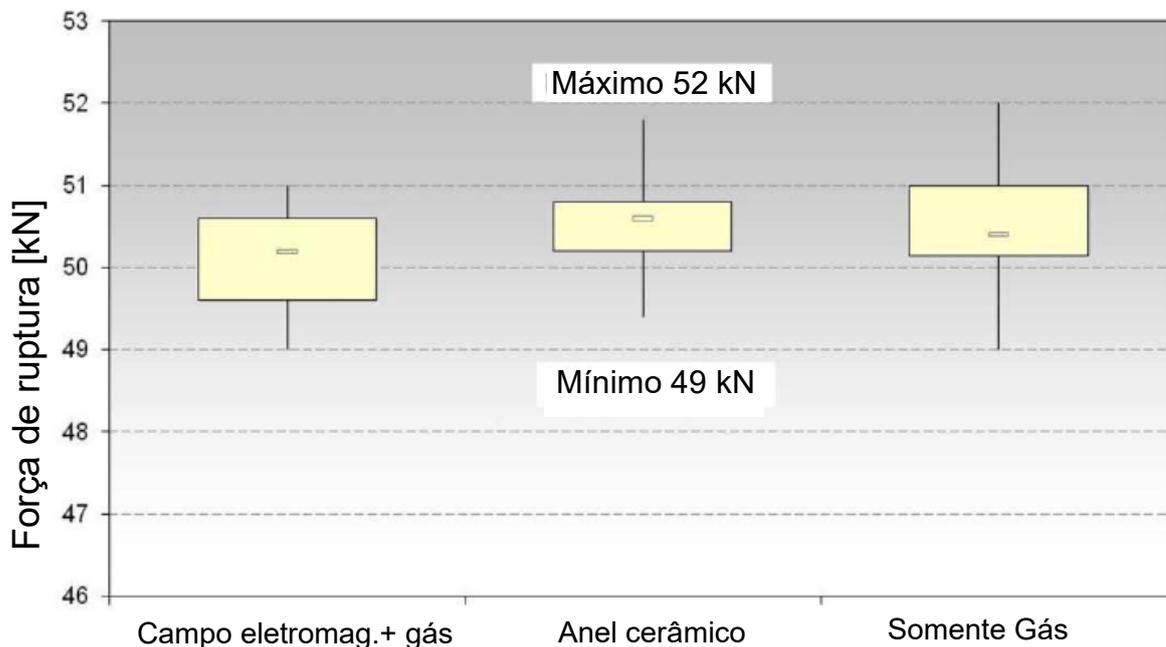


*Solda com anel cerâmico
(Zona fundida maior)
Energia de soldagem: 20 kJ;
Corrente e tempo de soldagem: 1360 A; 560ms;
Tensão resultante: 26 V*

Fonte: Adaptado (JENICEK; REITER, 2011)

Mesmo com formas reduzidas se comparadas ao processo realizado com anel cerâmico ou bocal de gás, a junta formada pelo processo com campo magnético apresenta propriedades mecânicas similares aos demais e consideradas adequadas (Figura 18).

Figura 18 - Estatísticas dos testes de tração comparativos de soldagem de pinos M12 nas três versões distintas do arco retraído



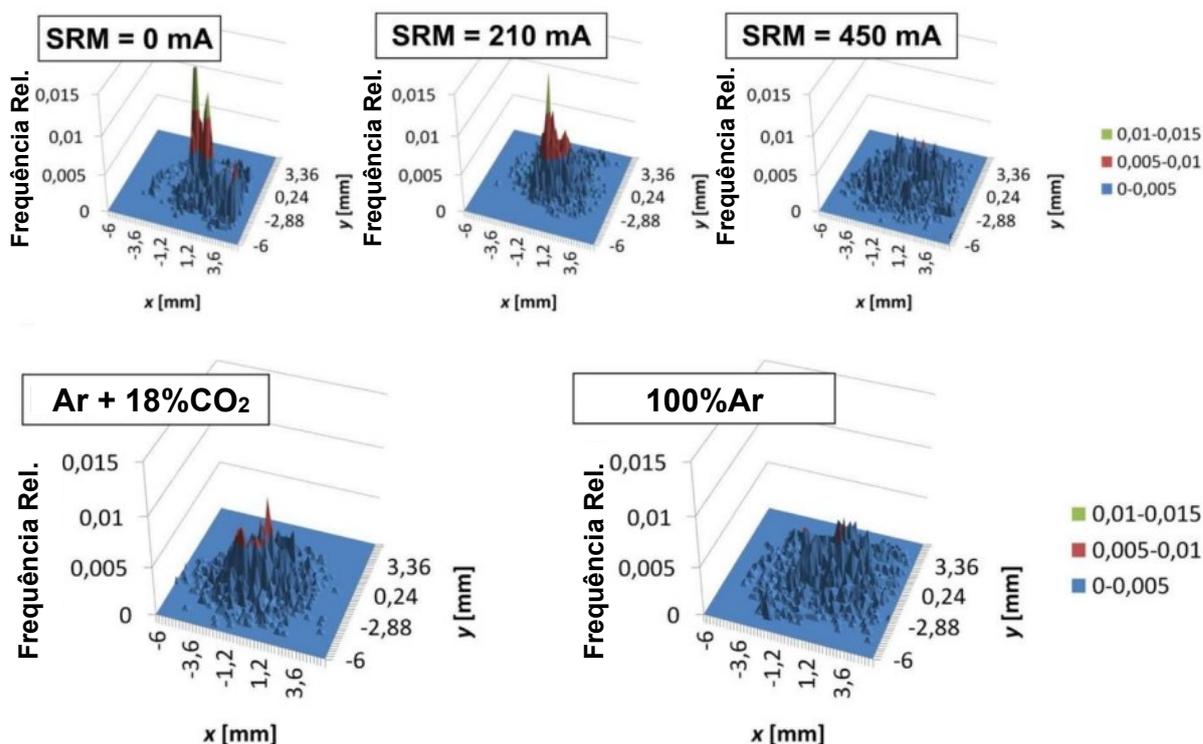
Fonte: Adaptado (JENICEK; REITER, 2011)

Trillmich e Welz (2016) citam que, durante o processo, a velocidade de rotação do arco na soldagem de pinos varia entre 30 e 60 m/s, sendo que esse valor aumenta proporcionalmente com o aumento da corrente que flui através da bobina no bocal. Essa velocidade de rotação do arco é uma característica importante, pois influencia diretamente o processo de soldagem e seus resultados, sobretudo a formação do colar de solda. Além disso, a influência do movimento do arco pode ser afetada por outros fatores, como o tipo de mistura gasosa utilizada durante o processo de soldagem e o material que está sendo soldado.

Jenicek *et al.* (2009), avaliaram por meio de *software* específico os efeitos do campo magnético na distribuição do arco a peça. Embora a metodologia para a obtenção dos resultados, apresentados sob a forma de histogramas, não tenha sido detalhadamente explicada, eles mostram que, à medida que a corrente da bobina aumenta, ocorre um aumento na área em que o arco incide sobre a peça, incluindo a superfície do pino. Com correntes menores, ou até mesmo sem a aplicação da corrente na bobina, é evidente a concentração do arco em um ponto isolado na superfície da peça (Figura 19). Outro ponto estudado foi a comparação entre o uso de duas misturas gasosas diferentes - uma contendo 18% de CO₂ e outra de argônio

puro – que também revelou diferenças na distribuição do arco sobre a peça. Essas observações evidenciam a importância de considerar tanto a corrente aplicada quanto o tipo de mistura gasosa utilizada, pois ambos podem afetar a movimentação do arco e, conseqüentemente, a área fundida.

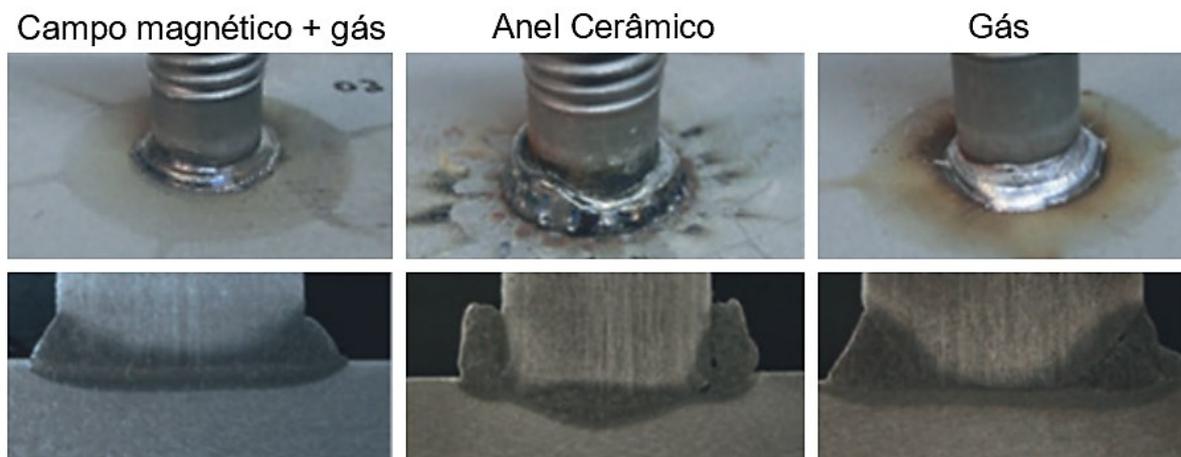
Figura 19 – Medição da frequência relativa de incidência do arco na superfície da peça



Fonte: Adaptado (JENICEK; REITER, 2011)

Por fim, a Figura 20 apresenta um resultado final das três possibilidades de soldagem por arco retraído. Cada coluna mostra o resultado da soldagem usando diferentes técnicas: com campo magnético, com anel cerâmico e com gás. Pode-se observar na imagem que o colar de solda parece mais uniforme e controlado com o uso do campo magnético e gás, enquanto o anel cerâmico proporciona um perfil de solda mais alto e estreito.

Figura 20 – Comparativo entre técnicas de soldagem de pinos por arco retraído.



Fonte: Adaptado (CRAMER et al., 2014)

3.2.3 Variáveis Tecnológicas e Parametrização da Soldagem de Pinos

O processo *Stud Welding* é muito mais dependente da adequada regulagem dos parâmetros de soldagem do que uma exímia habilidade manual do soldador. Neste sentido, quatro parâmetros, dentre outros, são fundamentais para o correto funcionamento do processo: corrente, tempo de soldagem, protrusão e recuo. Além destes parâmetros reguláveis no equipamento, o valor da tensão, que é uma variável que não se regula, também é um dado extremamente importante para operacionalização do processo *Stud Welding*. A Figura 21 ilustra um exemplo desses quatro parâmetros reguláveis e fundamentais que foram extraídos de catálogo técnico de um fabricante de equipamentos de SW. A tabela varia os parâmetros conforme o diâmetro do pino entre 6 mm a 14 mm. Se a regulagem destes parâmetros estiver fora de especificação, a solda será comprometida.

O entendimento sobre o inter-relacionamento entre essas variáveis é fundamental, e é alvo de pesquisas há muito tempo. De fato, na Figura 21, existem relações diretamente proporcionais de acordo com o diâmetro e tipo de proteção usada no pino. No entanto, também existem relações que não seguem um padrão esclarecido. Uma forma de entender o comportamento destes sinais é por meio do uso de equipamentos específicos de medição e monitoração de processo.

A estabilidade do processo SW pode ser analisada por meio do monitoramento da corrente, tensão e deslocamento através de um sistema de monitoramento *online*, que registra os sinais durante o processo (SAMARDŽIĆ; KLARIĆ; SIEWERT, 2007).

Figura 21 – Valores de referência sugeridos à parametrização do SW por arco retraído demonstrando valores indicados para o a) diâmetro do pino; b) protrusão; c) recuo; d) tempo; e) corrente

a)		Para pinos de acordo com a norma DIN EN ISO 13918									
		6		8		10		12		14	
b)		~2.5	~3	~2.7	~3.5	~2.8	~4	~3	~4.2	~3.2	~4.5
c)		~1.5	~1	~1.6	~1.2	~2	~1.3	~2.3	~1.5	~2.6	~1.8
d)		~ 120		~ 200		~ 250		~ 350		--	
	Tempo =ms 	~ 200		~ 250		~ 350		~ 500		~ 600	
e)		~ 450		~ 550		~ 800		~ 1000		--	
	Corrente =A 	~ 350		~ 500		~ 700		~ 900		~ 1000	

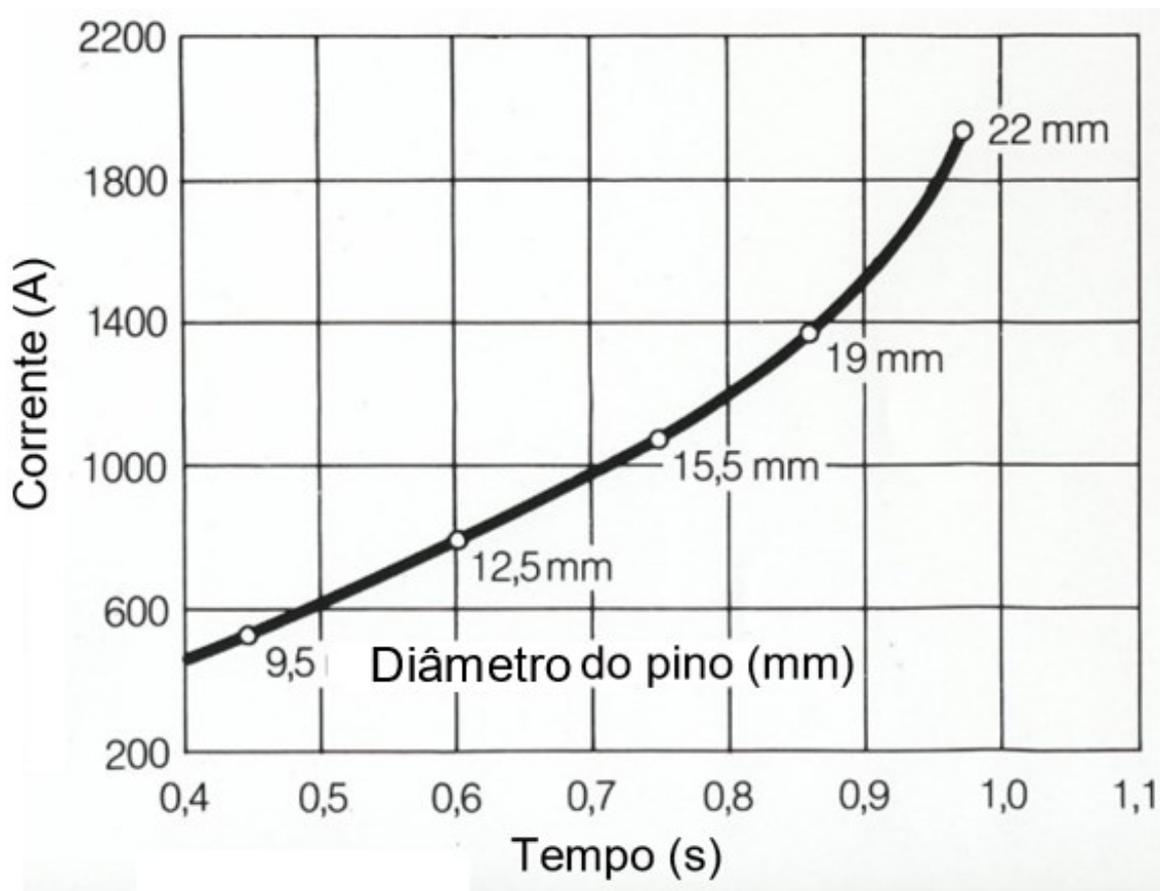
Fonte: Adaptado (SOYER GMBH, 2006)

3.2.3.1 Parâmetros de Corrente e Tempo

A corrente de soldagem é talvez o parâmetro mais crítico. Indiretamente, ela determina a quantidade de calor gerado durante o processo de soldagem, influenciando a fusão do pino e da peça. Uma corrente muito alta pode levar à fusão excessiva do material ou deformações e perfurações na peça, enquanto uma corrente muito baixa pode resultar em uma solda com falta de fusão e incompleta. A tensão em particular é um bom indicador da estabilidade do arco e, conseqüentemente, do resultado final da solda. As alterações na leitura de tensão podem refletir mudanças na resistência elétrica, potência, comprimento do arco e sua estabilidade.

O tempo, refere-se à duração da passagem de corrente durante a soldagem. Sua regulação adequada é essencial para garantir que o calor necessário seja aplicado, permitindo que o pino se funda corretamente ao material de base com a energia imposta. Normas tradicionais sobre este processo, como a ISO 14555:2014 e alguns catálogos técnicos, indicam um valor aproximado para a corrente de soldagem, o qual é estimado de acordo com o diâmetro do pino, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Recomendação técnica para parametrização de corrente e tempo de soldagem de acordo com o diâmetro do pino



Fonte: (Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH, 2006)

Assim como nos outros processos de soldagem a arco como o MIG/MAG e o TIG, que podem ter o seu parâmetro de corrente (I) estimado de acordo com o diâmetro do eletrodo (d), na soldagem de pinos também é possível inferir um valor inicial de referência, calculada de acordo com a 3 e 4:

$$I = 80 \times d \quad \text{para } d \leq 16 \quad (3)$$

$$I = 90 \times d \quad \text{para } d > 16 \quad (4)$$

O valor do tempo de soldagem (t_s) também é estimado de acordo com o diâmetro do pino (d), por meio da 5 e 6:

$$t_s = 0,02 \times d \quad \text{para } d \leq 12 \quad (5)$$

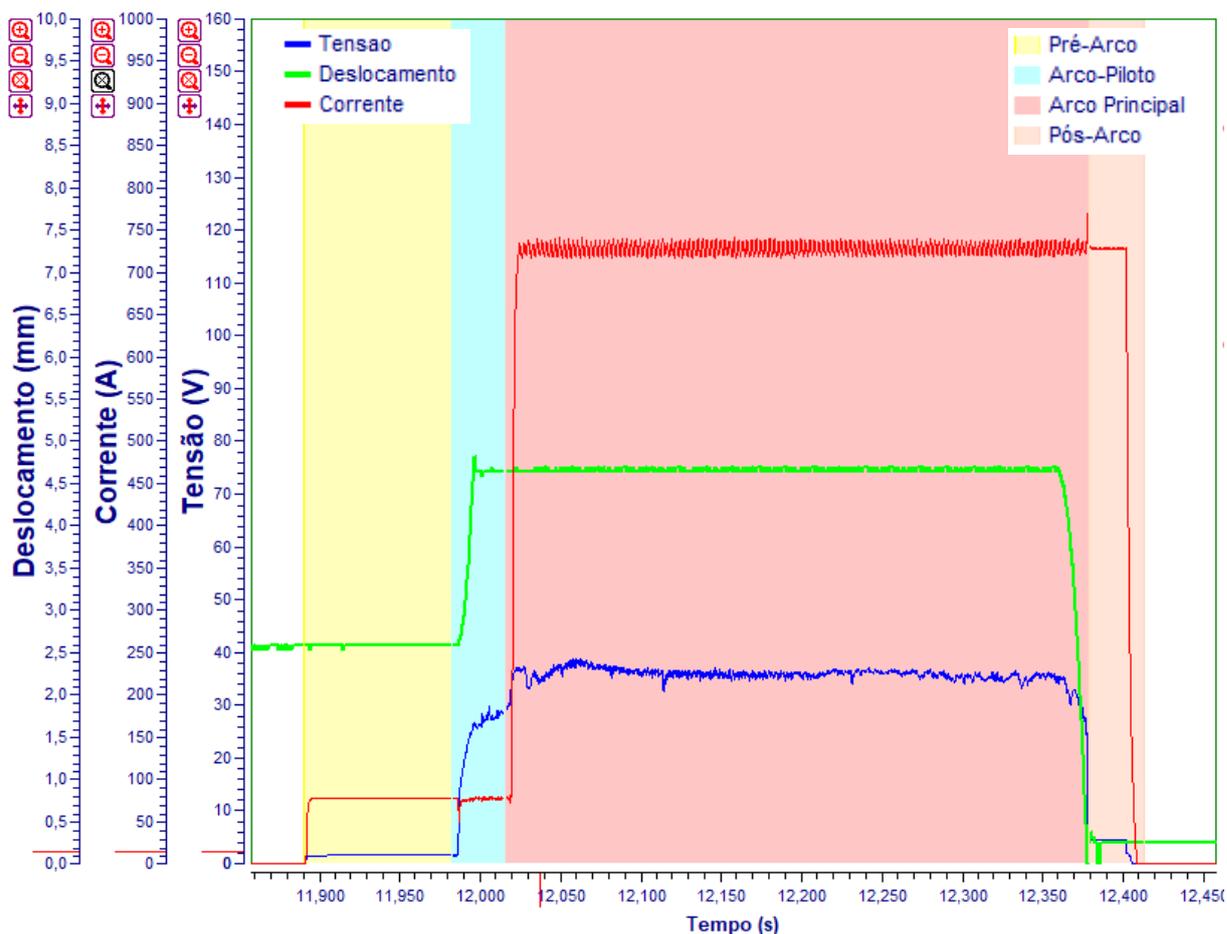
$$t_s = 0,04 \times d \quad \text{para } d > 12 \quad (6)$$

A configuração ideal da corrente também está intrinsecamente ligada ao tipo de anel cerâmico utilizado. Anéis justos, com uma folga estreita entre o pino e o colar cerâmico ou um pequeno diâmetro, exigem uma corrente menor em comparação com colares mais amplos. A combinação de anéis estreitos com corrente relativamente alta tendem a criar respingos, dificultando a penetração do pino. Em contrapartida, com anéis cerâmicos maiores e uma corrente relativamente baixa, frequentemente forma-se um colar de solda incompleto. Embora pinos e anéis da mesma marca geralmente se ajustem bem, é comum que pinos e anéis de tipos diferentes, provenientes de fornecedores distintos, sejam combinados (TRILLMICH; WELZ, 2016).

O tempo de soldagem desempenha um papel essencial na penetração da fusão e no volume do material fundido. Em conjunto com a corrente, ele determina o tamanho da poça de fusão. Para a soldagem de pinos com anel cerâmico, os valores recomendados variam entre 20 e 40 ms para cada um milímetro do diâmetro do pino (6). Em situações especiais, como na soldagem de pinos através de *decks*, esses valores podem ser ainda maiores. Na soldagem na posição plana, esses valores podem ser aumentados para uma desgaseificação mais eficaz de revestimentos, sem causar problemas. Uma prática comum é utilizar 65 ms/mm do diâmetro do pino com uma redução de cerca de 20% na corrente ao soldar sobre tintas isolantes (*primers*) (TRILLMICH; WELZ, 2016).

Embora as orientações dos fabricantes de equipamentos de soldagem de pinos sejam por vezes variadas, é possível realizar a soldagem manual de forma segura utilizando tempos que variam de 100 a 1000 milissegundos para pinos com diâmetros de 10 a 22 mm (JENICEK; CRAMER, 2003). Para ilustrar os tempos e intensidade das variáveis de corrente, tensão e deslocamento do pino em uma condição real de soldagem, um oscilograma do processo é mostrado na Figura 23. Analisando o oscilograma, pode-se descrever de maneira detalhada as etapas, a partir do tempo de soldagem, que indicam cada fase do processo SW por arco retraído.

Figura 23 – Oscilograma típico do processo SW por arco retraído evidenciando as principais fases durante o procedimento em operação



Fonte: O autor

Conforme o seccionamento das diferentes regiões de um oscilograma típico do processo SW por arco retraído (*drawn-arc*) da Figura 23, o processo pode ser classificado por diferentes fases durante a soldagem completa, são elas:

- **Pré-Arco (Amarelo):** Fase onde o pino está posicionado sobre a peça (PSP) antes da ignição do arco e após pressionar o gatilho da pistola. Existe um tempo curto com certo nível de corrente para assegurar que o contato inicial seja suficiente para a ignição do arco piloto e que o pino não fique preso na peça por meio de uma microsolda ocasionada por um descarregamento de corrente.

- **Arco-Piloto (Azul):** O arco piloto é fundamental para estabilizar o processo antes da abertura do arco principal. Ele serve para pré-aquecer a ponta do pino, criando uma fusão incipiente e condições ideais para a abertura do arco principal. Comumente, são utilizadas correntes entre 50 A a 100 A, e tempos entre 40 e 100 ms. É durante essa fase que se inicia o movimento do pino para a sua posição de recuo regulado.
- **Arco Principal (Vermelho):** Considerada a principal etapa da soldagem. Durante o arco principal, a corrente de maior patamar (normalmente a corrente regulada na fonte) é liberada, intensificando a fusão do pino, em polaridade negativa, e do material de base. É comum que o tempo de soldagem regulado seja controlado a partir deste ponto. A corrente principal é sincronizada com a movimentação do pino que deve acontecer em um tempo menor ou igual a aplicação da corrente principal. Também é nessa fase da soldagem que podem acontecer os principais problemas como curtos circuitos e sopro magnético.
- **Pós-Arco (Bege):** Começa quando o pino inicia o deslocamento de encontro e toca na peça. Após a extinção do arco, inicia-se o período de resfriamento. É a fase que começa a formação do colar de solda. Em alguns equipamentos, é possível manter o fornecimento de corrente de soldagem para pós aquecimento por efeito joule.

Ao observar o oscilograma do processo de soldagem de pinos por arco retraído, percebe-se uma relação direta entre os parâmetros elétricos (tensão e corrente) e mecânicos (protrusão e recuo) e as fases do processo. O deslocamento do pino, é acompanhado de perto pela corrente e tensão. Conforme esperado, a corrente constante durante a maior parte do processo, mostra o controle da fonte de energia sobre a corrente. Por outro lado, uma variação da tensão ao longo do tempo pode ser um indicativo das mudanças no circuito elétrico, como a resistência e o comprimento do arco, que variam com a fusão e o movimento do pino.

A sincronização entre o tempo de imposição de corrente e o movimento do pino é um fator crítico. Conforme Trillmich (2021) um defeito denominado como "*cold plunge*" (Figura 24) pode acontecer se o pino descer após o tempo a fase de arco

principal. O mergulho frio é um defeito onde o pino não se funde adequadamente com a peça de trabalho durante a fase de arco principal, resultando em uma camada de óxido que pode levar a uma fusão insuficiente. Isso geralmente não é detectável por uma inspeção visual.

Figura 24 – Defeito do tipo *Cold Plunge*

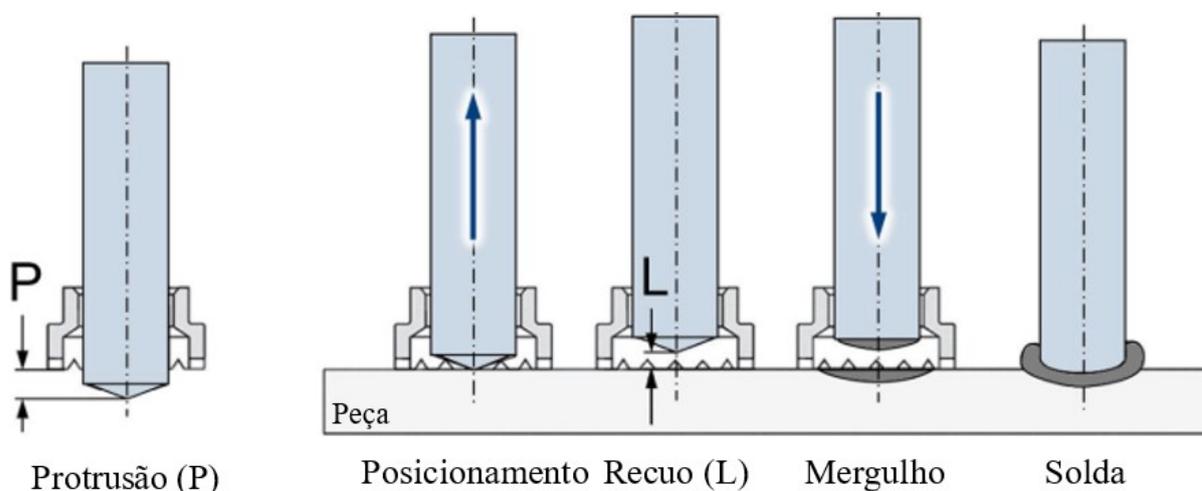


Fonte: (TRILLMICH, 2021)

3.2.3.2 Parâmetros de Protrusão e Recuo

Além das variáveis de corrente e tempo, no âmbito do *Stud Welding*, a regulação da pistola emerge como um elemento determinante para evitar deficiências no procedimento de soldagem e no resultado da solda, tais como mordedura, escorrimento excessivo do colar de solda, falta de fusão, fusão excessiva e respingos, além de desvios do arco elétrico, a exemplo do sopro magnético. Dentro dos parâmetros manipuláveis pelas pistolas comerciais mais comuns, dois desempenham função primordial no desdobramento do processo: a Protrusão e o Recuo do pino. A Figura 25 ilustra estes dois parâmetros durante um procedimento de soldagem de pinos.

Figura 25 – Esquemático dos parâmetros da pistola e movimentação do pino durante a soldagem



Fonte: Adaptado (BRÄTZ; HENKEL, 2023)

A protrusão refere-se à distância axial entre a extremidade do pino que entra em contato com a peça e a extremidade do anel cerâmico quando a pistola se encontra em repouso, ou seja, com o pino totalmente avançado.

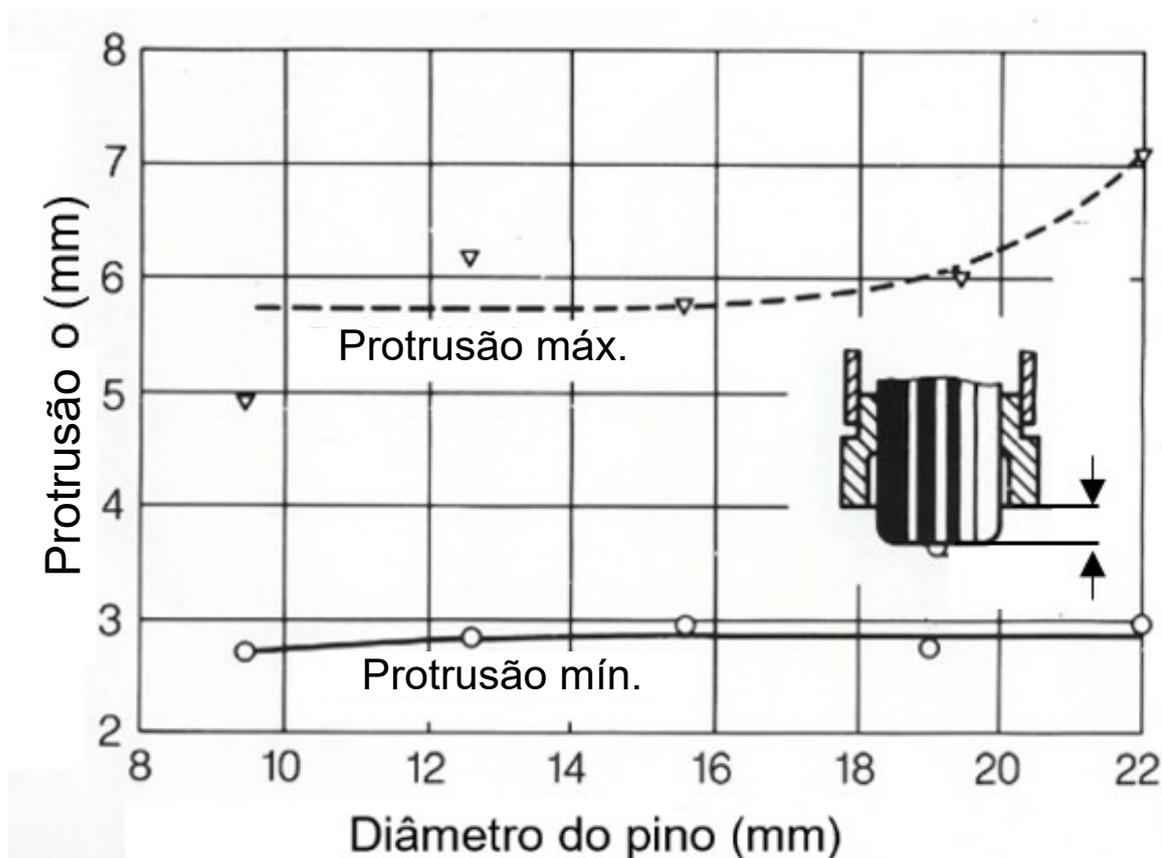
Este é o primeiro parâmetro a ser ajustado na pistola. A literatura acerca do *Stud Welding* sublinha a importância deste parâmetro, destacando sua relação intrínseca com a penetração da solda a partir de uma deformação prévia da mola durante a configuração da pistola para a soldagem. Tal deformação, tem repercussões diretas na qualidade da junta soldada, influenciando características fundamentais como penetração e velocidade de deslocamento do pino até o substrato. Na soldagem por arco retraído o pino é mergulhado (*plunged*) submetido a uma força normalmente abaixo de 100 N e a uma velocidade média entre 100 e 200 mm/s (ISO 14555, 2014). No entanto, em pistolas que possuem acionamento do pino por meio de eletroímã com retorno por mola, o mergulho pode ser considerado um parâmetro resultante, diretamente influenciado de acordo com a protrusão regulada devido ao encolhimento e a energia potencial da mola. Além disso, em alguns modelos, é possível empregar um amortecimento durante a descida do pino. A quantidade certa de amortecimento deve ser determinada por meio de soldas experimentais. Em dispositivos com movimento controlado, a velocidade de mergulho pode ser definida antes de iniciar a soldagem, assim como outros parâmetros, e posteriormente controlada durante o processo. Geralmente, para realizar soldas de pinos de grande diâmetro (acima de 14 mm), é comum utilizar pistola que possuem um sistema de amortecimento, composto

por algum tipo de atuador hidráulico ou pneumático, para que haja redução da velocidade durante a descida do pino.

Em pistolas comerciais comuns, a protrusão é um parâmetro facilmente ajustável. Comumente, esse parâmetro é regulado por meio do deslocamento linear do conjunto de hastes em uma bucha fixa na pistola, sendo verificado por gabaritos ou instrumentos de medição apropriados. Já o mergulho, que envolve o movimento do pino, depende de fatores ligados diretamente ao tipo de acionamento da pistola como características elétricas do eletroímã, projeto da mola de retorno e características dinâmicas dos motores em pistolas especiais. Outro fator determinante é o diâmetro do pino utilizado. Diâmetros diferentes resultam em configurações diversas, influenciando diretamente na formação do colar de solda. A ponta de ignição também é um fator determinante para o processo. Se a ponta do pino for cônica, por exemplo, a protrusão deve ser sempre maior que a altura do cone para que não haja falta de material para o colar. A aplicação também pode determinar o sucesso do procedimento. Em aplicações especiais, como na soldagem *steel deck*, onde os pinos atravessam uma chapa de aço galvanizado (*decks*) e fixam-na em vigas metálicas da construção civil, a protrusão deve compensar a espessura do *deck* metálico além da protrusão recomendada (ADONYI, 2006).

Nesse contexto geral, entende-se que o termo mais apropriado para este parâmetro realmente seja protrusão do pino e será usado nos itens posteriores do presente trabalho. A Figura 26 ilustra uma recomendação de valor de protrusão conforme o diâmetro do pino, onde são apresentados valores aproximados mínimos e máximos. Para realizar a medição da protrusão utilizando instrumentos apropriados, é essencial considerar a superfície do anel cerâmico e a face plana da ponta do pino, especialmente quando este apresenta alguma ponta de ignição, como uma esfera de alumínio ou outra extremidade metálica.

Figura 26 - Recomendação técnica para parametrização de protrusão mínima e máxima de acordo com o diâmetro do pino



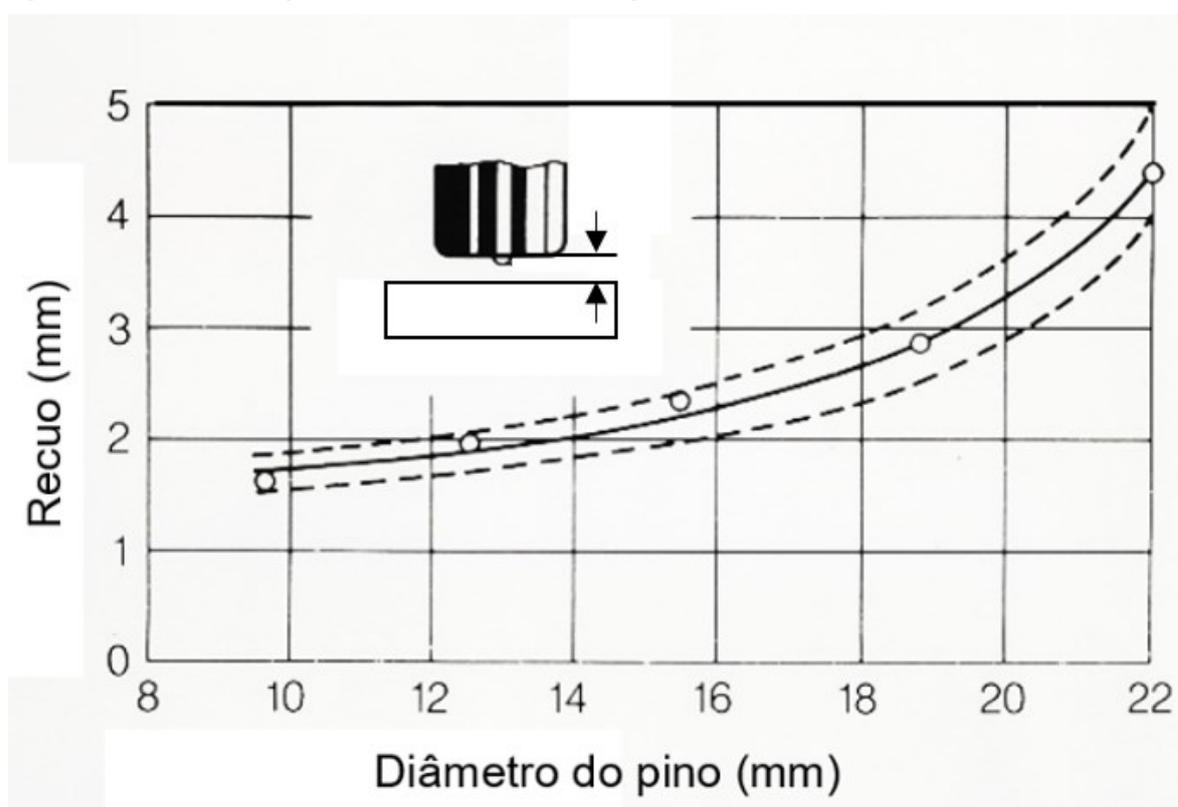
Fonte: (Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH, 2006)

O segundo parâmetro dimensional de significativa relevância é o recuo, cuja determinação ocorre quando a pistola atinge o término de seu curso de retração, posicionada para a soldagem e com o gatilho acionado. O pino é colocado sobre a peça sendo levantado por meio da força de um eletroímã e, após um tempo predeterminado para soldagem, o pino é movido em direção à peça, tentando alcançar o valor de protrusão regulado, por meio de força armazenada numa mola assim que o ímã é desligado. Sendo assim, o recuo corresponde à distância axial entre a extremidade do anel cerâmico ou do bocal de gás (ou a superfície do substrato) e a extremidade do pino quando este atinge sua posição máxima de retração, observado na Figura 25.

Como este parâmetro representa o afastamento entre o pino e a peça após o acionamento do gatilho, denotando a condição de comprimento máximo do arco principal, o valor da tensão tem uma relação direta com ele. No processo SW a corrente elétrica é mantida constante pela fonte de soldagem e a tensão varia de

acordo com o comprimento do arco (recoo do pino), material, nível de corrente e tipo de proteção gasosa. No entanto, a tensão média do arco permanece em patamares da ordem entre 25 a 40 V na soldagem com anel cerâmico e normalmente apresenta uma diminuição de 10% na soldagem sob gás de proteção (TRILLMICH; WELZ, 2016). Impurezas superficiais, como óleo ou graxa e nível elevado de oxidação da peça também aumentam a tensão do arco, enquanto gases inertes a reduzem (ISO 14555, 2014).

Figura 27 - Recomendação técnica para parametrização do recoo de acordo com o diâmetro do pino



Fonte: (Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH, 2006)

Deve-se salientar que a relação entre o recoo e o comprimento do arco acontece apenas no início da fase de arco. Após o início da fusão da ponta do pino o comprimento do arco muda, aumentando até o tempo de soldagem acabar. Se o valor do recoo for muito baixo, a potência também será baixa e o colar não será formado. Além disso, um arco extremamente curto, pode aumentar o número de curtos-circuitos, o que provavelmente produzirá um colar irregular, incompleto e com falhas internas devido à energia muito baixa no arco combinada com turbulências intensas na poça de fusão.

Por outro lado, um valor de recuo excessivo, acima de 4 mm, aumenta o risco de sopro magnético (desvio do arco) e pode resultar em soldas com colar incompleto, além de aumentar a probabilidade de promover possíveis obstruções do pino durante sua trajetória até a peça (CHAMBERS, 2001). A determinação do valor de recuo é reconhecida como um fator importante para a obtenção de soldas sem defeitos, sendo objeto de investigações para melhorar do processo. Assim, a relevância deste parâmetro para o processo de soldagem e suas nuances ligadas às variáveis elétricas também são investigadas no presente trabalho.

A curva verde na Figura 28 representa o deslocamento do pino ao longo do tempo, evidenciando as diferentes fases do processo *Stud Welding* e suas parametrizações. O movimento do pino segue uma sequência bem definida, sendo influenciado pelos ajustes de distância de recuo, tempo de mergulho e penetração (relacionada com a protrusão).

Inicialmente, o pino permanece em contato com a peça durante a fase de Pino sobre Peça (PSP), onde o deslocamento se mantém em um valor fixo que corresponde ao valor de protrusão regulado. Ao entrar na fase de pré-arco (região amarela), a corrente ainda não foi completamente estabelecida, e o pino segue fixo na posição inicial (PSP). Assim que o arco piloto é acionado (fase azul), o pino é recuado rapidamente, afastando-se da peça de acordo com o valor de recuo programado. Esse movimento de afastamento (ou recuo) é evidenciado pelo salto abrupto da curva verde. O tempo que o pino permanece na posição elevada é conhecido como tempo de recuo, geralmente sincronizado com o acionamento da corrente principal. Durante a fase do arco principal (região vermelha), o pino permanece na posição recuada enquanto ocorre a fusão do material. A curva verde se mantém constante nesse período, indicando que não há deslocamento vertical até o início da próxima etapa.

Ao final do arco, inicia-se a fase de mergulho, onde o pino é impulsionado de volta em direção à peça. Esse movimento de avanço até a peça, observado na curva verde ocorre de forma controlada, garantindo que o pino fundido entre na poça de fusão de maneira estável. O tempo gasto nesse retorno é o tempo de mergulho, que influencia diretamente a formação do colar e a penetração da solda.

Por fim, o deslocamento se estabiliza na fase de pós-arco (região rosa), onde o pino atinge a posição final dentro da poça de fusão e ocorre a solidificação da junta.

O nível final da curva verde reflete a profundidade de penetração do pino na poça, sendo um parâmetro essencial para a qualidade da solda

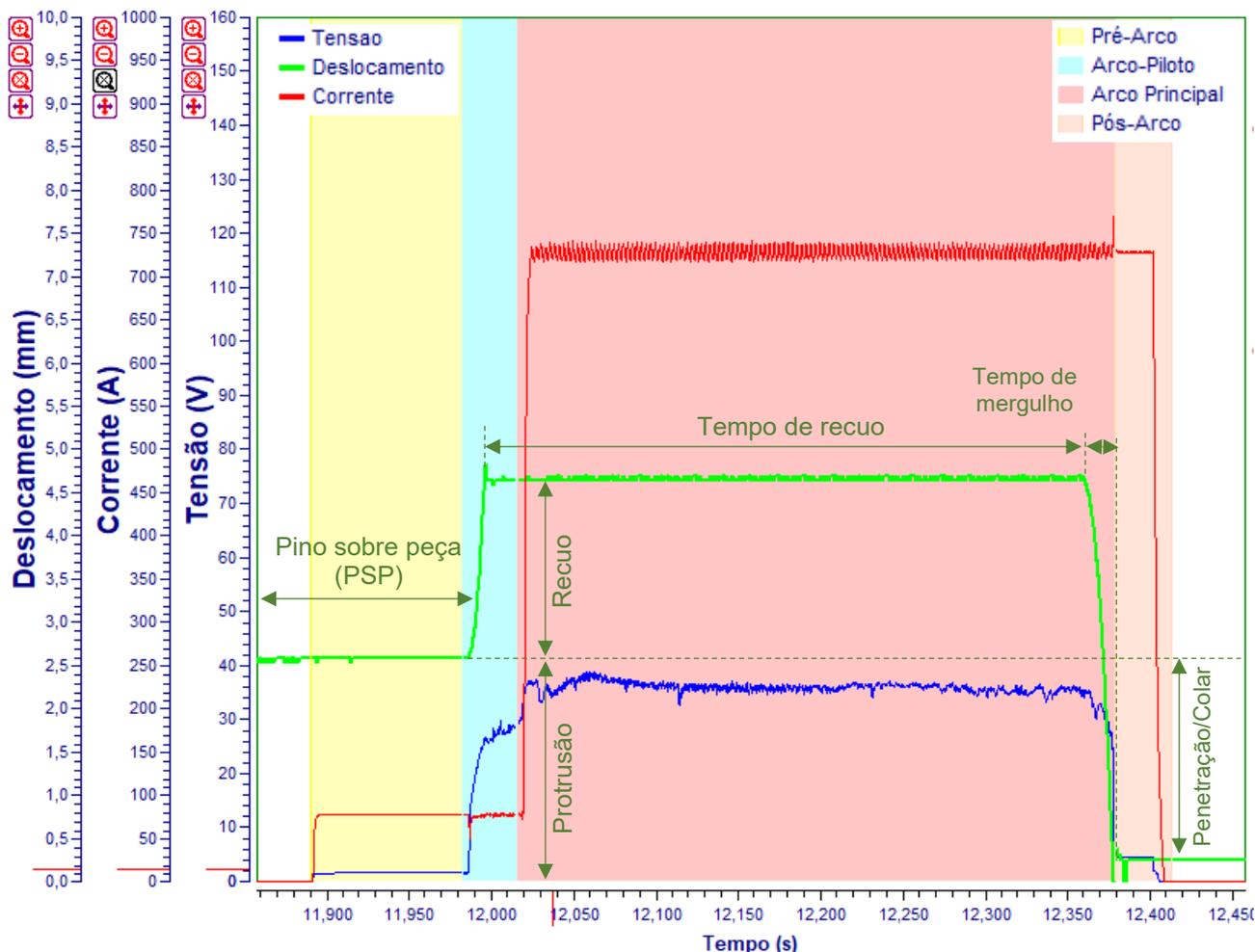


Figura 28 - Oscilograma típico do processo SW para soldagem de pinos evidenciando as fases do movimento

3.2.3.3 Energia de Soldagem no Arco Retraído (Drawn-Arc)

Sobre a energia de soldagem do processo SW, poucas informações científicas ou recomendações técnicas foram encontradas. Até o presente momento, apenas dois trabalhos destacam o tema de energia de soldagem para pinos. Trillmich e Wells (2016), citam que na soldagem de pinos por arco retraído, os parâmetros considerados primários de corrente e tempo, desempenham um papel fundamental na execução e na determinação da qualidade do processo. Para os demais processos de soldagem a arco a energia de soldagem é calculada partir da relação entre a potência elétrica, eficiência do processo (η) e velocidade de soldagem.

No entanto, considerando que no SW a solda acontece de forma estática e desconsiderando fatores como eficiência do processo (η), assume-se, portanto, que a energia de soldagem (E) se refere à quantidade total de energia consumida durante um tempo predeterminado. Sendo assim, o cálculo da energia de soldagem em SW por arco retraído pode ser facilmente encontrada por meio da leitura dos oscilogramas do processo e calculado por meio da Equação 7:

$$E = U * I * t \quad (7)$$

em que:

- E : é a energia de soldagem (J)
- U : é a tensão média (V)
- I : é a corrente média (A)
- t : é o tempo de soldagem (s)

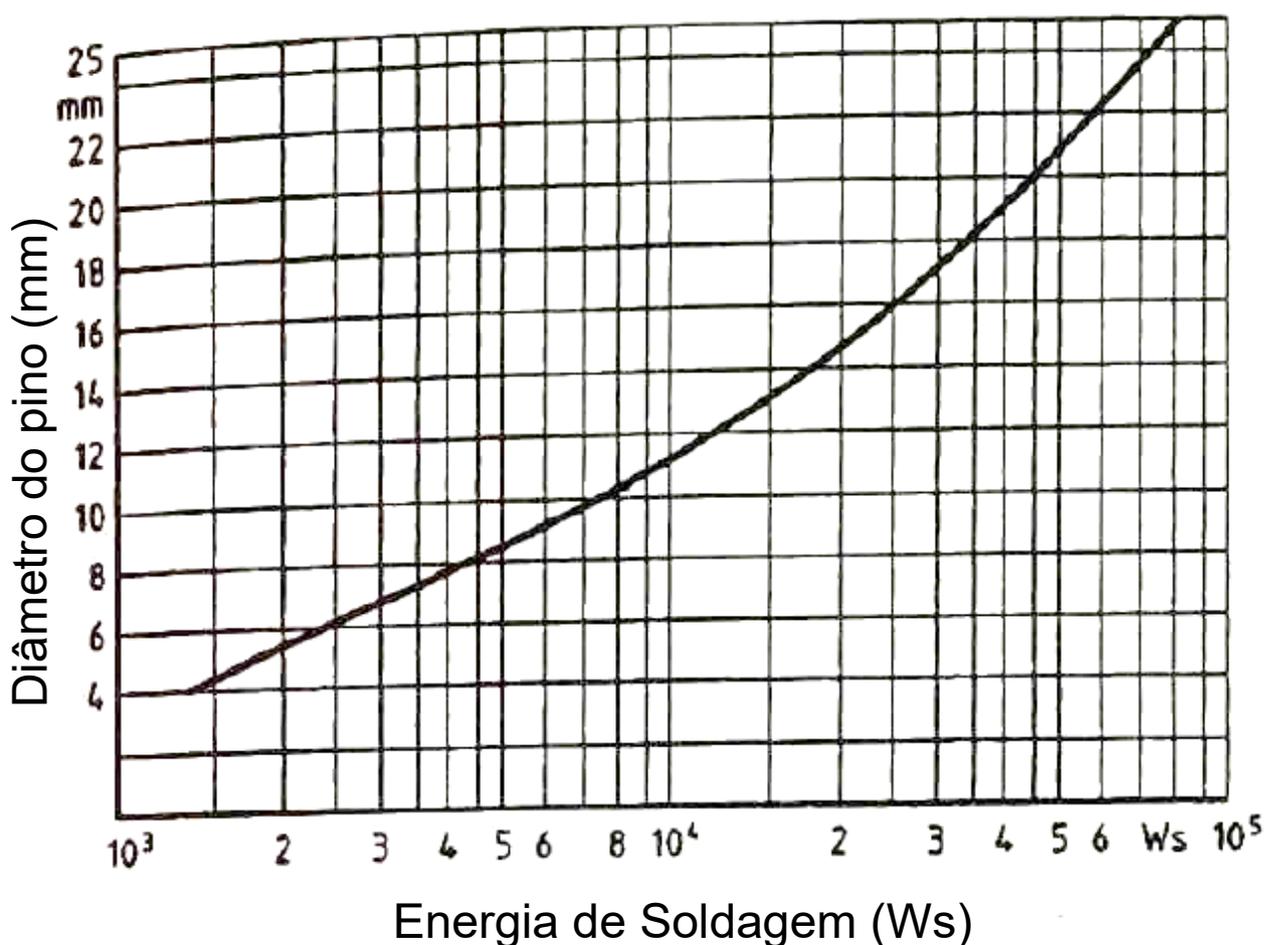
Além disso, também não foram encontrados trabalhos que indicassem a eficiência (η) do processo SW e suas variantes. Entretanto, é sabido que uma parte significativa da energia imposta é dissipada devido à condução térmica na chapa metálica e no pino, bem como devido à vaporização, radiação e respingos. A única fonte encontrada com valores de referência de energia para soldagem de pinos, até o presente momento, sobre energia de soldagem é representada na Figura 29 onde, a unidade de medida utilizada, watt-segundo (W·s), que quantifica a energia utilizada durante o processo. Um watt-segundo é equivalente a um joule (J), representando a energia consumida ao aplicar uma potência de um watt por um segundo. A unidade de energia no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o joule (J) e, em contextos de soldagem, a energia garante que o pino seja adequadamente soldado à peça. Além disso, o ajuste da energia pode ser determinado com base em outros fatores, incluindo, sobretudo, o diâmetro dos pinos a serem soldados, o método de proteção utilizado (anel cerâmico ou gás) e as condições específicas do processo, como espessura da peça, por exemplo.

Marchione (2024) estudou o processo SW e utilizou a energia de soldagem para relacioná-la com a temperatura máxima obtida no verso de chapas de aço carbono com variadas espessuras. O trabalho visava quantificar por meio da energia

de soldagem os parâmetros de soldagem ideais e evitar a perfuração por sobreaquecimento das chapas em contextos de aplicação *off-shore*. Foi possível relacionar, para cada espessura de chapa, a energia de soldagem e a temperatura máxima atingida no verso da chapa (Figura 30).

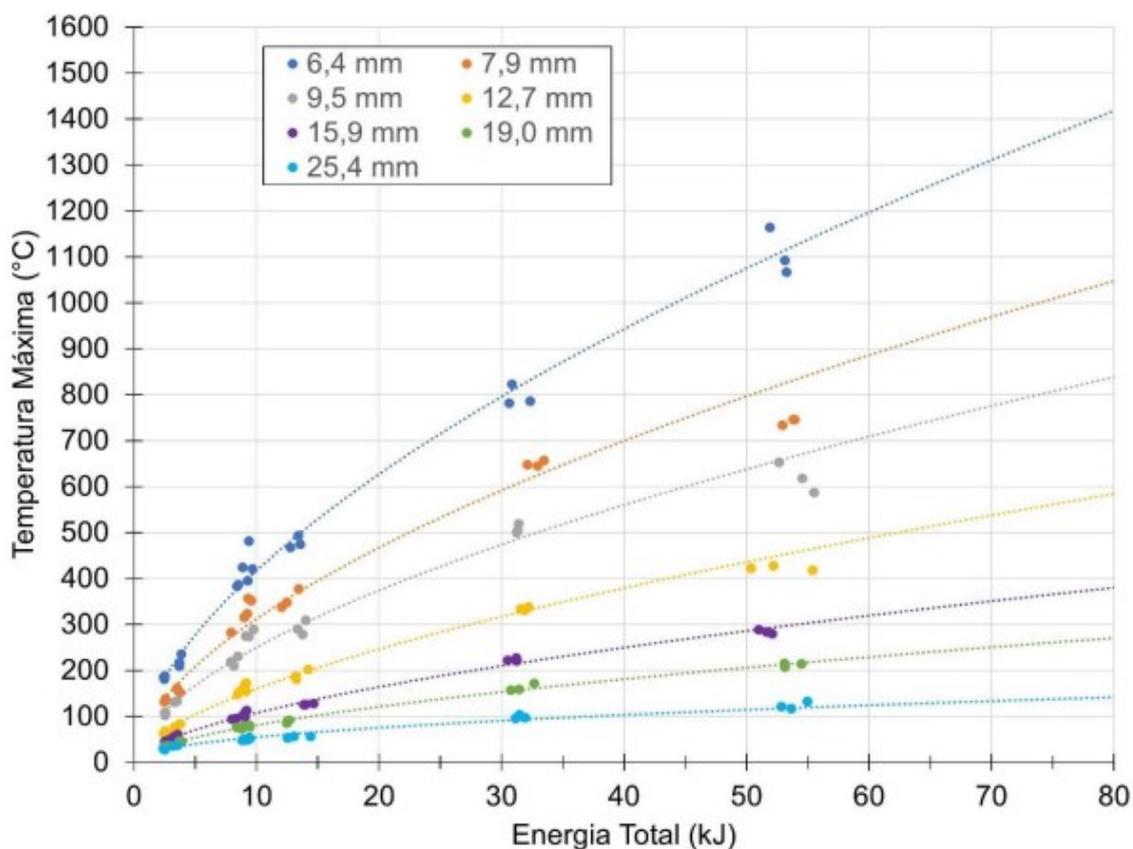
Este gráfico apresenta a relação entre a energia total utilizada na soldagem e a temperatura máxima alcançada no verso da chapa de metal. Os dados são divididos por espessura da chapa e as linhas de tendência para cada espessura de chapa mostram que, em geral, há um aumento na temperatura máxima à medida que a energia total aplicada na soldagem cresce. A partir das informações do gráfico da Figura 30, é possível manipular os valores de corrente e tempo, considerando a tensão quase constante, para se obter diferentes combinações de parâmetros para a mesma energia de soldagem.

Figura 29 – Diagrama com valores de referência da energia de soldagem SW por arco retraído



Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016)

Figura 30 - Temperatura máxima atingida no verso do material de base em aço carbono para diferentes espessuras de acordo com a energia de soldagem



Fonte: (MARCHIONE, 2024)

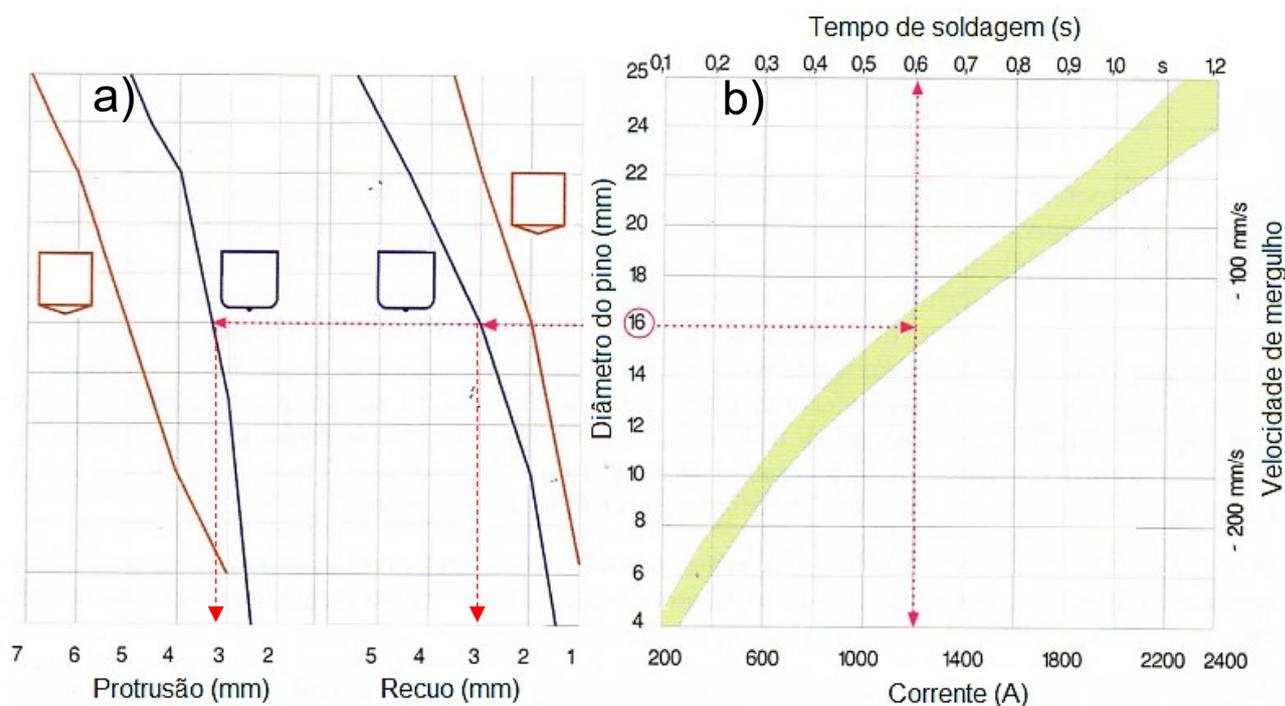
3.2.3.4 Inter-relacionamento entre os Parâmetros

Realizar estudos e coletar parâmetros pode ser algo complexo. Requer experimentos metodológicos para obter resultados confiáveis. Para facilitar a compreensão na área técnica os dados são registrados e transformados em gráficos, que são apresentados aos usuários para visualizar as interações entre parâmetros de soldagem. Com essas representações visuais, é possível identificar padrões, determinar os limites de operação e estabelecer procedimentos padrão que garantam a qualidade e a segurança em aplicações de soldagem. Um exemplo para soldagem de pinos é divulgado pela Associação Alemã de Soldagem e Processos Relacionados (*DVS Verband*) e apresentado no diagrama da Figura 31. O gráfico da esquerda mostra como duas variáveis independentes, neste caso, "Protrusão (mm)" e "Recuo (mm)", se relacionam com a corrente e o tempo de soldagem, de acordo com o

diâmetro do pino. Nesse gráfico também é levado em consideração o tipo da ponta do pino (com esfera ou cônica). As linhas coloridas representam a faixa para que a solda aconteça de maneira aceitável, mantendo a qualidade da solda, traduzida por resistência da união, ou até mesmo, a operacionalidade do processo.

A Figura 31b mostra a "Corrente (A)" no eixo X e "Diâmetro do pino (mm)" no eixo Y, com uma faixa de "Tempo de soldagem (s)" e uma faixa de "Velocidade de mergulho (mm/s)" como referências de fundo. A faixa verde indica uma faixa operacional e a relação direta entre a corrente e o diâmetro do pino. Como informação complementar, percebe-se que para diâmetros maiores de pinos a velocidade de mergulho deve diminuir. A velocidade de mergulho é uma medida de quão rápido o material de solda é depositado. No diagrama o exemplo de um pino de 16 mm com esfera de alumínio na ponta é selecionado. Para realizar a soldagem com este modelo de pino, uma corrente de aproximadamente 1300 A o tempo de 0,6 s e a protrusão e recuo de aproximadamente 3 mm cada, representam a parametrização ideal para este caso (TRILLMICH; WELZ, 2016).

Figura 31 – Diagrama sobre a parametrização do processo SW por arco retraído



Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016)

A análise conjunta desses gráficos é útil para otimizar o processo de soldagem e obter um ponto de partida inicial para parametrização do processo. Além disso estes diagramas informam limites ideais dos parâmetros de soldagem. Contudo, a maioria desses diagramas não mostram os experimentos práticos para elucidar o operador sobre as reais influências entre si. Isso é esperado devido à natureza dos catálogos técnicos que não se preocupam em ensinar de fato a correlação e a influência da variação ou combinações diferentes deles. Além disso, é importante notar que os detalhes exatos das variáveis e como elas se correlacionam dependeriam de um contexto específico do processo de soldagem, o qual não foi fornecido com a imagem. Um dos objetivos do presente trabalho é experimentar e validar na prática a utilização destes parâmetros, geralmente recomendados. Além disso pretende-se ampliar a faixa dos parâmetros baseando-se em quantidade de energia envolvida na solda.

Klarić et al. (2009) realizaram um estudo para verificar a influência dos parâmetros de corrente, tempo, protrusão e recuo do pino na penetração da solda. Por meio de análise de variância, o estudo revelou que, de fato, a corrente de soldagem, seguida pelo tempo, tiveram a maior influência no aumento da profundidade de penetração da solda, sendo que os parâmetros mecânicos de protrusão e recuo não apresentaram relevância significativa.

Klarić et al. (2011), em outro estudo, avaliaram a influência dos parâmetros de tempo e presença de fluxo ativador (A-TIG) para entender seu impacto na largura da zona fundida e na dureza da solda. Foi constatado que o tempo de soldagem e o fluxo ativador afetaram significativamente o tamanho do metal de solda (largura da zona fundida do pino) e a penetração da solda. A análise de variância realizada mostrou que o tempo de soldagem tem uma influência maior no aumento da largura da zona fundida. Além disso, foi confirmado que o tempo de soldagem influenciou o aumento da zona endurecida na solda.

Samardžić (2009), em outro estudo, relata que o deslocamento do pino é um fator essencial e que deve ser monitorado durante o procedimento. Foram identificados padrões irregulares no comportamento dos sinais e correlacionados com as soldas defeituosas. Além disso, foi verificado como diferentes condições, como a presença de óleo, ferrugem, afetam a estabilidade do processo de soldagem, concluindo que o processo *Stud Welding* também possui sensibilidade a tais condições externas, sobretudo *primers* anticorrosivos.

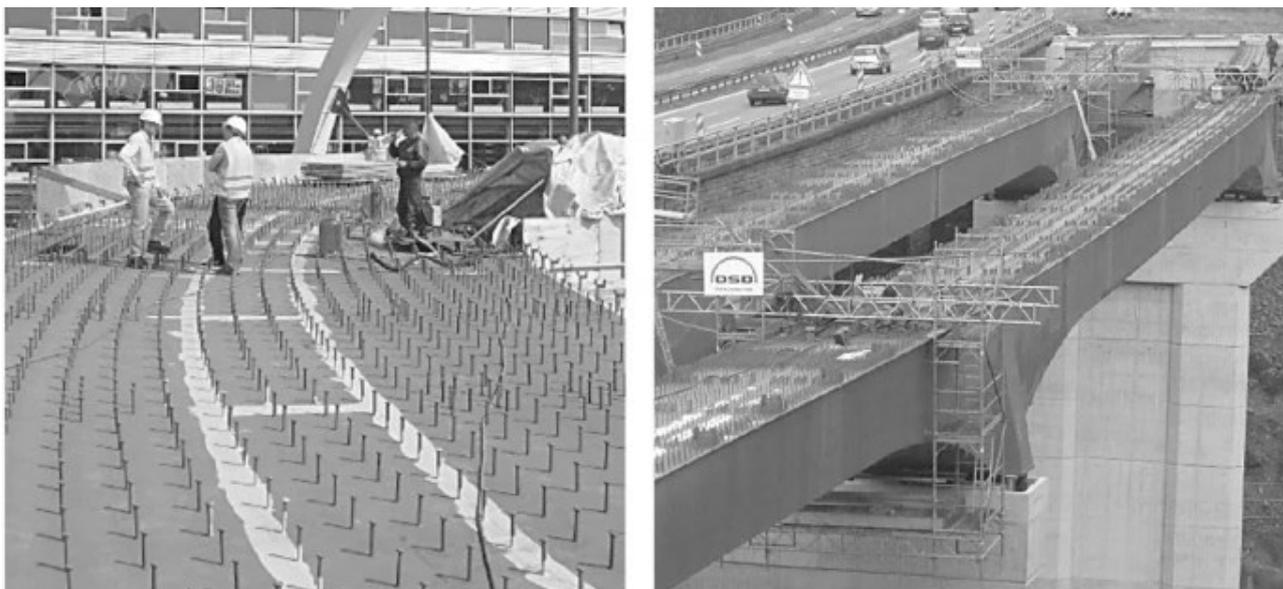
3.2.4 Aplicações Diversas e Relevância para os Campos da Engenharia

Este processo tem exibido notável flexibilidade ao unir pinos metálicos em diversas aplicações industriais. Estudos demonstram aplicabilidade da soldagem de pinos em comparação com tecnologias consolidadas como aparafusamento, outros processos de soldagem a arco para fixar pinos ou parafusos e, também, tecnologias de fixação por pressão como os tradicionais pinos HILT[®], (KOBAYASHI, 2012). Por um longo período, o SW tem sido empregado inclusive em contextos desafiadores, como em condições extremamente frias ou mesmo debaixo d'água. Isso remonta à década de 1970, conforme ilustrado pelos estudos de Masubuchi Ozaki e Chiba (1978) e Hamasaki e Tateiwa (1979), que já conduziam experimentos para avaliar a viabilidade da soldagem de pinos subaquática. Nessa época, os experimentos evidenciaram que esse método era viável e que as uniões soldadas debaixo d'água apresentavam características semelhantes às soldas realizadas na atmosfera. Kennedy (1980) aplicou o processo, executando a soldagem em chapas galvanizadas em uma faixa de temperaturas entre 20°C e -40°C, com o intuito de adaptar essa técnica a regiões do mundo sujeitas a tais condições climáticas. Dentre as principais áreas da engenharia, podem ser citadas a naval, construção civil, automobilística, adaptando-se a diferentes materiais e aplicações, desde a fixação de isolamento em estruturas de aço até a montagem de componentes complexos em aeroespacial e defesa (CHO; SHIN; YI, 2016).

3.3.3.1 Construção Civil e Arquitetura

A soldagem de pinos desempenha um papel importante na indústria da construção civil (Figura 32), especialmente na construção composta (HAN et al., 2015) (XUE et al., 2008), soldagem através de *decks* galvanizados (TRILLMICH, 2023), ancoragem de aço em concreto e engenharia de fachadas (XUE et al., 2008).

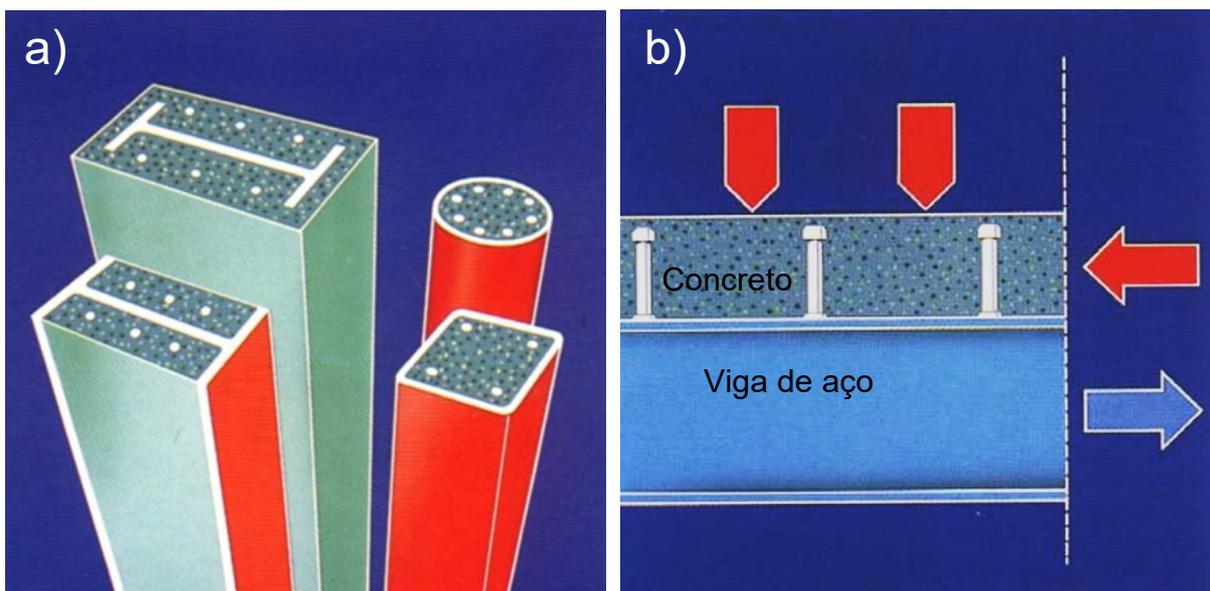
Figura 32 – Exemplos de aplicação da soldagem de pinos na engenharia civil



Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016)

Na construção composta a fixação de pinos de metal ou barras deformadas de aço (EMI et al., 1989) é realizada à uma estrutura base, normalmente de aço, e é usado para melhorar a conexão entre diferentes materiais, como aço e concreto, por exemplo. Neste tipo de construção, os pinos soldados reforçam a aderência entre vigas de aço e lajes de concreto, permitindo que eles atuem como uma única unidade resistente. Isso aumenta a capacidade de carga e a durabilidade da estrutura. Na construção composta aço-concreto, forças de cisalhamento longitudinais são transferidas através da interface aço-concreto pela ação mecânica dos conectores de cisalhamento. O problema associado a essa conexão reside na região de solicitações severas e complexas (ZHOU et al., 2022). A Figura 33 ilustra exemplos de estruturas da construção composta e a aplicação dos pinos neste tipo de tecnologia.

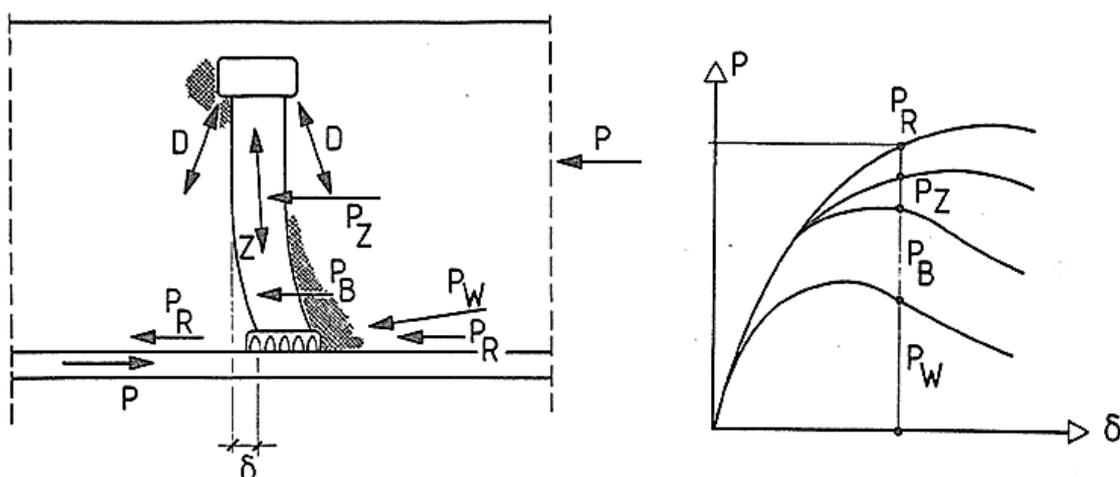
Figura 33 – Princípio da construção composta e diagrama esquemático de forças



Fonte: (KÓCO, 2010)

A Figura 34 ilustra dois diagramas relacionados ao comportamento de carga dos pinos do tipo conectores de cisalhamento (SD) em concreto. Os diagramas são típicos em literatura técnica que descreve o comportamento estrutural de componentes sob carga. O diagrama de forças da esquerda representa a distribuição de forças em um conector de cisalhamento sob carga. Nele é possível perceber que a maior força de cisalhamento está próxima ao colar de solda. O conector está sujeito a uma força de compressão (P), que gera forças de reação distribuídas em várias componentes. O segundo gráfico mostra a relação entre a carga aplicada (P) e o deslocamento (δ) do conector.

Figura 34 – Diagrama de forças de conectores de cisalhamento em concreto de resistência normal



Fonte: (JÄHRING, 2009)

Estudos como de Han *et al.* (2015) e de Xue *et al.* (2008) explicam o comportamento estático destes conectores de cisalhamento aplicados no interior do concreto. Nestes estudos é evidenciado que as forças de cisalhamento de maiores dimensões se concentram próximas ao colar de solda e que o desempenho dos pinos para esta aplicação é influenciado pela composição do concreto e elementos adicionados como borracha, por exemplo. Dessa forma é imprescindível que para este tipo de aplicação, a solda apresente um colar íntegro e sem descontinuidades. A formação do colar, nesses casos, tem impacto direto no resultado da ruptura do pino que pode acontecer por flexão e cisalhamento.

Zhan *et al.* (2021) apresenta resultados que sugerem que o colar de solda altera a área de desempenho ao cisalhamento e que o parâmetro de altura tem menos influência do que o raio do colar. Em condições em que os colares de solda têm a mesma relação altura-diâmetro, a melhoria da resistência ao cisalhamento com diferentes diâmetros converge para aproximadamente 7,28%.

Outra aplicação, são as placas de ancoragem em estruturas de concreto. Por meio da aplicação dessa técnica na construção composta, produzem-se placas de ancoragem que servem como interfaces críticas entre aço e concreto, garantindo a fixação segura de elementos de aço em estruturas de concreto. Neste processo, pinos do tipo conectores de cisalhamento são soldados em placas de aço, configurados em distintos arranjos e quantidades, com o objetivo de fortalecer a união entre o aço e o concreto. A Figura 35 ilustra um exemplo de placa de ancoragem fabricada pela empresa Köco.

Figura 35 – Exemplo de aplicação em placas de ancoragem para construção composta com pinos conectores de cisalhamento soldados



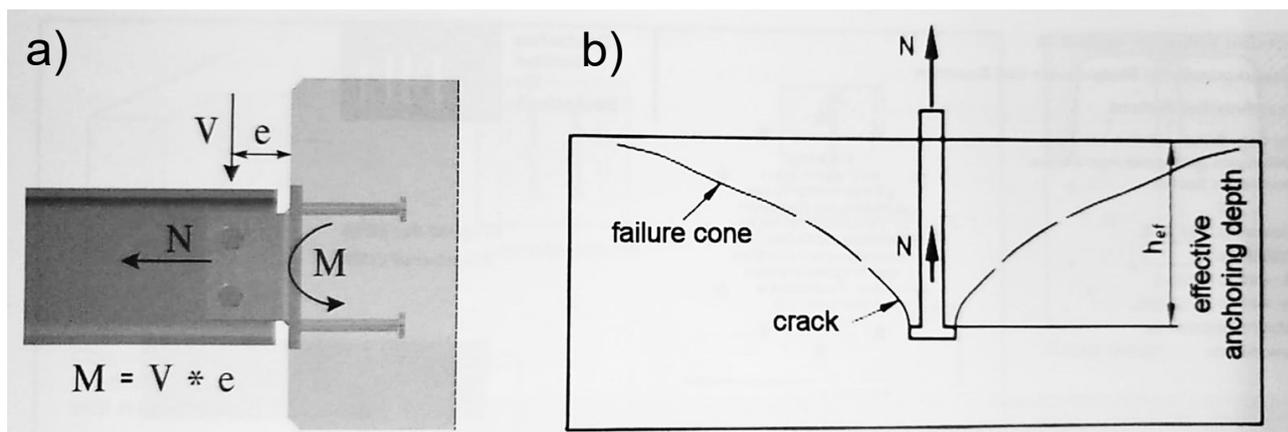
Fonte: (KÖCO, 2010)

As placas de ancoragem, frequentemente expostas na superfície do concreto, tornam-se pontos estratégicos para a adição de outras estruturas metálicas. Estas podem ser posteriormente soldadas ou fixadas mecanicamente, conforme a necessidade do projeto. Este método é particularmente útil em circunstâncias onde o concreto não pode ser perfurado após o processo de cura, seja por questões estruturais ou para preservar a integridade do material. Assim, as placas de ancoragem oferecem uma alternativa satisfatória, proporcionando pontos de fixação seguros sem comprometer a estrutura de concreto. A prática regulamentada pela legislação técnica europeia e pelas normas técnicas (*European Technical Approval*, 2013) fornece aos engenheiros e projetistas diretrizes para o uso eficiente e seguro desses sistemas de ancoragem.

A Figura 36 mostra duas imagens relacionadas à mecânica de elementos de fixação em estruturas de concreto e aço. A Figura 36a, representa as cargas em uma placa de ancoragem, onde as forças atuantes são, força de cisalhamento (V), que age horizontalmente na placa de ancoragem, a força normal (N), uma força verticalmente

para baixo e pode ser resultado do peso ou outras cargas verticais e o momento fletor (M), que é o resultado da força de cisalhamento multiplicada pela distância. A Figura 36b, mostra o comportamento de carga de um pino de aço sob carga de tração. O diagrama exibe no eixo vertical a carga axial (N) aplicada ao pino.

Figura 36 – a) Esquemático da aplicação de placas de ancoragem e b) comportamento de carga de um pino sob carga de tração



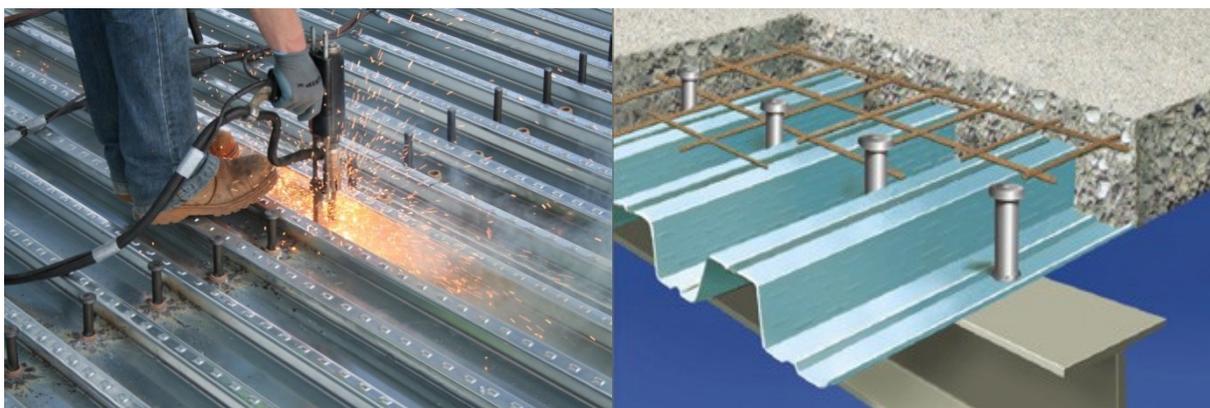
Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016)

À medida que a carga é aplicada, uma espécie de "cone de falha" pode se desenvolver no material ao redor do pino, que é uma representação da área onde o material falha ou se rompe devido à tensão. Uma trinca é mostrada se desenvolvendo a partir do cone de falha, indicando a propagação desta falha no material devido à carga aplicada. Uma vasta gama de informações técnicas sobre esta aplicação são de fácil acesso e podem ser conferidas nos manuais do projeto InFaSo da Comissão Europeia (*Innovative Fastening Solutions*) (KUHLMANN et al., 2014a), (KUHLMANN et al., 2014b). Os manuais deste projeto detalham a aplicação prática de conexões entre aço e concreto, abordando vários aspectos técnicos, incluindo a descrição e exemplos de projetos práticos, estudos de parâmetros e recomendações para engenheiros.

Num contexto muito similar, umas das aplicações mais comuns na construção civil são nas lajes de *steel deck*, que são chapas de aço galvanizado, caracterizadas por suas nervuras, e que não somente facilitam a aderência com o concreto, mas também permitem a incorporação de pinos do tipo conectores de cisalhamento. A técnica de soldagem em lajes do tipo *steel deck* é amplamente adotada em projetos de construção civil em países de língua inglesa, apresentando uma abordagem multifuncional (TRILLMICH; WELZ, 2016). Além das vantagens estruturais, a

construção do tipo *steel deck* oferece benefícios adicionais em termos de segurança e funcionalidade. Serve como uma plataforma de trabalho segura para os operários durante a fase de construção, protegendo também as equipes que atuam nos pavimentos inferiores. A Figura 37 ilustra uma soldagem de pinos em laje *steel deck* e um esquemático da aplicação da laje com os pinos soldados na chapa e os demais componentes desta técnica.

Figura 37 – Exemplo de aplicação da soldagem de pinos *steel deck*.



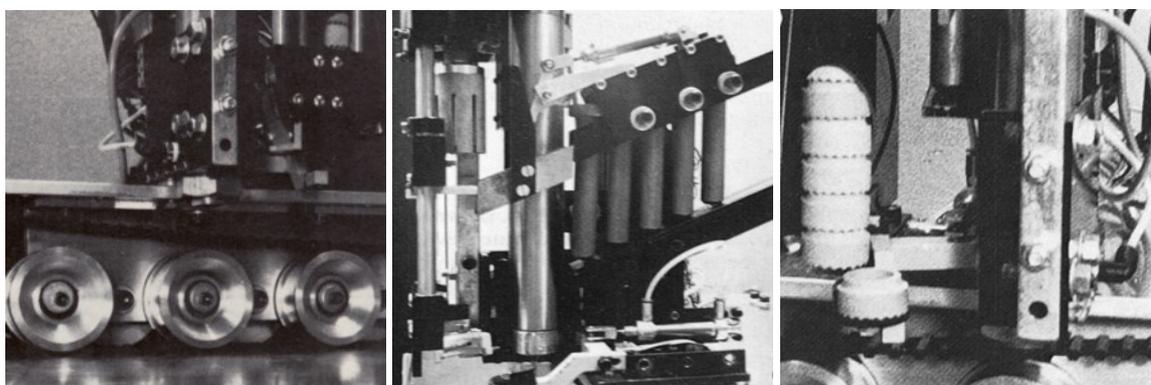
Fonte: Adaptado (MACSERVICE, 2024) e (UFSC, 2023)

No contexto brasileiro, o *deck* é produzido utilizando aço galvanizado por imersão a quente conforme a norma ASTM A 653 Grau 40, com espessura de revestimento de até 80 μm (GALVANIZA, 2013). O processo de galvanização é escolhido por suas propriedades de resistência à corrosão, fundamental para a durabilidade da estrutura. Os *decks* estão disponíveis em espessuras variadas, sendo mais comuns as medidas de 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm e 1,5 mm e podem ser fabricados em comprimentos de até 12 metros, de acordo com as especificações do projeto (METFORM, 2024).

Esta aplicação não é nova, pois vem sendo estudado desde a década de 1980. Estudos desta época, mostravam que mesmo em temperaturas tão baixas quanto -40°C , a soldagem pode ser eficazmente realizada, desde que haja um aumento no aporte térmico, especialmente com o aumento da espessura do revestimento galvanizado. Este resultado forneceu bases para a qualificação de procedimentos de soldagem que podem ser aplicados em condições climáticas extremas (KENNEDY, 1980). Avançando os anos de 1990, a necessidade por equipamentos para esta aplicação que fornecessem melhor ergonomia para o operador já se mostrava uma necessidade. Nesse contexto, foram desenvolvidos sistemas automatizados como o

"*Studmaster*" desenvolvido no MIT (Figura 38), que marcou um progresso significativo, introduzindo um método que não só prometia reduzir a carga de trabalho repetitivo e estressante para os operadores, mas também sugere um retorno sobre o investimento em 1 a 2 anos (ZIEGLER, 1988). Este sistema contribuiu para o destacamento da viabilidade comercial da automação do processo de soldagem de pinos, comum em construções compostas, abrindo caminho para futuras inovações no campo da soldagem.

Figura 38 – Equipamento automatizado com alimentação automática de pino e anel cerâmico.



Fonte: Adaptado (SLOCUM; ZIEGLER, 1990)

Trillmich (2023) discute sobre um dos principais problemas identificados neste tipo de soldagem que é a evaporação do zinco (Zn), que ocorre a uma temperatura de 906°C, bem abaixo do ponto de fusão do aço. Isso pode levar à formação excessiva de poros durante o curto processo de soldagem que dura menos de 2 segundos. Além disso, devido ao número elevado de pinos que são soldados nesta aplicação, alguns fatores de risco são comuns como a ergonomia reduzida e exposição aos fumos provenientes da solda.

Fethke *et al.* (2016) e Fethke, Gant e Gerr (2011) exploraram a influência da evaporação do zinco e a exposição a fumos de solda, além de aspectos como a redução de riscos biomecânicos. O estudo comparou métodos convencionais de soldagem que expõem o operador a uma posição de extrema flexão do corpo, com um sistema protótipo que permitia aos participantes soldar em posição ereta (Figura 39). Os resultados mostraram reduções substanciais na inclinação do tronco e nos níveis de atividade de vários grupos musculares e também a redução da concentração de partículas de fumos de solda, mesmo que as concentrações totais inaláveis ainda excedessem os valores limite recomendados pela ACGIH (*American Conference of*

Governmental Industrial Hygienists) ao soldar através de *decks*. As partículas de fumos de solda para ambas as condições, diretamente na viga e através do *deck*, indicaram a presença de nanopartículas metálicas, porém, com o uso do sistema vertical, os níveis de exposição diminuíram sensivelmente durante as simulações de soldagem.

Figura 39 – Comparação entre dispositivo vertical e convencional de SW em aplicação de *steel deck*.

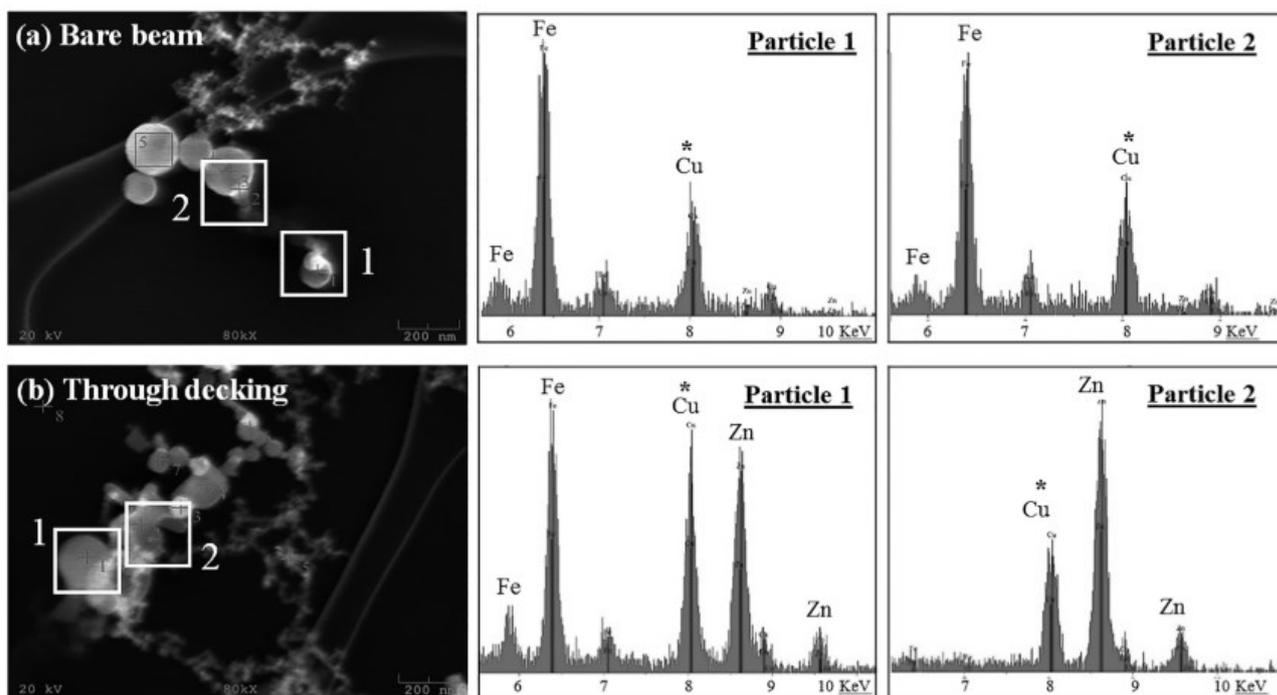
a) convencional b) posição ereta



Fonte: (FETHKE et al., 2016)

A Figura 40 ilustra os resultados de um estudo que analisou as partículas resultantes da soldagem de pinos em duas condições distintas: soldagem diretamente em uma viga sem *deck* (*Bare Beam*) e soldagem através de um *deck* galvanizado (*through decking*). O instrumento de medição era transportado na cintura do participante e conectado a um tubo condutor que capturava aerossóis da zona de respiração do operador. Nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode-se observar as morfologias das partículas coletadas. A análise por espectrometria de raios X por energia dispersiva (EDS) associada revela a composição química das partículas. Na soldagem diretamente na viga, as partículas são enriquecidas principalmente em ferro (Fe), enquanto na soldagem através do *deck*, identifica-se uma mistura de partículas enriquecidas tanto em ferro (Fe) quanto em zinco (Zn), refletindo a presença de um revestimento galvanizado no material. O estudo sugere que o processo de soldagem e o material de base influenciam a composição das partículas de fumos de solda, o que tem implicações diretas para a saúde ocupacional e medidas de controle de exposição a fumos metálicos.

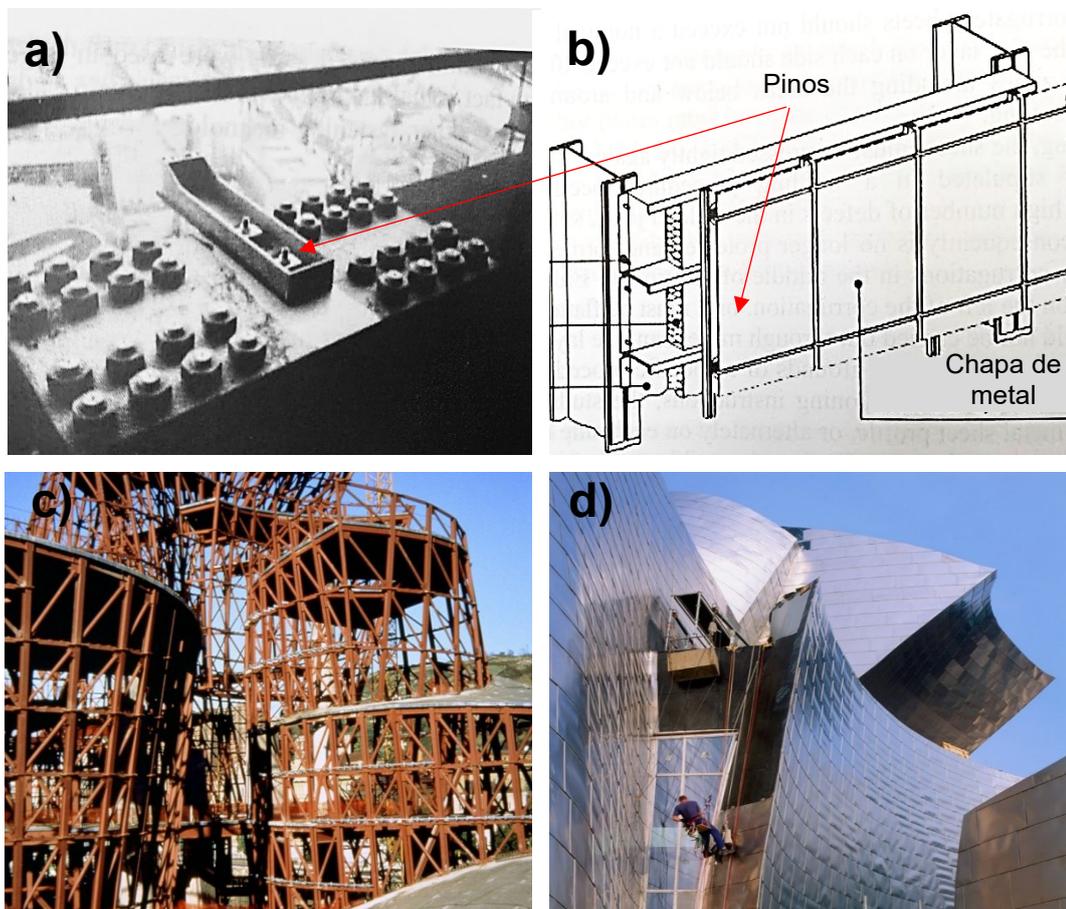
Figura 40 – Comparação entre duas aplicações na construção civil. a) Diretamente na viga de aço b) soldagem de pinos através de *decks* galvanizados



Fonte: (FETHKE et al., 2016)

A soldagem de pinos também é empregada na engenharia de fachadas, sendo frequentemente empregada na fixação de placas de base e vigas de aço, proporcionando pontos de ancoragem seguros para estruturas metálicas. Além disso, é utilizada na montagem de fachadas de edifícios, onde os pinos servem como fixadores discretos e eficazes para painéis de revestimento ou elementos de isolamento térmico e acústico. Relatos da empresa *Northland Fastening Systems* (2020) e casos de aplicação da empresa Nelson[®] (STANLEY, 2024a), são exemplos emblemáticos da aplicação de *Stud Welding* que podem ser vistos em projetos arquitetônicos de renome mundial. O *Burj Khalifa*, atualmente, o arranha-céu mais alto do mundo localizado em Dubai, é um exemplo de onde a soldagem de pinos foi aplicada para a construção composta. No *Eden Project* no Reino Unido, o *Stud Welding* foi utilizado na construção de suas cúpulas de biomas, demonstrando a flexibilidade da técnica em aplicações de engenharia de fachadas. Por fim, o museu *Guggenheim* em Bilbao, Espanha, destaca-se pela sua impressionante fachada, onde o *Stud Welding* possivelmente figurou na fixação dos painéis metálicos de titânio, ilustrando a combinação de funcionalidade e estética. A Figura 41 ilustra as construções citadas.

Figura 41 – Exemplos de aplicação da soldagem de pinos em engenharia de fachada. Fixação de painéis metálicos (a,b), fixação de placas de titânio do museu *Guggenheim* em Bilbao (c,d)



Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016) (NORTHLAND FASTENING, 2020) e (STANLEY, 2024a)

3.3.3.2 Indústria automobilística

O processo SW também está altamente presente na indústria automobilística, contribuindo significativamente para a inovação no processo de fabricação de veículos. Este processo é utilizado em diversas aplicações, desde a montagem de componentes estruturais até o acabamento de interiores e exteriores de automóveis (Figura 42a). Esta técnica é empregada para fixar componentes estruturais, como suportes e reforços à carroceria do veículo. Por exemplo, a fixação de pinos nos painéis de carroceria para posterior montagem de peças de acabamento (Figura 42b, c), cabos ou componentes de isolamento.

Além das aplicações estruturais, o *Stud Welding* é usado na montagem de elementos decorativos e funcionais em interiores e exteriores de veículos. Isso inclui a fixação de emblemas (Figura 42a), suportes de iluminação, tapeçaria e outros acessórios. Esta técnica permite uma fixação limpa e segura, mantendo a estética do

projeto do veículo sem a necessidade de furação da carroceria. O SW também é frequentemente utilizada para aplicação de pinos de aterramento ou pino-massa (Figura 42) na carroceria dos veículos (STANLEY, 2024b).

Figura 42 – Exemplos de aplicações da soldagem de pinos na indústria automobilística



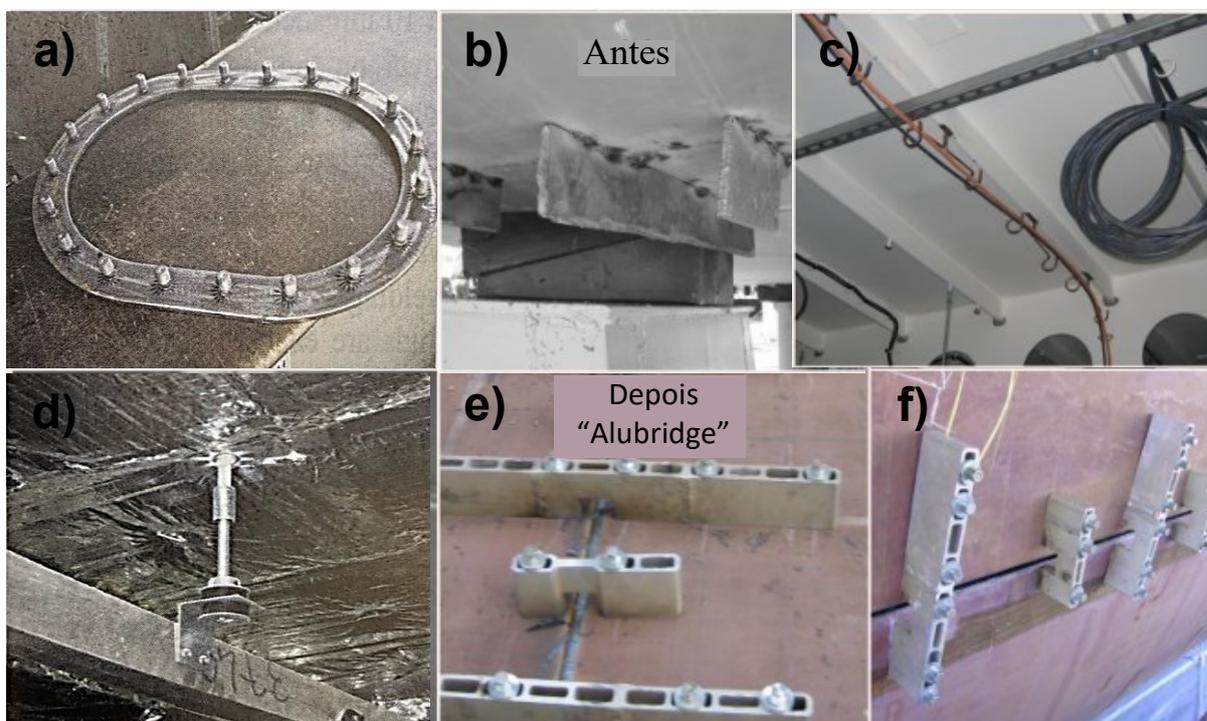
Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016) (STANLEY, 2024c)

3.3.3.3 Aplicações offshore, construção naval e subaquáticas

No contexto da construção naval e de operações *offshore*, o *Stud Welding* tem sido empregado de forma crescente, contribuindo significativamente para a agilização dos processos de soldagem de componentes estruturais e construção de convés. Na indústria naval, esta metodologia de soldagem é atualmente adotada para a união e fixação de chapas de convés, por meio do uso de dispositivos denominados "alubridges" (Figura 43). Nesse processo, os pinos são soldados diretamente às

chapas de convés, e em seguida, os dispositivos *alubridges* são acoplados, permitindo o aperto subsequente de porcas em suas extremidades. Esse procedimento facilita o alinhamento adequado das chapas. Posteriormente, as chapas, geralmente fabricadas em aço de alta espessura, são unidas utilizando-se outros métodos de soldagem a arco, como o FCAW (*Flux Cored Arc Welding*). Ainda na construção naval, além da função de alinhamento de chapas, o *Stud Welding* também é aplicado na fixação de equipamentos e cabeamento elétrico, isolamento acústico e térmico, e na instalação de tetos, paredes e pisos em embarcações de grande porte, conforme indicado por Hilbig (2021b) e Hillbig (2021c). No âmbito das operações *offshore*, o *Stud Welding* se revela extremamente versátil, sendo aplicável tanto em manutenções realizadas em ambientes secos, como no interior de navios (Figura 43a,c,d) e embarcações menores, quanto no desenvolvimento e manutenção de estruturas subaquáticas. Pesquisas já destacam a viabilidade da aplicação da soldagem de pinos em condições subaquáticas, inclusive utilizando processos de soldagem por fricção, além das tradicionais técnicas de soldagem a arco, como o uso de Eletrodo Revestido e Arame Tubular (CHANDIMA RATNAYAKE; BREVIK, 2014).

Figura 43 – Exemplos de aplicações da soldagem de pinos na construção naval



Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016) (HILBIG, 2021c) (HILBIG, 2021a)

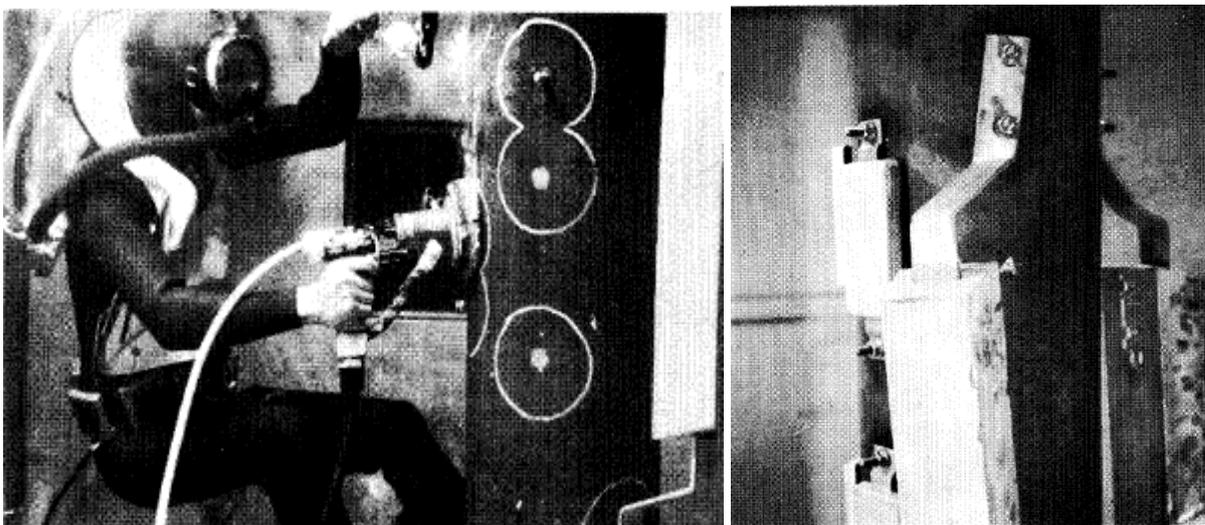
Na soldagem subaquática de pinos, ao contrário dos processos utilizados tradicionalmente, verifica-se que o procedimento converge em um elemento-chave: o uso de uma câmara e bombeamento dá água para fora da região onde será realizada a solda (BRÄTZ et al., 2019). Com esse componente busca-se superar os desafios únicos apresentados pelo ambiente subaquático. A presença de água ao redor da área de soldagem pode introduzir variáveis imprevisíveis e adversas, afetando diretamente a qualidade da solda e a execução do processo de soldagem. A barreira protetora que isola a região de soldagem da água, permite a formação de um arco elétrico estável em um ambiente quase seco.

Esta técnica, utilizando sistemas próprios de soldagem de pinos, embora desafiadora devido ao ambiente ainda úmido, tem sido estudada e evidenciado a sua adaptabilidade, sobretudo entre as décadas de 1970 e 1980, (HAMASAKI; TATEIWA, 1979), (SMITH; WILLIAMS, 1986). Apesar de serem encontradas patentes de dispositivos portáteis de soldagem subaquática de pinos já em 1942 (CRECCA; BISSELL, 1943), foram Masubuchi e Kutsuna (1975) que apresentaram maior destaque nesta área. A patente depositada (US Patent 3989920A) descreve que o pino a ser soldado é colocado dentro de um compartimento à prova d'água na ponta da pistola. Uma bomba de água evacua o compartimento, e um fluxo de gás (como o

argônio ou CO₂) é usado para expulsar a água e secar a região onde ocorrerá a soldagem. Alguns anos depois, Masubuchi et al. (1978), demonstraram na conferência “*The Ocean Challenge*” a viabilidade da soldagem de pinos sob a água, usando pinos de aço de baixo carbono em placas base de diferentes espessuras. O grupo formado pelo professor Koichi Masubuchi do MIT, Hironori Ozaki da *Kobe Japan Ltd.* e pelo engenheiro Jun-ichi Chiba da *Mitsui Shipbuilding & Engineering Co., Ltd.*, realizaram avaliações, incluindo testes de tração, dobramento e análises metalúrgicas, e confirmaram a eficácia do processo em condições subaquáticas. Após as primeiras demonstrações de viabilidade e emprego da soldagem de pinos subaquática outros estudos foram realizados nesta área.

Hamasaki e Tateiwa (1979) detalham as modificações necessárias para adaptar a pistola de soldagem para uso subaquático, incluindo torná-la à prova d'água e adicionar um invólucro de ar para expulsar a água. Foram realizados testes em profundidades de 0,3 m e 50 m. No trabalho, o *Stud Welding* foi utilizado para fixação de anodos anticorrosivos em estruturas subaquáticas. A resistência da solda obtida, mesmo a 50 m de profundidade, mostrou-se tão eficaz quanto a soldagem realizada na superfície.

Figura 44 – Soldagem subaquática de pinos para fixação de anodos anticorrosivos



Fonte: (HAMASAKI; TATEIWA, 1979)

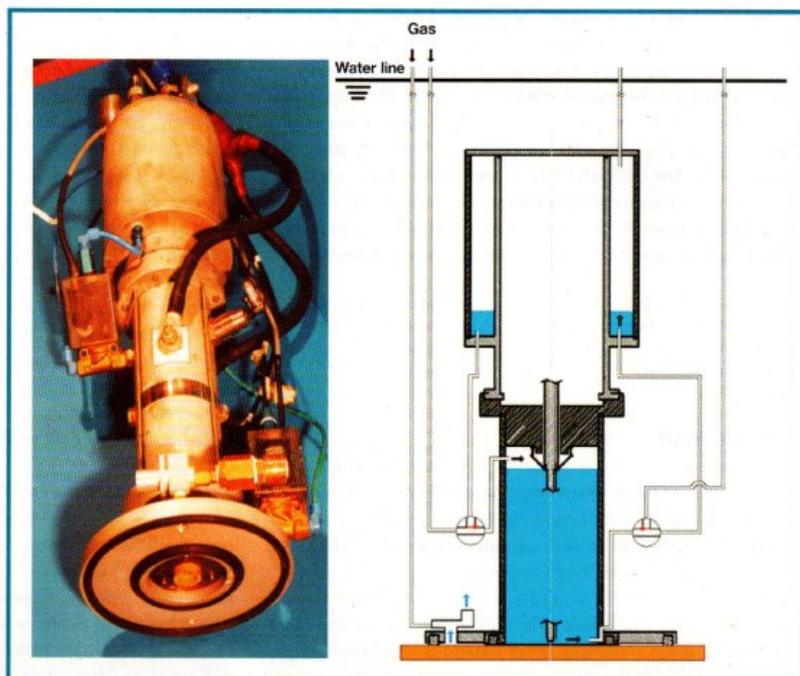
Pruti Jr. (1984) apresenta uma investigação sobre o uso prático e a utilidade de uma pistola de soldagem de pinos subaquática desenvolvida pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). O estudo mostra diversas aplicações práticas como

reparos rápidos em embarcações danificadas e manutenção de estruturas como plataformas *offshore* e seus desafios.

Smith e Williams (1986) desenvolveram e descrevem o funcionamento de um curioso sistema, com configurações semelhantes a patenteada, incluindo o uso de uma câmara fechada, manutenção da pressão de gás inerte e o processo de secagem da área de soldagem para soldagem de pinos automática. A diferença estava na geração do arco que era conferida pelo processo TIG e podia ser operada por veículos operados remotamente (ROVs). No entanto, infelizmente, não foram encontradas imagens do equipamento ou informações que possibilitassem uma avaliação objetiva desta tecnologia. Bach et al. (2004) e Brätz et al. (2019) evidenciam a aplicação do *Stud Welding* em ambiente subaquático com ênfase no desenvolvimento de equipamentos e técnicas para a soldagem subaquática de pinos, incluindo a criação de um protótipo de pistola de soldagem. O dispositivo é projetado para funcionar em profundidades de até 50 metros, tanto manualmente quanto de forma automatizada. Um aspecto notável é a adaptação da tecnologia de soldagem de pinos, tradicionalmente usada em ambiente seco, para o ambiente hiperbárico úmido.

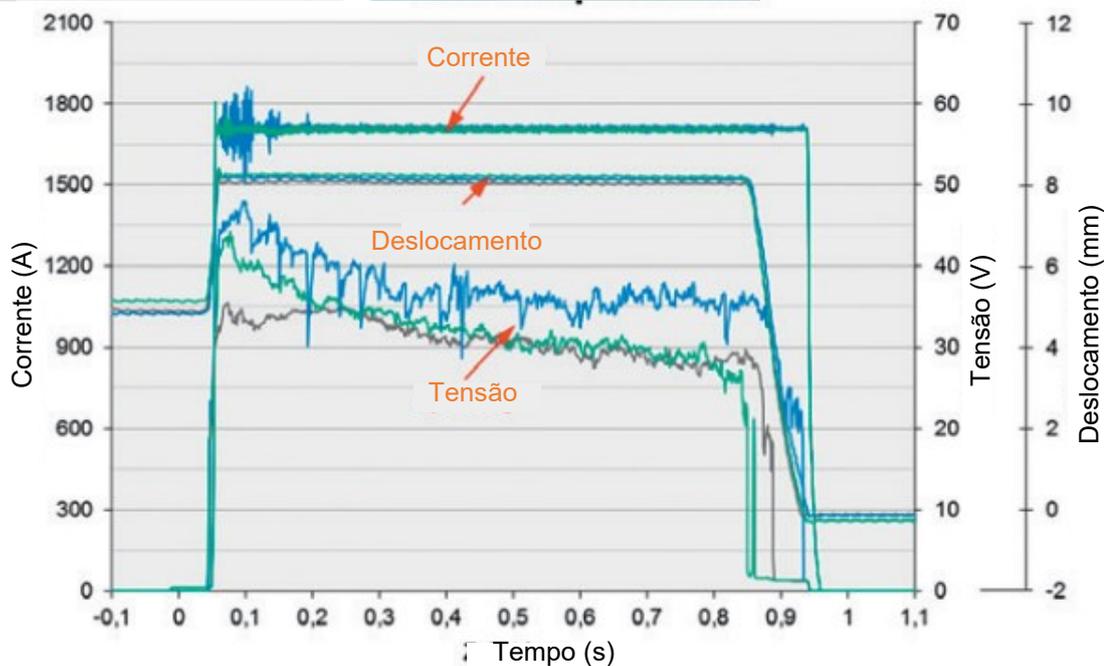
No estudo, a abordagem "semi-úmida" para a soldagem subaquática é destacada, permitindo a fabricação de juntas soldadas adequadas de forma reprodutível. As avaliações realizadas por Bach et al. (2004) reafirmam que as soldas produzidas embaixo d'água podem apresentar qualidade comparável às realizadas em condições terrestres e que a atmosfera proporcionada pelo equipamento (Figura 45), permitiu a soldagem em diferentes posições e utilizando diversos materiais, como diferentes ligas de níquel e aço carbono. Além disso, as avaliações da qualidade das soldas indicam que este processo é adequado para qualquer posição de trabalho (BACH et al., 2004). Brätz et al., (2019), anos mais tarde e para mesma aplicação subaquática, ressalta a importância de um ambiente de soldagem seco combinado com o uso de agentes hidrofóbicos, inclusive na composição química do anel cerâmico quando utilizado. O estudo evidenciou defeitos nas soldas em situações úmidas e a presença do anel hidrofóbico sugere uma tentativa de melhorar a soldagem em tais ambientes, protegendo a área de soldagem da água ou de outros fluidos. A Figura 46 ilustra a seção transversal e o comportamento dos sinais elétricos das soldas realizadas em três condições distintas.

Figura 45 – Dispositivo de soldagem manual de pinos em ambiente subaquático



Fonte: Adaptado (BACH et al., 2004)

Figura 46 – Comparação de três condições distintas de umidade na área da soldagem do pino.

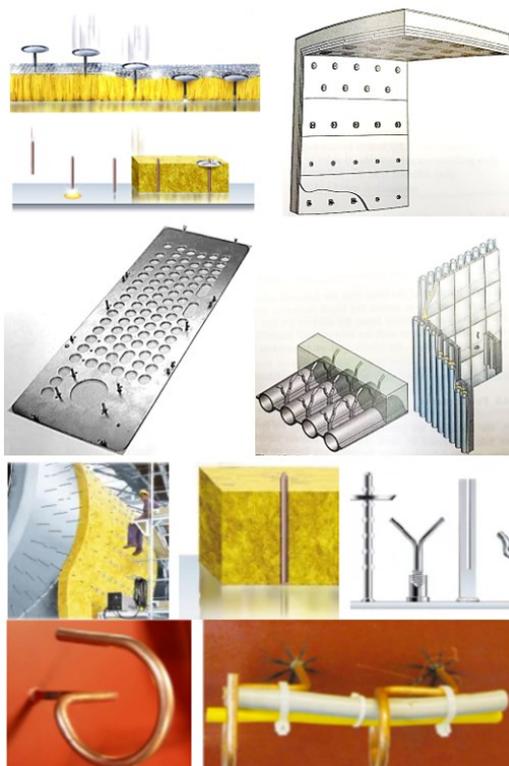


Fonte: Adaptado (BRÄTZ et al., 2019)

3.3.3.4 Aplicações em HVAC: Heating, Ventilating and Air Conditioning,

Na indústria de HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), a soldagem de pinos pode ser empregada em diversas situações e aplicações, promovendo fixações seguras de forma prática. As principais formas como a soldagem de pinos são aplicadas nesse contexto são para fixações de componentes em dutos de ar, montagem de painéis de isolamentos térmicos e acústicos, instalação de sistemas de suporte e suspensão, fixação de painéis de componentes elétricos e acabamentos (LEE et al., 2009). Em alguns casos, os pinos são fixados na parede e posteriormente o isolamento é fixado nos pinos. Isso é possível devido a geometria do pino que possui um corpo fino e uma extremidade pontiaguda, favorecendo a implantação das mantas de isolamento nas paredes no teto das acomodações. Para que o isolamento não se desprenda da parede, estes tipos de pino possuem um suporte no formato de prato metálico que é preso no corpo do pino garantindo a fixação do isolador. Os pinos de ancoragem do tipo asa de gaivota também são utilizados para fixar multicamadas de chapas de isolamento contra corrosão em tubulações de tubos trocadores de calor (SILICON, 2024) (Figura 47).

Figura 47 – Exemplos de aplicações da soldagem de pinos em HVAC

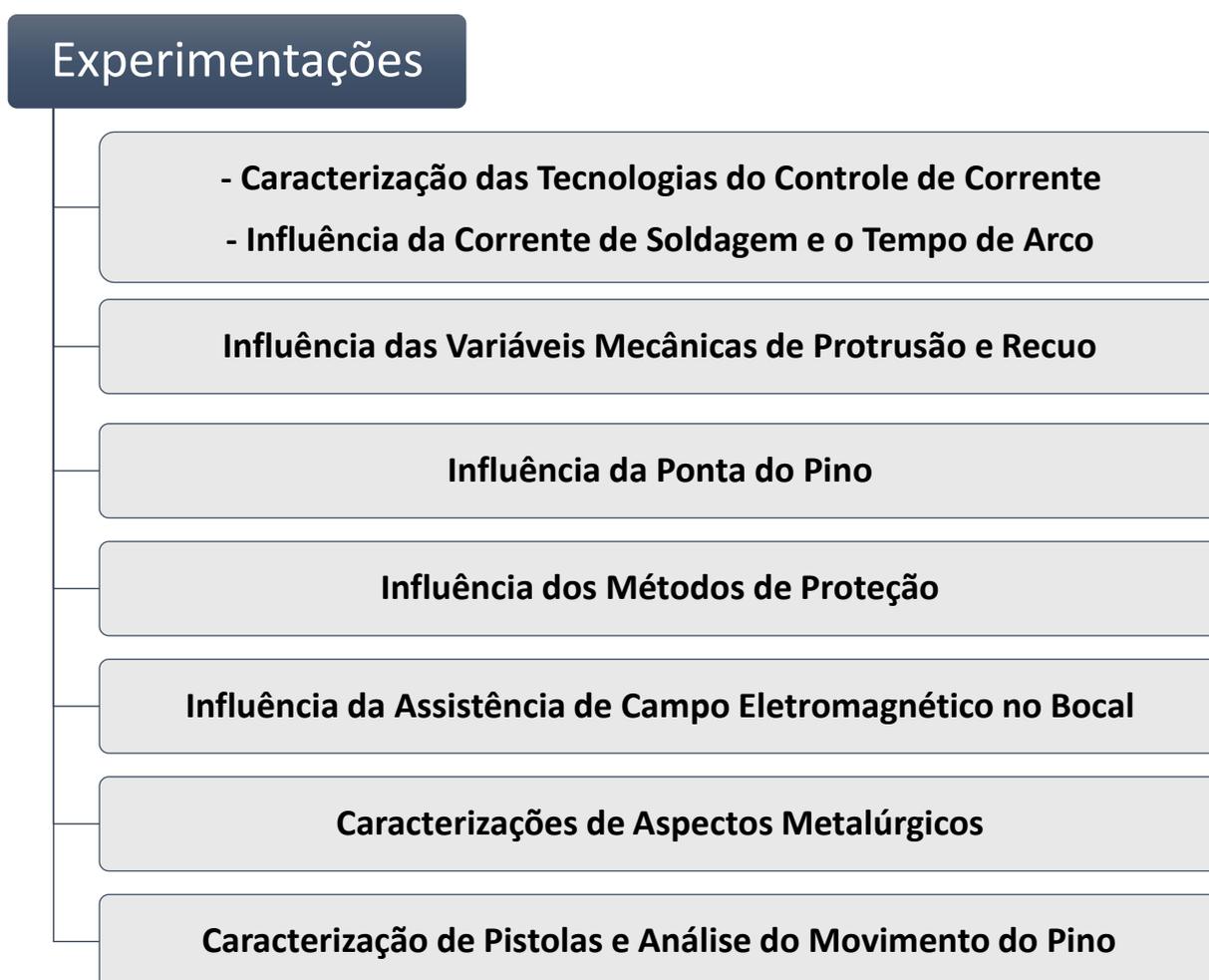


Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016)

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A metodologia experimental deste estudo foi desenvolvida para investigar os principais parâmetros que influenciam o processo *Stud Welding*, abrangendo variáveis elétricas e mecânicas, geometria do pino, influência do gás de proteção, efeito do campo magnético, aspectos metalúrgicos e comportamento das pistolas de soldagem. Os experimentos foram conduzidos com pinos de aço carbono de 10 mm de diâmetro, sob diferentes condições operacionais e métodos de análise específicos para cada variável estudada. A Figura 48 apresenta um diagrama esquemático das principais experimentações realizadas, destacando os aspectos investigados e sua relevância para a pesquisa.

Figura 48 – Diagrama esquemático das experimentações e principais análises



Fonte: O autor

4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Devido à complexidade do estudo, a organização dos experimentos e algumas condições complementares são abordadas parcialmente nas subseções de Resultados e Discussões, permitindo correlacionar os testes com os achados experimentais de forma mais rápida e objetiva. Essa abordagem favorece a compreensão das interações entre os parâmetros do processo e seus efeitos na qualidade da soldagem. Embora o diagrama da

Figura 48 apresente uma visão geral, os experimentos serão brevemente descritos e detalhados nos itens posteriores.

4.1.1 Caracterização das Tecnologias do Controle de Corrente

Os experimentos de Caracterização das Tecnologias do Controle de Corrente foram conduzidos com o objetivo de analisar os diferentes formatos de onda gerados por três fontes de soldagem distintas, transistorizadas e tiristorizada, além de comparar a aplicação de corrente constante e corrente pulsada a 10 Hz. Além disso, foi caracterizado a influência da polaridade na qualidade da solda. Para garantir a consistência dos testes, foram utilizados os seguintes parâmetros de soldagem: corrente de 750 A, tempo de arco de 325 ms, recuo de 2 mm, protrusão de 2,8 mm e pinos de aço carbono de 10 mm de diâmetro com ponta esférica de alumínio. A análise foi realizada por meio de filmagens em alta velocidade sincronizadas com oscilogramas, permitindo correlacionar o comportamento do arco elétrico e da poça de fusão sob diferentes condições de controle de corrente.

4.1.2 Influência da Corrente de Soldagem e o Tempo de Arco

Os experimentos desta seção foram conduzidos para avaliar a relação entre a corrente de soldagem e o tempo de arco, analisando o impacto dessas variáveis no processo de *Stud Welding*. Foram utilizadas combinações de corrente variando entre 1000 A e 690 A e tempo de arco entre 400 ms e 190 ms, com recuo de 2 mm e protrusão de 2,8 mm. Os ensaios foram realizados com o processo SW com gás (Ar+15%CO₂), pinos de aço carbono de 10 mm de diâmetro, com ponta cônica,

utilizando uma fonte transistorizada. O objetivo principal foi mapear e desenvolver novas combinações de parâmetros, correlacionando corrente e tempo de arco para otimizar o processo de soldagem. A análise incluiu a avaliação de oscilogramas e medições de resistência elétrica, além da discussão da influência da energia de soldagem sobre a qualidade da junta.

4.1.3 Influência das Variáveis Mecânicas de Protrusão e Recuo

As investigações sobre estas variáveis focaram na influência da protrusão e do recuo do pino. Para a protrusão, variou-se entre 0 e 4 mm, em incrementos de 1 mm, utilizando pinos roscados de 10 mm de diâmetro e 32 mm de comprimento, com ponta cônica. O comprimento final do pino foi medido para verificar o volume de pino perdido para formação do colar e/ou penetração. Para o recuo, foram variados nos ensaios apenas a distância do recuo entre 2,3 e 4 mm, enquanto a corrente de soldagem foi ajustada entre 500 e 1000 A em incrementos de 100 A. Além disso, foram testadas duas condições de proteção: anel cerâmico e mistura gasosa (Argônio + 15% CO₂). Foram registradas as tensões médias e analisado o comportamento da tensão sob diferentes parâmetros.

4.1.4 Influência da Ponta do Pino

A influência da geometria da ponta do pino foi avaliada com os mesmos parâmetros elétricos dos experimentos anteriores. Quatro configurações foram testadas: esfera de alumínio, ponta cônica, ponta fina e superfície plana (sem ponta). A caracterização incluiu análises macrográficas, filmagens de alta velocidade do arco e correlação com oscilogramas da tensão e corrente, buscando entender os efeitos da geometria na estabilidade da ignição do arco e na formação da poça de fusão.

4.1.5 Influência dos Meios de Proteção

Para a análise da influência dos meios de proteção, foram testadas quatro condições distintas de proteção do arco: com anel cerâmico, argônio puro, CO₂ puro e mistura de argônio com 15% de CO₂. Os ensaios foram realizados com os mesmos

parâmetros elétricos anteriores, utilizando pinos de aço carbono de 10 mm de diâmetro com ponta cônica. O comportamento do arco foi registrado por meio de filmagens em alta velocidade e análise de oscilogramas, permitindo avaliar o comportamento da tensão, a medição de temperatura e a potência gerada para cada condição.

4.1.6 Influência da Assistência de Campo Eletromagnético no Bocal

Os experimentos envolvendo a técnica de aplicação de campo eletromagnético no bocal da pistola, seguiram os parâmetros recomendados pelo fabricante da tecnologia em que o tempo de soldagem: 125 ms, corrente: 700 A, protrusão: 1,5 mm e recuo: 1,5 mm. Para comparação, foram testadas versões alternativas de soldagem, como arco retraído utilizando somente gás (C15) e anel cerâmico. Além disso, foi analisado o comportamento do procedimento utilizando diferentes correntes na bobina responsável por gerar o campo eletromagnético, variando entre 210, 400, 600, 810, 1005, 1200, 1350 e 1500 mA. Os registros foram analisados por meio de filmagens em alta velocidade e oscilogramas, buscando entender o impacto do campo magnético na fusão do pino e na diluição do material base.

4.1.7 Caracterizações de Aspectos Metalúrgicos

A caracterização metalúrgica das soldas incluiu análises micrográficas e ensaios de dureza Vickers, avaliando soldas dissimilares entre chapa de aço SAE 1020 e pino de aço inoxidável 304, bem como entre chapa de aço inoxidável 304 e pino de aço inoxidável 304. As medições de dureza foram realizadas em diferentes regiões da junta soldada para mapear o perfil de dureza. As análises foram conduzidas com um microscópio óptico com ampliação de 500x, permitindo observar características da zona fundida e da zona afetada pelo calor (ZAC). Além disso, foram realizadas medições das áreas da região da solda por meio do *software ImageJ*, possibilitando uma quantificação precisa das dimensões das regiões da solda e das variações microestruturais associadas ao processo de soldagem.

4.1.8 Caracterização de Pistolas e Análise do Movimento do Pino

Os experimentos nesta etapa tiveram como objetivo caracterizar os diferentes sistemas de acionamento das pistolas de soldagem e analisar o comportamento do movimento do pino durante o processo de *Stud Welding*. Foram testados três tipos principais de pistolas: pistolas com acionamento por eletroímã e mola, pistolas com eletroímã e mola com e sem amortecimento (modelos Soyer) e uma pistola motorizada (modelo *Tucker*). A caracterização incluiu radiografias para avaliação da estrutura interna das pistolas, bem como a análise do deslocamento do pino utilizando sensores de deslocamento linear (régua potenciométrica) e sistema 3SR. O principal critério de avaliação foi a capacidade das pistolas de manter o movimento regulado antes da solda, assegurando repetibilidade e precisão no processo.

Além disso, foram caracterizados e avaliados os efeitos do uso de técnicas de amortecimento durante o deslocamento do pino, utilizando especificamente uma pistola da Soyer modelo PH-4L. Nestes ensaios, foram empregados pinos de aço carbono de 22 mm de diâmetro (*Shear Connectors*), que são modelos típicos para aplicações onde o amortecimento é necessário, utilizando uma corrente de soldagem de 1900 A, tempo 900 ms, recuo de 3,5 mm e protrusão de 4 mm, com e sem amortecimento hidráulico da pistola. A análise caracterizou como essa tecnologia influencia a redução do impacto mecânico e a estabilidade das regiões fundidas do pino e da peça durante a soldagem, com o intuito de minimizar variações indesejadas no processo.

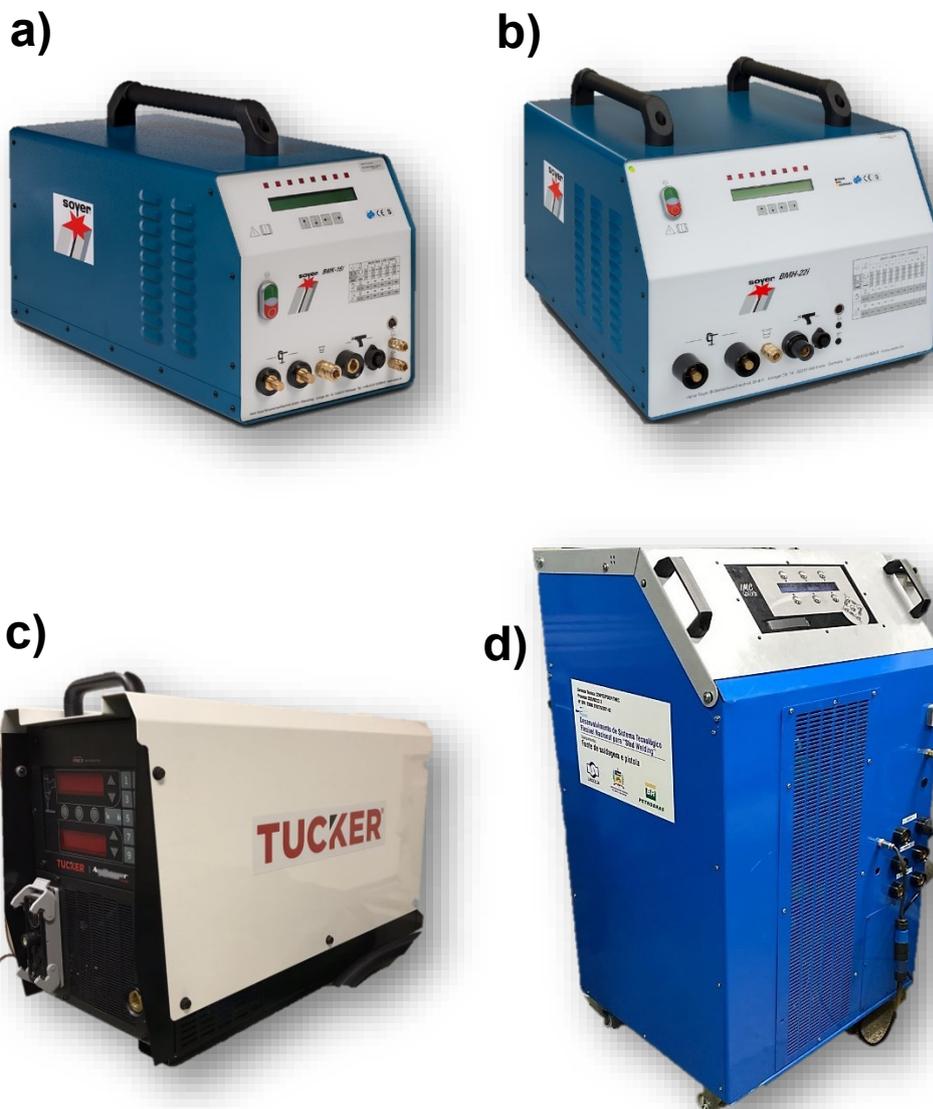
4.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a totalidade dos experimentos e estudos realizados e abordados neste trabalho, foi utilizada uma bancada de testes especialmente montada para este projeto no LABSOLDA-UFSC, composta por quatro fontes de soldagem para a modalidade Arco Retraído (SW-AR) do processo *Stud Welding*. A bancada experimental foi equipada com os seguintes modelos de fontes: Tucker/THW 1500, Soyer/BMK16i, Soyer/BMH-22i e IMC-Digiplus (Figura 49). A fonte Tucker/THW 1500 possui uma pistola que controla o deslocamento do pino por meio de um sistema de acionamento com deslocamento linear interno, permitindo a regulação eletrônica do recuo e ajuste de penetração. Já os modelos Soyer, que também são utilizados para o processo SW-AR, possuem um sistema de eletroímã solenoide/mola para realizar o movimento do pino em suas pistolas, sendo estes parâmetros regulados na própria pistola de soldagem por meio de sistemas mecânicos como batentes de fim de curso da mola para o recuo e uma pequena protrusão do pino para fora do anel cerâmico, regulada por meio do deslizamento de hastes de fixação, conforme explicado nos itens anteriores do presente trabalho.

As fontes de soldagem mantêm o sinal de corrente constante ao longo do processo, no entanto, os modelos se diferem, principalmente, pela sua capacidade de fornecer corrente máxima para o processo. Além disso, a fonte de soldagem Tucker, possui sistemas de atuação integrados como regulação de parâmetros elétricos não-convencionais como, controle da penetração, aplicação de corrente elétrica pós soldagem e controle de parâmetros de movimentação do pino como recuo e velocidade de mergulho do pino. Este equipamento pode ser considerado como um equipamento que possui um sistema avançado de controle de parâmetros de pistola, além de possibilitar a utilização de corrente pulsada no processo, demonstrando superioridade no controle de parâmetros envolvidos no processo. Até o momento, não foram encontradas informações em literatura especializada sobre a atuação e influência desses sistemas tampouco suas influências para o processo, além de vagas informações fornecidas pelo manual do fabricante. Foi objetivo deste trabalho testar e caracterizar a influência de algumas dessas variáveis até então pouco exploradas em trabalhos acadêmicos da área.

Figura 49 – Modelos das fontes de soldagem de pinos utilizadas na bancada experimental.

a) Soyer/BMK16i, b) Soyer/BMH-22i, c) Tucker/THW 1500, d) IMC – Solda Pino



Fonte: O autor

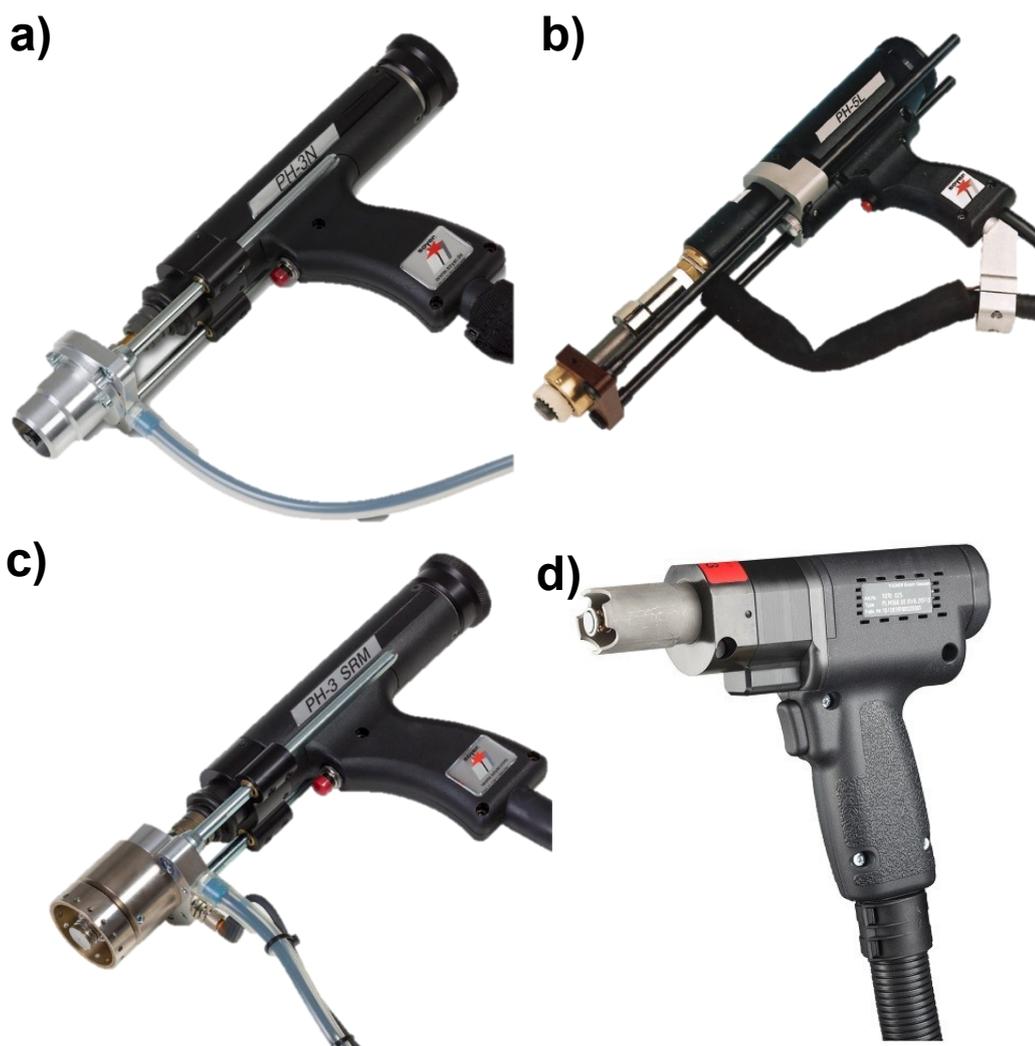
No que diz respeito às pistolas de soldagem, a pistola Soyer/PH-3N (Figura 50a), utiliza um sistema de acionamento baseado em eletroímã e mola para controlar o movimento do pino durante a soldagem. A pistola Soyer/PH-4L (Figura 50b) se diferencia pelo sistema de amortecimento hidráulico, que reduz significativamente o impacto do pino contra a superfície da peça. Essa tecnologia é essencial para a soldagem de pinos de maior diâmetro, minimizando deformações e

variações no processo, além de proporcionar um controle mais preciso da penetração da solda. A Soyer/PH-3N¹⁶ SRM (Figura 50c) incorpora a *tecnologia radial-symmetrischen Magnetfeld* (SRM), que utiliza um campo magnético radial simétrico para estabilizar o arco elétrico, direcionando a fusão do pino de maneira mais controlada. Por fim, a Tucker/PLM560 (Figura 50d) é um modelo motorizado, onde o movimento do pino é realizado por um motor linear. Conforme o fabricante do equipamento, este modelo garante maior precisão e repetibilidade do movimento.

A Figura 50 ilustra os modelos de pistolas de soldagem de pinos utilizadas no presente trabalho.

Figura 50 - Modelos das pistolas de soldagem de pinos utilizadas na bancada experimental.

a) Soyer/PH-3N, b) Soyer/PH-4L, c) Soyer/PH-3N16 SRM, d) Tucker/PLM560



Fonte: O autor

A medição das variáveis elétricas e do deslocamento do pino no processo *Stud Welding* é essencial para garantir a qualidade da solda, possibilitar o monitoramento em tempo real e fomentar o avanço em pesquisa e desenvolvimento. A análise de tensão e corrente elétrica permite verificar a conformidade com padrões e detectar variações que possam comprometer a soldagem. Apesar da rápida execução do processo, o monitoramento contínuo possibilita a identificação de anomalias e a implementação de correções imediatas, reduzindo a necessidade de retrabalho. Para esse fim, foi utilizado o Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR/IMC (Figura 51) que permite a aquisição das principais grandezas envolvidas no processo, incluindo corrente elétrica, tensão, deslocamento do pino (por meio de um transdutor de deslocamento linear), vazão de gás e temperatura em três canais de termopares para análise de ciclos térmicos.

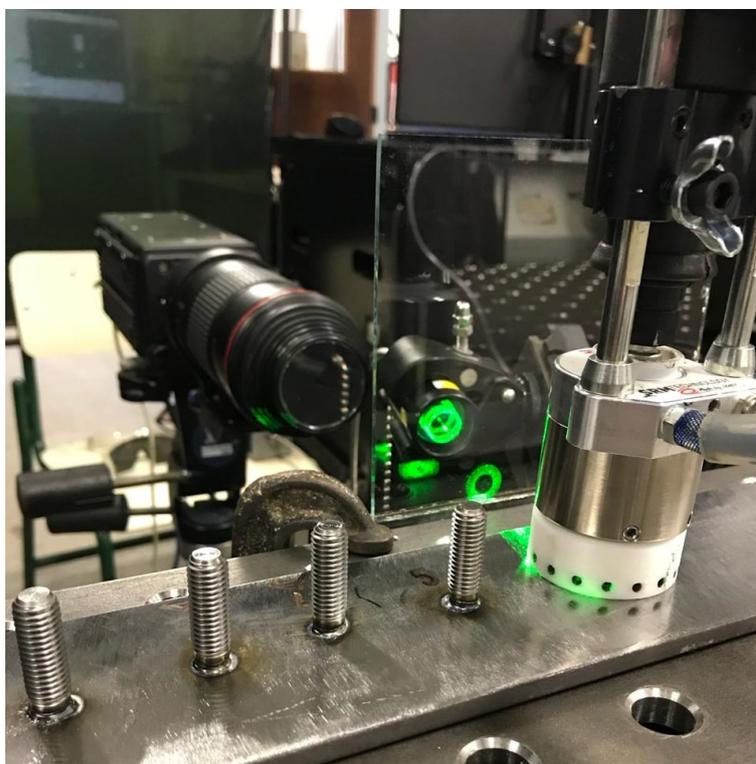
Além da medição das variáveis elétricas, a filmagem em alta velocidade tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a análise de processos de soldagem a arco, dada sua alta dinamicidade e a ocorrência da fusão e solidificação do metal em frações de segundo. Esse método permite capturar detalhes do comportamento do arco elétrico, formação da poça de fusão e interação do metal de base com o material de adição, viabilizando uma análise mais precisa de fenômenos como a transferência metálica, estabilidade do arco e possíveis defeitos. Assim, foi montada uma estrutura de filmagem em alta velocidade na bancada experimental para caracterizar os diferentes processos de *Stud Welding* e analisar detalhadamente os efeitos dos parâmetros de soldagem, como corrente, tensão e deslocamento do pino (Figura 52). A configuração utilizada incluiu uma câmera IDT/Y4S2, uma lente macro Canon EF 180 mm L USM e um sistema de iluminação a laser CAVITAR/Cavilux HF. Os vídeos obtidos são considerados materiais de referência valiosos, possibilitando análise posterior, compartilhamento de conhecimento e validação de resultados experimentais.

Figura 51 - Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR/IMC



Fonte: O autor

Figura 52 - Sistema de filmagem em alta velocidade



Fonte: O autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DO CONTROLE DE CORRENTE

O desenvolvimento da tecnologia de soldagem por arco tem visto uma evolução significativa, partindo dos primórdios com equipamentos baseados em tiristores para as modernas fontes que utilizam a tecnologia inversora, empregando transistores de potência. Neste capítulo de resultados serão evidenciadas as diferenças fundamentais entre os sinais de corrente gerados por fontes de soldagem tiristorizadas e inversoras, oferecendo uma compreensão detalhada das estratégias de controle de parâmetros de soldagem adotadas por cada tecnologia, ambas provenientes do mesmo fabricante. Além disso, foi possível testar condições diversas como a comparação entre a tradicional forma de onda de corrente constante com uma tecnologia não convencional em *Stud Welding*, como a corrente pulsada e a troca de polaridade.

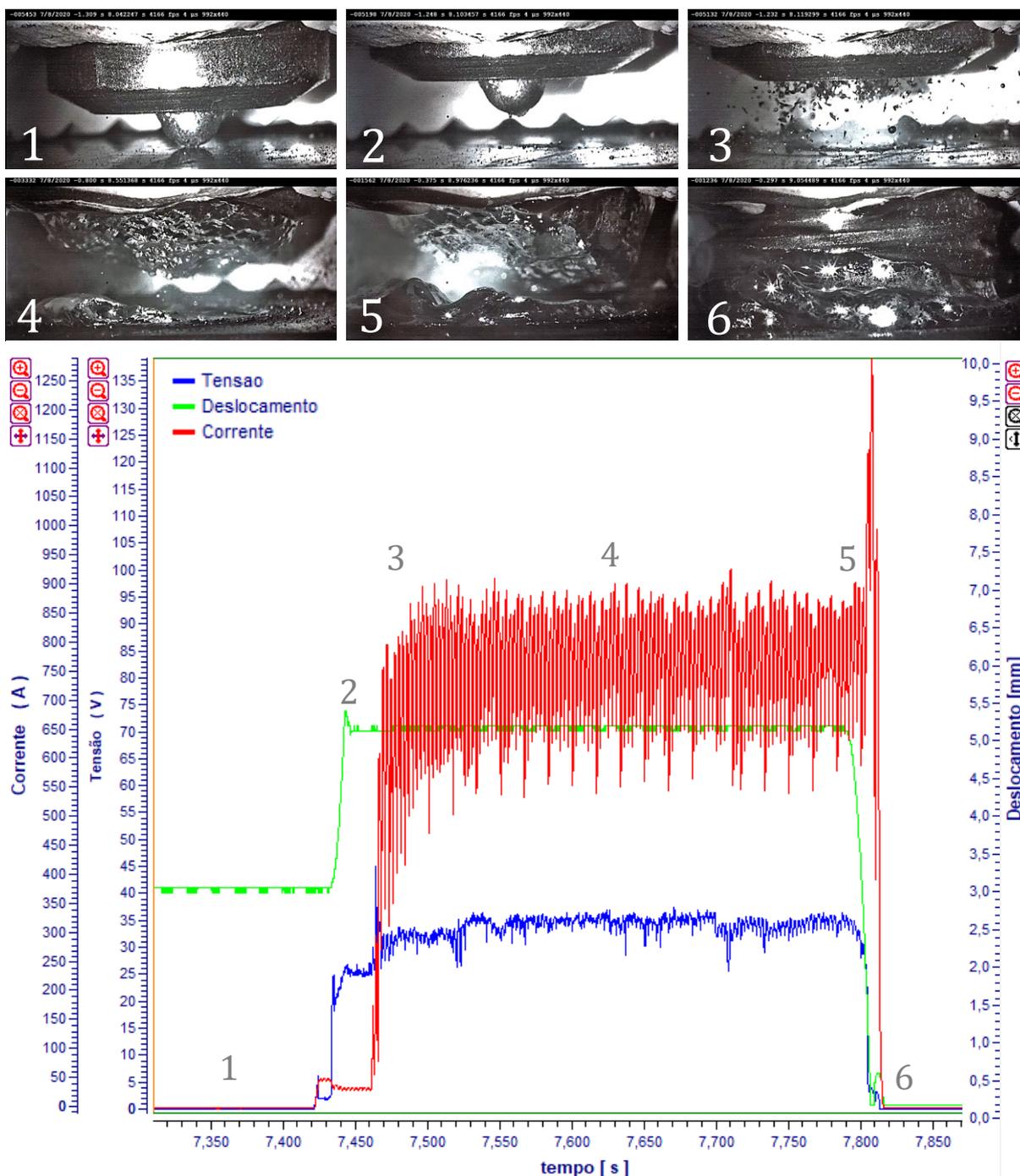
5.1.1 Soldagem de Pinos em Fonte Tiristorizada

Algumas soldas foram realizadas utilizando uma fonte de soldagem com tecnologia tiristorizada em equipamento comercial com o intuito de comparar e avaliar o comportamento do arco e a fusão do pino durante o processo. A fonte utilizada foi a Soyer modelo BMK-16 e o controle da energia deste equipamento acontece por meio de tiristores. O procedimento foi monitorado com o sistema de supervisão de soldagem (3SR) e filmado com câmera de alta velocidade sendo, então, possível acompanhar as principais etapas da soldagem no oscilograma sincronizado com as imagens (Figura 53).

No instante (1) a pistola foi posicionada na peça (pino-sobre-peça/PSP). Neste instante o pino apresenta sua extremidade (protrusão) para dentro do anel cerâmico, conferindo uma distância da protrusão regulada adicionada ao valor da altura da esfera, que corresponde aproximadamente 3 mm. No instante (2), o pino já iniciou o movimento e adiciona mais 2 mm (valor do recuo) em relação ao instante (1), se mantendo a uma distância total de 5 mm em relação a superfície da peça. Posteriormente, a fase de arco principal é iniciada, seguindo pelos instantes (3), (4) e (5). Nesses instantes, a corrente encontra-se no seu patamar mais elevado sendo

responsável pela fusão do pino em polaridade negativa e, posteriormente, inicia o movimento de descida até encontrar a peça e formar o colar de solda.

Figura 53 – Oscilograma do processo *Stud Welding* por arco retraído com fonte tiristorizada para pino de 10 mm de diâmetro em aço carbono



Fonte: O autor

No oscilograma obtido a partir da fonte tiristorizada, fica evidente que o sinal da corrente apresenta variações significativas em seu valor, que varia entre 500 A e 950

A durante a fase de arco principal. No final do processo, a corrente atinge níveis ainda maiores do que os regulados, chegando a um pico de corrente de aproximadamente 1300 A medidos. Apesar disso, é possível analisar visualmente no oscilograma o comportamento da corrente média. Ainda que o processo aconteça em tempo muito curto, de aproximadamente 325 ms, a corrente média fornecida pelo equipamento tiristorizado foi medida e manteve-se em uma faixa de 750 A. A frequência média de oscilação da corrente foi calculada, a partir do oscilograma, e o resultado foi de 333 Hz (Figura 54).

As características dos sinais elétricos desta tecnologia são esperadas em equipamentos controlados por tiristores. As fontes de soldagem tiristorizadas incorporam dispositivos semicondutores conhecidos como tiristores ou SCRs (*Silicon-Controlled Rectifiers*), que operam por meio de sinais de disparo para controlar a passagem de corrente ou da tensão média ou eficaz. A natureza dos tiristores, que atuam como interruptores eletrônicos unidirecionais, implica em uma transição menos suave da corrente, podendo resultar em oscilações no sinal. Além disso, os equipamentos de soldagem tiristorizados têm uma dependência direta com a frequência da rede elétrica. Em fontes de soldagem tiristorizadas, a corrente alternada da rede é geralmente retificada para corrente contínua (DC) e depois, se necessário, reconduzida em uma frequência diferente usando uma configuração de circuito que pode incluir os tiristores operando em modos de comutação rápidos. Esse processo de "*chopping*" ou modulação da corrente pode efetivamente resultar em uma forma de onda de saída com uma frequência diferente da entrada.

O disparo dos tiristores em um retificador controlado é sincronizado com a forma de onda da corrente alternada da rede elétrica. Ou seja, para cada ciclo da onda de corrente alternada (AC), os tiristores são disparados em um ponto específico, chamado de ângulo de disparo. Isso determina a porção do ciclo AC que é permitida passar, o que afeta a saída do retificador e, conseqüentemente, a corrente de soldagem. A frequência da rede, sendo 60 Hz ou 50 Hz, define o número de oportunidades por segundo para disparar os tiristores. Além disso, a frequência da rede também pode influenciar a forma de onda da corrente de saída após a retificação. Embora a corrente de saída seja geralmente uma corrente contínua (DC), o disparo controlado dos tiristores pode criar uma forma de onda pulsante cujas características ainda refletem a frequência da corrente de entrada da rede (ver Figura 54). Além da forma de onda, é possível verificar os pontos de aquisição no sinal da corrente.

Em aplicações de soldagem que exigem algum tipo de ajuste fino na corrente para melhorar a qualidade da solda, as fontes tiristorizadas podem enfrentar desafios de solicitação devido à natureza do sinal de corrente. Embora o controle seja eletrônico, o sinal gerado pode não ser ideal para diferentes tipos de processos de soldagem. Por isso, as fontes tiristorizadas têm perdido espaço como a tecnologia dominante na área de soldagem, sendo gradualmente substituídas por fontes baseadas em transistores (DUTRA, 2023).

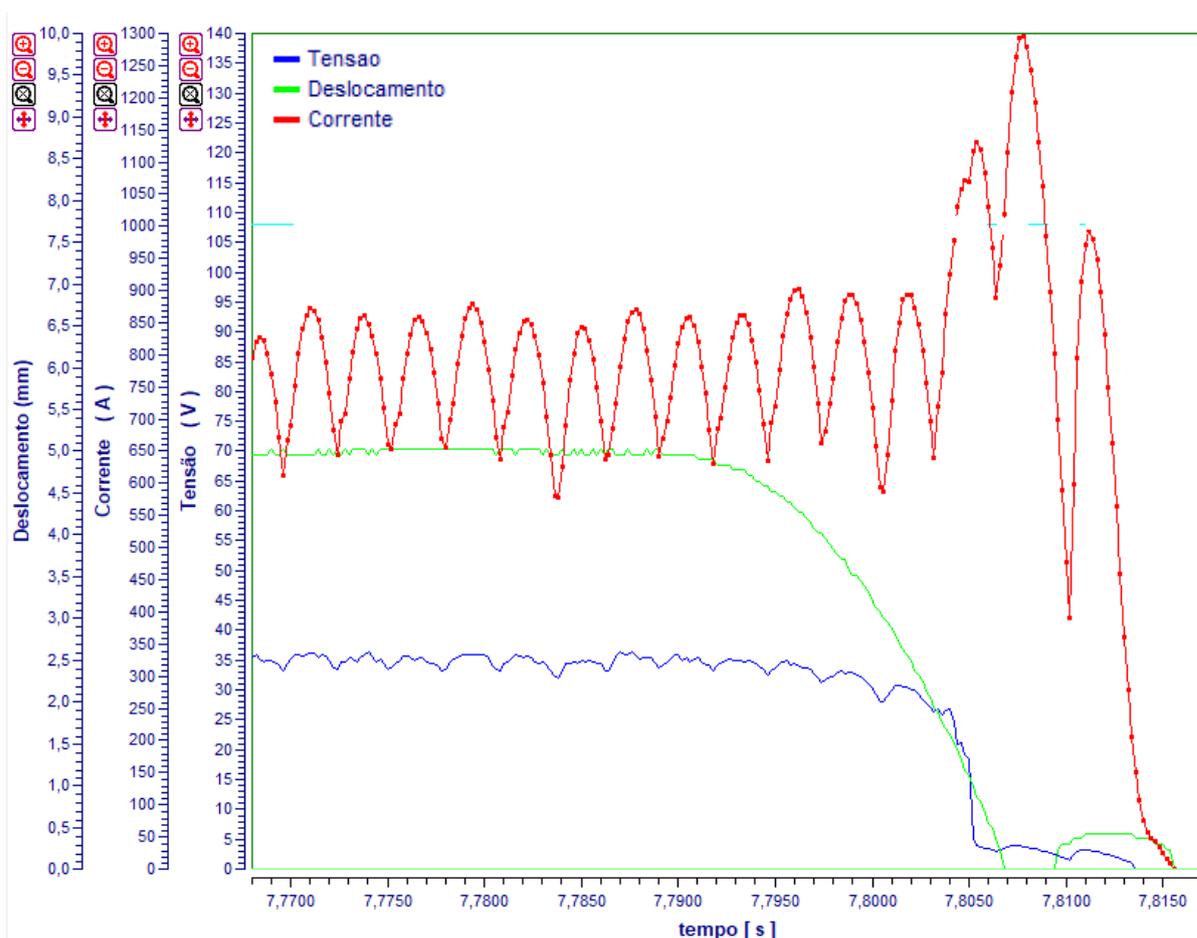


Figura 54 – Detalhe na região final do oscilograma da Figura 53

No entanto, embora o sinal de corrente tenha apresentado flutuações elevadas, foi possível verificar por meio das filmagens que o arco elétrico não apresentou dificuldade em manter a uniformidade e realizar a fusão do pino.

5.1.2 Soldagem de Pinos em Fonte Transistorizada

Nos testes com a tecnologia transistorizada, a fonte utilizada foi a Soyer modelo BMK-16i (inversora). Em contraste ao modelo anterior, as fontes de soldagem inversoras representam um avanço tecnológico significativo, utilizando transistores de potência, como IGBTs (Transistor Bipolar de Porta Isolada), para realizar a conversão de corrente. Esses dispositivos permitem a modulação da corrente elétrica (chaveamento), convertendo a corrente alternada (CA) em uma corrente de alta frequência e, depois, ajustando-a conforme necessário para o processo de soldagem.

Os ensaios com a fonte transistorizada também foram monitorados e filmados com os sistemas de supervisão de soldagem já citados e os instantes de cada fase da solda apresentam similaridade com o oscilograma obtido na Figura 53. A principal diferença reside no fato do sinal de corrente e tensão apresentarem estabilidade maior no quesito de controle da corrente média e variações no sinal da tensão de arco.

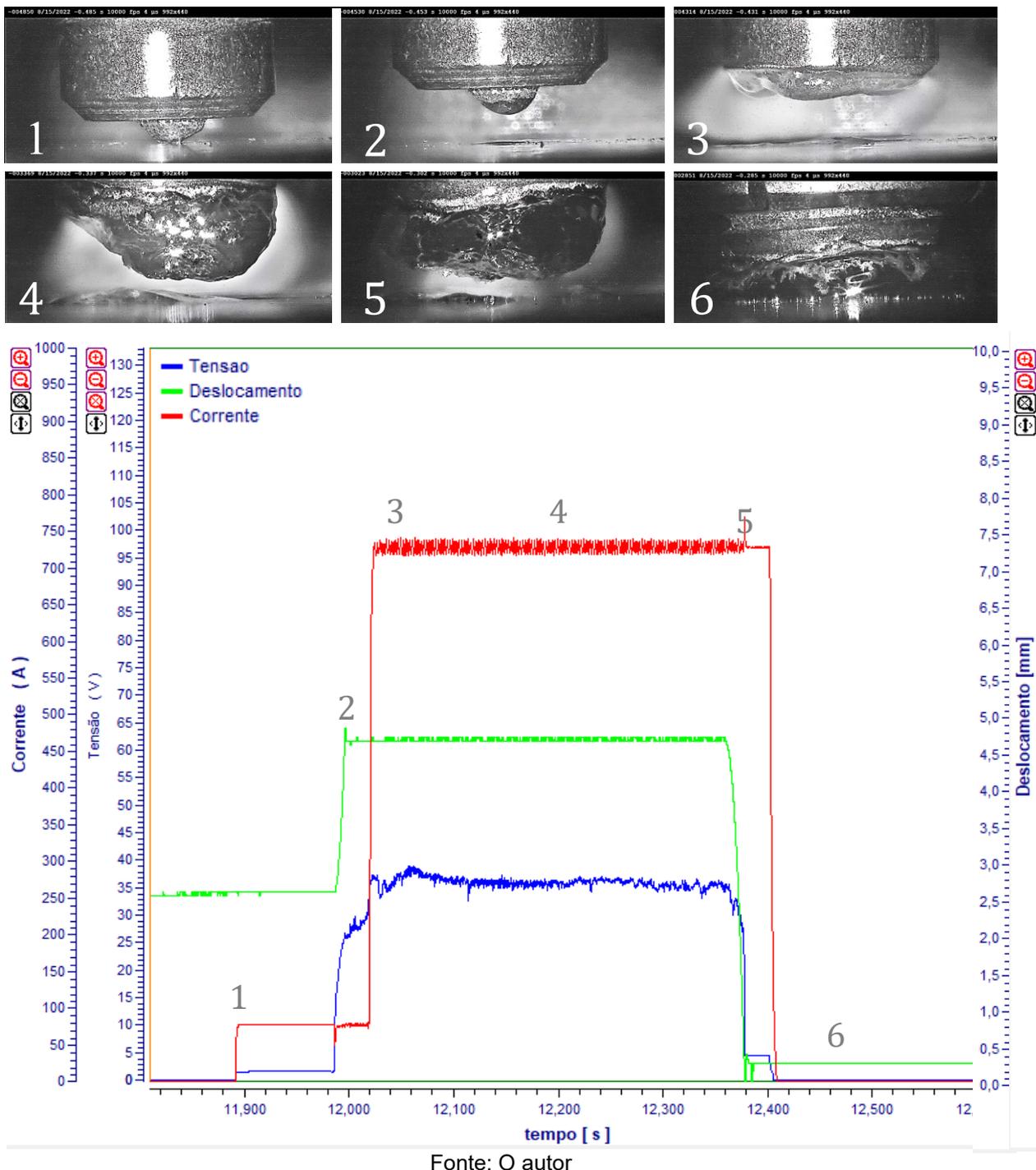
A explicação para tal característica, se baseia no processo de operação de fontes chaveadas, inicialmente, onde a tensão alternada proveniente da rede elétrica é submetida a um processo de retificação, resultando em uma tensão de corrente contínua. Essa etapa consiste na conversão de uma tensão que varia de forma sinusoidal para uma tensão de polaridade fixa e valor médio positivo.

Posteriormente, a tensão contínua retificada é sujeita a um regime de chaveamento em alta frequência. Este chaveamento é efetuado pelo IGBT, localizado no circuito primário do transformador, operando em uma frequência substancialmente superior à frequência da rede elétrica, tipicamente na ordem de dezenas ou centenas de quilohertz. Assim, através do fenômeno da indução eletromagnética, a corrente alternada de alta frequência gera uma tensão no enrolamento secundário do transformador. Essa tensão induzida pode ser ajustada para atender aos requisitos específicos da carga conectada (arco). Por consequência, a operação em alta frequência confere a vantagem de permitir o uso de transformadores de menor tamanho em comparação com os necessários para a operação em fontes não chaveadas. Na sequência, a tensão induzida no secundário é novamente convertida em corrente contínua, por meio de um circuito retificador. Um estágio subsequente de filtragem atenua as ondulações residuais, garantindo assim a obtenção de uma tensão de saída contínua e estável.

Finalmente, um circuito de controle é encarregado de monitorar a tensão de saída e efetuar os ajustes necessários no chaveamento, de maneira a manter essa tensão dentro de limites pré-estabelecidos. Este controle se mantém constante independente de flutuações na tensão de entrada ou variações de carga, assegurando assim a regulação efetiva da tensão fornecida pela fonte chaveada. Como resultado, isso cria uma forma de onda com muitos pequenos pulsos que após filtragem produzem uma linha quase lisa e estável de tensão ou corrente (Figura 55).

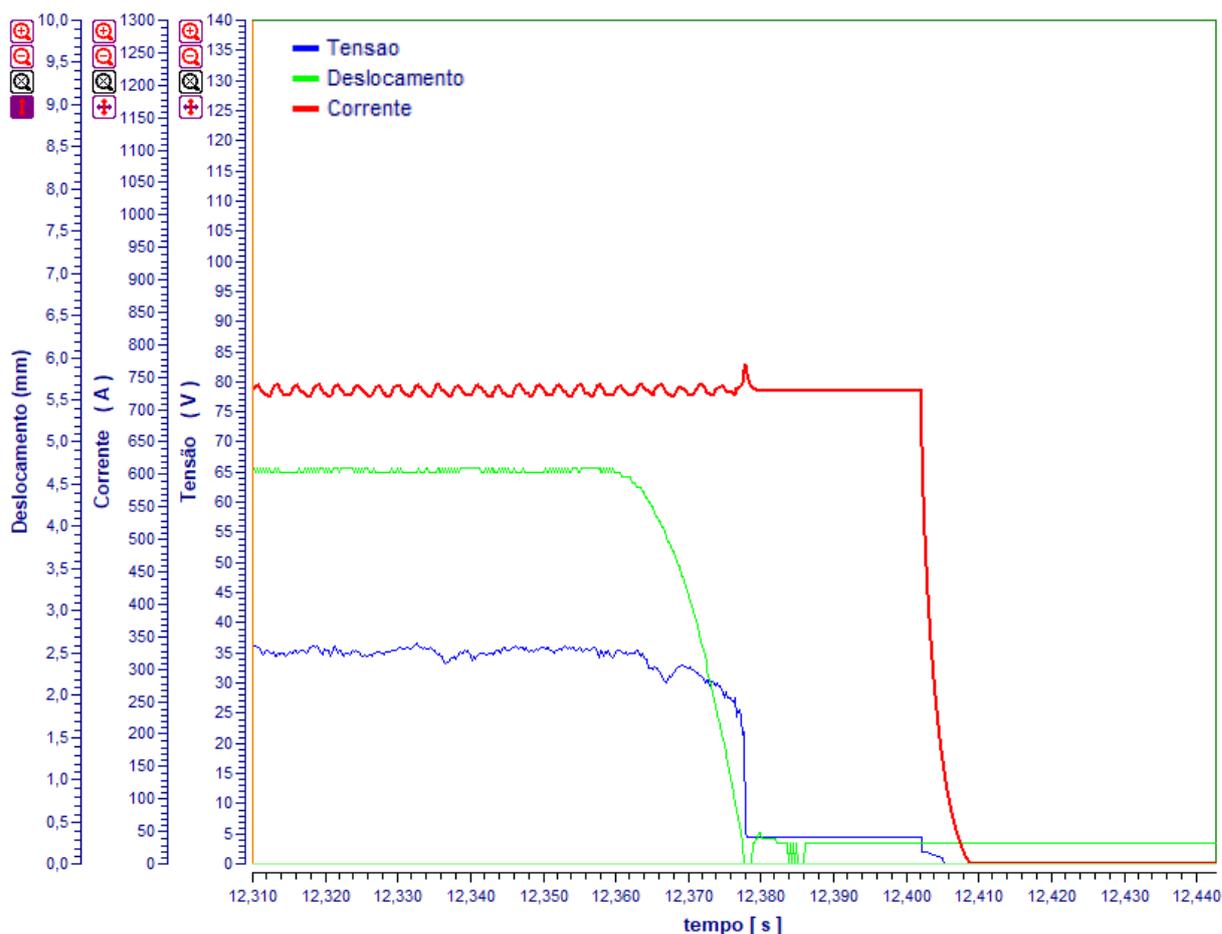
A comparação dos sinais de corrente entre fontes tiristorizadas e transistorizadas revela diferenças na capacidade de controle e pode influenciar na estabilidade do arco de soldagem. Enquanto as fontes tiristorizadas geram sinais de corrente com variações mais pronunciadas devido à natureza da atuação abrupta dos tiristores, as fontes inversoras apresentam uma característica distintamente mais estável e controlável.

Figura 55 - Oscilograma do processo *Stud Welding* por arco retraído com fonte transistorizada para pino de 10 mm de diâmetro em aço carbono



Esta capacidade de controle da corrente é essencial para soldagem e indispensável em processos de soldagem que exigem modulações específicas como corrente pulsada de onda quadrada e rampas de início e final do procedimento, empregada no TIG e no MIG/MAG por exemplo.

Figura 56 - Detalhe na região final do oscilograma da Figura 55



Fonte: O autor

Ainda é possível perceber que no final da solda com a fonte transistorizada, a corrente de soldagem não apresenta picos elevados após o mergulho do pino. No instante onde o pino toca a peça, (tensão próxima a 5 V), a fonte é levemente sensibilizada pelo curto-circuito e sobe aproximadamente 50 A além da corrente de soldagem programada, mantendo-a durante um tempo predeterminado (aproximadamente 30 ms) após a soldagem. Este recurso é utilizado por outros fabricantes e mantém a corrente no mesmo patamar da corrente de arco principal. Ainda que não haja um consenso definido sobre essa sobreposição de corrente após o mergulho do pino, acredita-se que, desta forma, assegura-se a manutenção do arco até que o pino termine o movimento de mergulho e o pino não seja submetido ao *cold plunge*, defeito provocado pelo mergulho atrasado do pino com relação ao tempo do fornecimento de corrente.

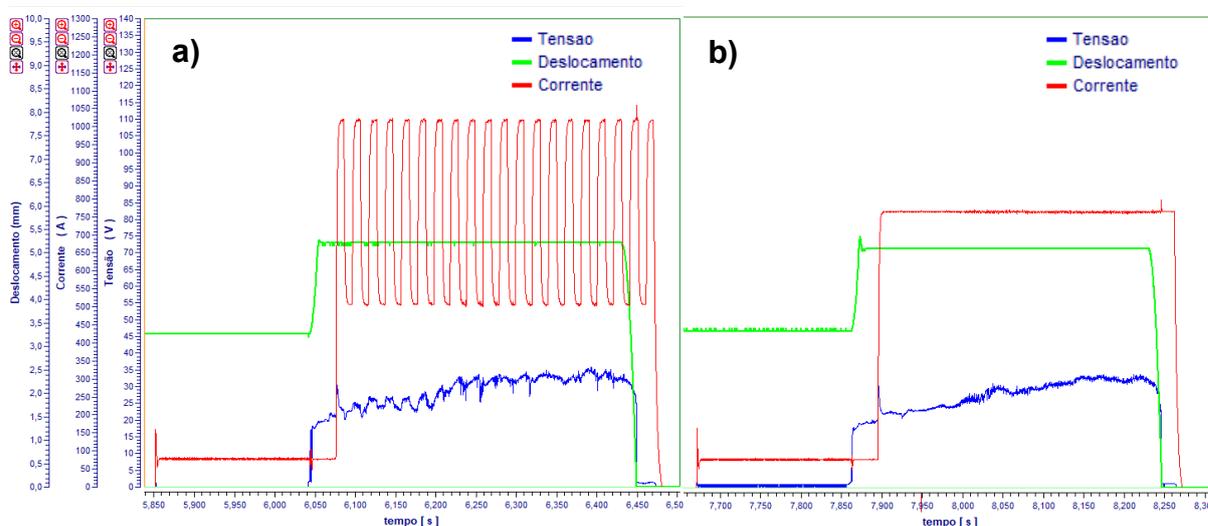
5.1.3 Soldagem de Pinos com corrente Pulsada e Constante

Na Figura 57, observa-se a comparação entre as configurações de corrente pulsada e constante, com e sem a utilização de gás de processo. É importante ressaltar que a utilização de corrente pulsada em *Stud Welding* não é comum. A forma de onda pulsada foi possível mediante ao desenvolvimento de uma fonte específica para soldagem pulsada, a IMC Digiplus – Solda Pino, desenvolvida no contexto deste trabalho de doutorado. Os oscilogramas de corrente mostram as diferenças entre os modos pulsado e constante para a mesma corrente média regulada em 750 A.

A utilização de corrente pulsada no processo *Stud Welding* foi programada e algumas soldas foram realizadas para posterior avaliação. Os valores de corrente de pulso (I_p) e base (I_b) foram regulados em 1000 A e 500 A respectivamente. Para os tempos de pulso (t_p) e base (t_b) foram regulados 10 ms para ambos, resultando numa frequência de processo de 50 Hz. A mistura gasosa utilizada foi Ar+15%CO₂. Os valores de protrusão (2,8 mm) e recuo (2,0 mm) foram regulados.

No oscilograma da Figura 59, é possível verificar o desempenho da fonte de soldagem desenvolvida e ilustra uma comparação entre diferentes condições de soldagem SW. A principal característica observada é a variação de tensão de acordo com os pulsos de corrente. Este comportamento é comum em processos de soldagem a arco pulsado, devido a variação de corrente. Conforme a primeira Lei de Ohm, a tensão terá que aumentar proporcionalmente ao aumento da corrente para manter o fluxo de elétrons. Além disso, é possível observar o aumento da tensão ao longo do tempo de soldagem. Neste caso, uma hipótese plausível para este fenômeno seria o aumento da resistência elétrica oriunda do aquecimento do pino durante a soldagem.

Figura 57 – Caracterização de diferentes formatos de onda para a mesma corrente média (750A) para a soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono
a) Corrente pulsada em 10Hz, b) Corrente constante



Fonte: O autor

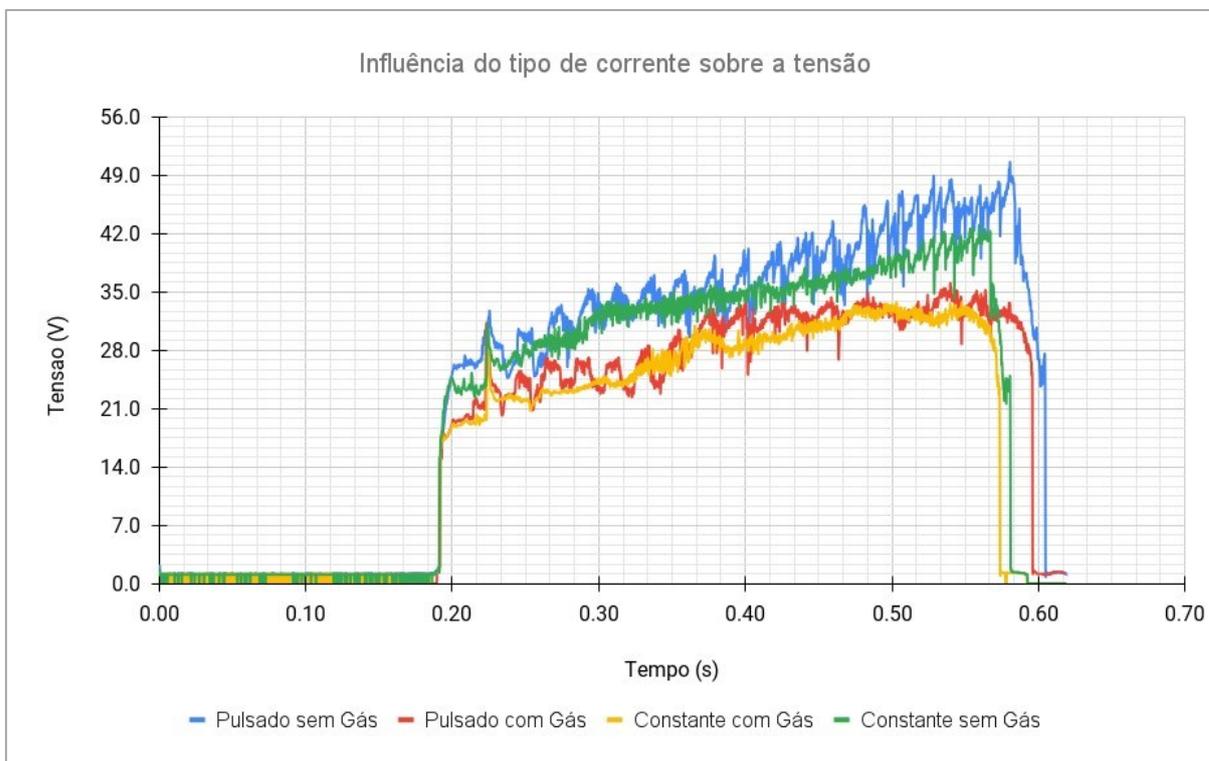
A corrente pulsada, caracterizada por suas variações de corrente de pulso (I_p) e corrente de base (I_b), pode ser abordada sob diferentes maneiras em soldagem. No MIG/MAG, a corrente pulsada viabiliza a transferência metálica por voo livre com valores de corrente média abaixo da corrente de transição. Essas variações permitem alterar a entrada de calor na peça, por exemplo. A corrente pulsada também se mostra essencial em alguns procedimentos específicos do mesmo processo e está diretamente ligada à transferência metálica. No processo TIG ela pode ser vista como uma ferramenta para mitigar problemas de estabilidade do arco e aspectos metalúrgicos, além de permitir ajustes finos durante a soldagem, como rampas de subida e descida. Além disso, no mesmo processo, a corrente pulsada pode ser estrategicamente utilizada para controlar a morfologia da poça de fusão (DUTRA, 2023).

Por outro lado, a corrente constante oferece um fluxo contínuo de energia, o que pode ser benéfico para o *Stud Welding*, mantendo constante a fusão do pino que apresenta uma secção transversal de dez a vinte vezes maior que um arame de alimentação do MIG/MAG, por exemplo. No entanto, a prática mostra que a corrente constante em patamares elevados, em alguns casos, aumenta o potencial de sopro magnético e o acúmulo de calor é maior, podendo levar a distorções a depender da estrutura ou tensões residuais indesejadas. Nesses casos, a corrente pulsada pode apresentar alguma vantagem de aplicação.

No SW, sendo a corrente de soldagem controlada, a tensão de soldagem permanece livre, variando de acordo com o nível de corrente, comprimento e resistência do arco de soldagem. A tensão, frequentemente utilizada em outros processos como uma ferramenta auxiliar para monitoração e de essencial análise (exemplo do controle do comprimento do arco no TIG), pode revelar informações importantes no processo SW. Variações na tensão podem indicar fenômenos transitórios no arco, como curtos-circuitos, que são críticos para a integridade da junta soldada, devido a interrupção no fornecimento de energia para a fusão, no caso da soldagem de pinos. Não obstante, os oscilogramas de tensão mostram que a presença de gás parece estabilizar a tensão durante o processo, evidenciando que neste caso o gás de proteção contribui para um arco mais estável e controlado.

Diferente de alguns oscilogramas mostrados anteriormente, o valor da tensão experimentou um aumento de tensão ao longo do procedimento em todas as condições testadas. As tensões médias medidas foram 36,5 V para o pulsado sem gás, 28,8 V para o pulsado com gás, 27,5 V para o constante com gás e 33,5 V para a condição constante sem gás. O comportamento da tensão reflete a interação entre o tipo de corrente (pulsada ou constante) e a presença de gás de proteção. A corrente pulsada gera picos que aumentam a energia do arco, resultando em tensões médias mais altas, especialmente na ausência de gás, onde a instabilidade do arco é maior. O gás de proteção estabiliza o arco e reduz a resistência elétrica, diminuindo a tensão necessária para sustentar o processo, como evidenciado pelos menores valores de tensão na configuração constante com gás (27,5 V). Em contraste, a ausência de gás eleva a tensão média, pois o arco se torna mais instável e menos eficiente. Assim, as variações observadas decorrem da influência combinada da corrente e do ambiente de proteção no comportamento do arco elétrico.

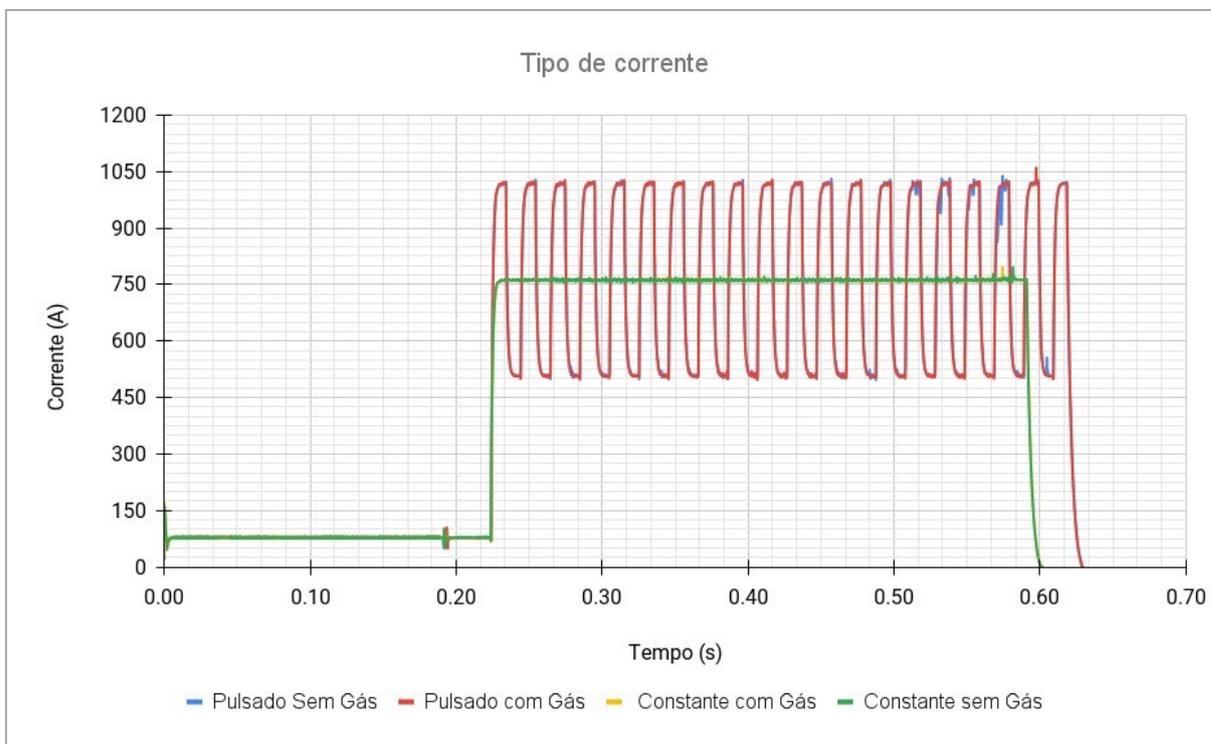
Figura 58 – Comportamento da tensão para diferentes formatos de onda e proteção do arco na soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono



Fonte: O autor

Samardžić, Klarić e Siewert (2007) utilizaram os sinais elétricos do processo, especialmente o sinal de tensão, para avaliar a estabilidade do processo SW sob diferentes condições de preparação da superfície da peça soldada. As condições com óleo, *primers* e umidade na superfície da peça foram testadas. Sendo a tensão um dos principais indicadores de instabilidade, os autores concluem que os defeitos estavam associados a distúrbios no arco elétrico durante o processo de soldagem observados no sinal da tensão. Nesse contexto, com intuito de verificar possíveis instabilidades no fornecimento de corrente pulsada, o procedimento foi repetido quatro vezes sob diferentes condições. As formas de ondas foram sobrepostas no oscilograma da Figura 59 para melhor interpretação. Assim, é possível verificar que o sinal de corrente é repetitivo e estável tanto pulsado quanto constante. As medições de corrente média com o equipamento 3SR resultaram em 759 A para pulsada com gás, 760 A para pulsada sem gás e 753 A para as condições de corrente constante com e sem gás.

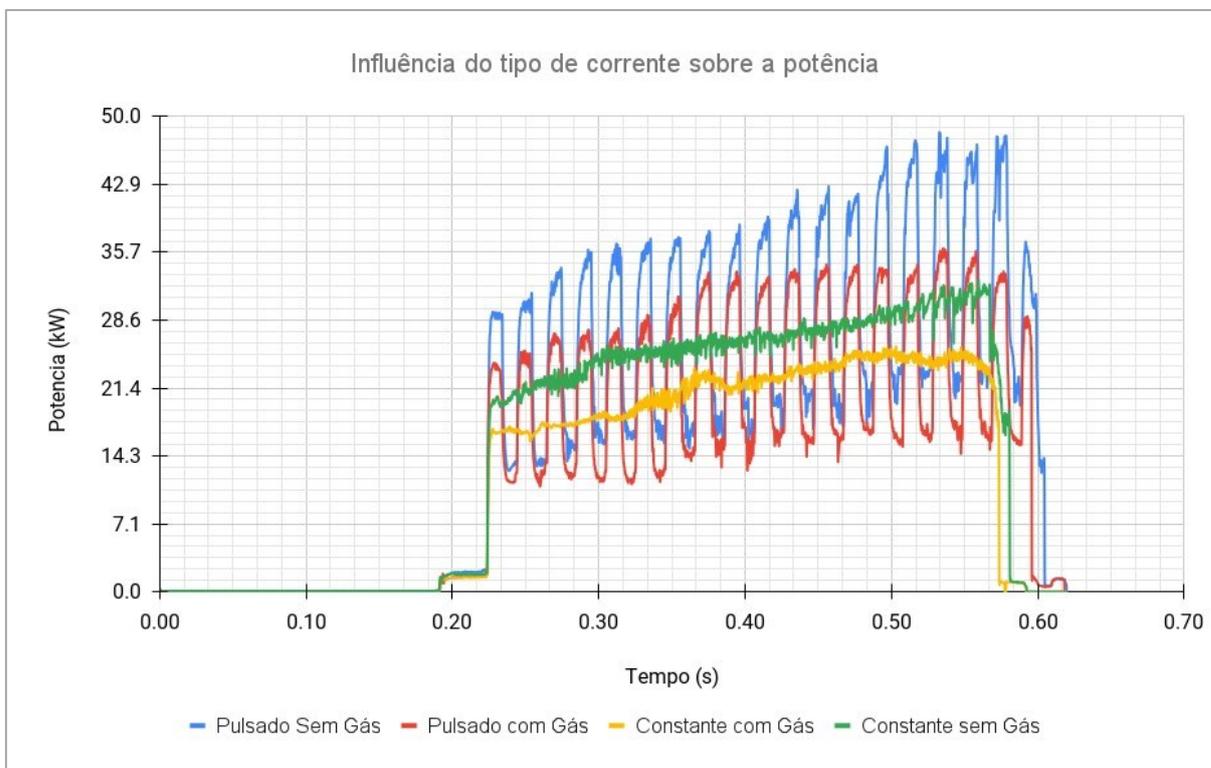
Figura 59 – Sobreposição dos sinais de corrente pulsada e constante para verificação de estabilidade do sinal. Corrente média 750A; frequência de pulsação 10Hz



Fonte: O autor

A potência em soldagem, sendo o produto da corrente e da tensão, reflete as tendências observadas nos dois primeiros gráficos. No modo pulsado, a potência oscila de acordo com a variação entre corrente de pulso e corrente de base, enquanto no modo constante, ela se mantém relativamente estável. Este comportamento é esperado, pois a potência pode influenciar diretamente a penetração da solda e a fusão do pino. Além disso, a potência é um indicativo, da quantidade total de energia fornecida ao processo. A análise do seu perfil ao longo do tempo oferece uma imagem compreensiva do ciclo de soldagem, por exemplo, evidenciando fases de aquecimento, manutenção e resfriamento.

Figura 60 - Comportamento da potência para diferentes formatos de onda e proteção do arco na soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono



A potência média verificada na fase de arco principal no modo pulsado apresentou valores de 25 kW sem gás e 19 kW na versão com gás. Com corrente constante o processo apresentou 18 kW na presença de gás e 23 kW sem gás. A presença do gás de processo em ambos os modos de corrente (pulsado e constante) parece fornecer resultados mais estáveis, o que é uma observação fundamental para o processo de *Stud Welding*. Desta forma, pode-se inferir que o gás de proteção é uma ferramenta estratégica, pois atua não apenas para proteger a poça de fusão de contaminação atmosférica, mas também para estabilizar o arco, mesmo em tempos de soldagem muito curtos, e com variações no valor de corrente. As macrografias das soldas realizadas nos modos pulsado e constante podem ser analisadas na Figura 61. Como esperado, a condição sem gás de proteção e sem anel cerâmico, realizada com o bocal de gás, porém com a vazão fechada, apresentou defeitos visuais na macrografia apenas na versão pulsada.

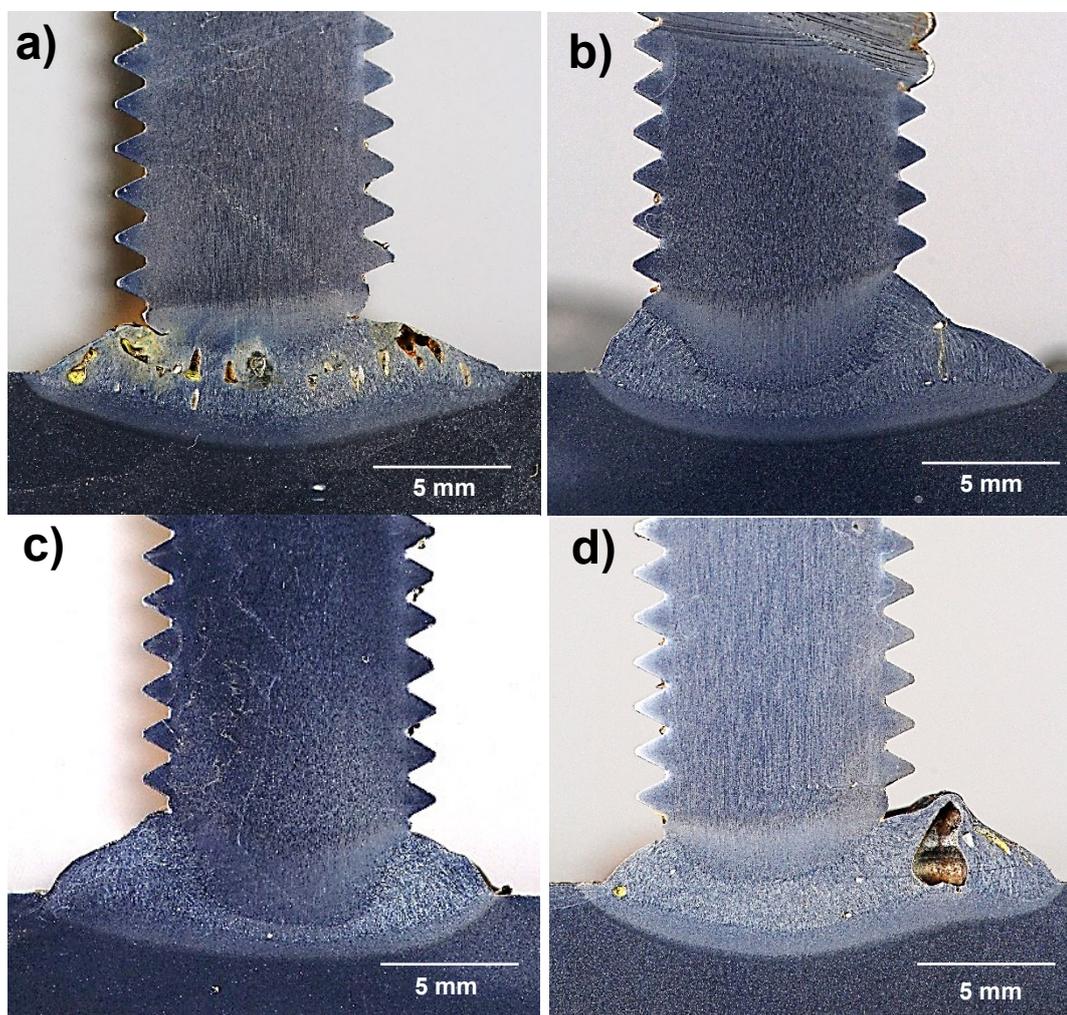
Essa observação reforça a importância do anel cerâmico no processo de soldagem, evidenciando sua dupla função. Primeiro, devido à sua dimensão reduzida e ao *design* específico com canais de desgaseificação, o anel cerâmico auxilia na

expulsão de gases nocivos à solda, reduzindo a presença de contaminantes na poça de fusão. Segundo ele diminui a taxa de resfriamento, proporcionando um resfriamento mais controlado e evitando a formação de defeitos típicos de resfriamento rápido, como porosidade.

A hipótese para os defeitos observados na condição sem gás com bocal de gás desligado está relacionada ao fato de que o bocal de gás, por ser maior do que o anel cerâmico, pode ter aprisionado ar atmosférico em seu interior, favorecendo a presença de oxigênio e nitrogênio na zona de fusão e prejudicando a qualidade da solda. Essa diferença entre as condições testadas demonstra a relevância do anel cerâmico como um componente essencial para garantir a integridade da solda quando não se utiliza proteção gasosa. Trillmich e Welz (2016) citam que ao considerar a suscetibilidade à formação de poros, é fundamental garantir que a corrente não seja reduzida abaixo de um valor mínimo específico para um determinado diâmetro do pino. Isso assegura a expulsão do vapor de metal formado no arco, mantendo a atmosfera suficientemente inerte para evitar reações indesejadas com nitrogênio e oxigênio. Como resultado, existe uma interdependência entre a corrente de soldagem e o tempo de soldagem.

Nas soldas (b), (c) e (d), ainda é possível observar que o colar de solda apresenta uma ligeira falta de uniformidade. Esta característica é comum quando acontece o desvio do arco para alguma borda do pino. Isso contribui para o aumento da fusão naquele ponto, empurrando material fundido para o lado onde houve o sopro. Também é possível observar um defeito volumétrico no mesmo lado do colar onde existe a maior quantidade de material solidificado, no entanto, por estar fora da região efetiva da solda (somente no colar) o defeito não afeta a integridade da solda.

Figura 61 – Influência do tipo de corrente e proteção. a) pulsado sem gás, b) pulsado com gás, c) constante com gás, d) constante sem gás



Fonte: O autor

5.1.4 Soldagem de Pinos em Polaridades Distintas

A polaridade em soldagem a arco é um requisito que afeta diretamente o bom funcionamento de determinado processo tanto com eletrodo consumível quanto nos processos a eletrodo não consumível. É comum a avaliação deste aspecto sobre a penetração, a taxa de deposição do material de adição e outras características do processo de soldagem, como requisitos básicos para estabilizar o arco.

Em soldagem, a polaridade refere-se à direção da corrente elétrica no circuito de soldagem, e pode ser classificada em duas principais: polaridade direta (eletrodo negativo CC-) e polaridade reversa (eletrodo positivo CC+). O caminho dos elétrons em um circuito de soldagem a arco elétrico é determinado pela polaridade da corrente

utilizada no processo. Os elétrons, que são as partículas carregadas negativamente, fluem do cátodo (polo negativo) para o ânodo (polo positivo) dentro de um circuito. No entanto, a direção da corrente elétrica convencional é considerada oposta ao movimento real dos elétrons, fluindo do polo positivo para o negativo. No contexto da soldagem, isso significa que a direção de fluxo dos elétrons contribui para a maior concentração de calor ora na peça ora no pino promovendo uma penetração mais profunda da solda ou fusão mais proeminente no pino a depender da polaridade utilizada.

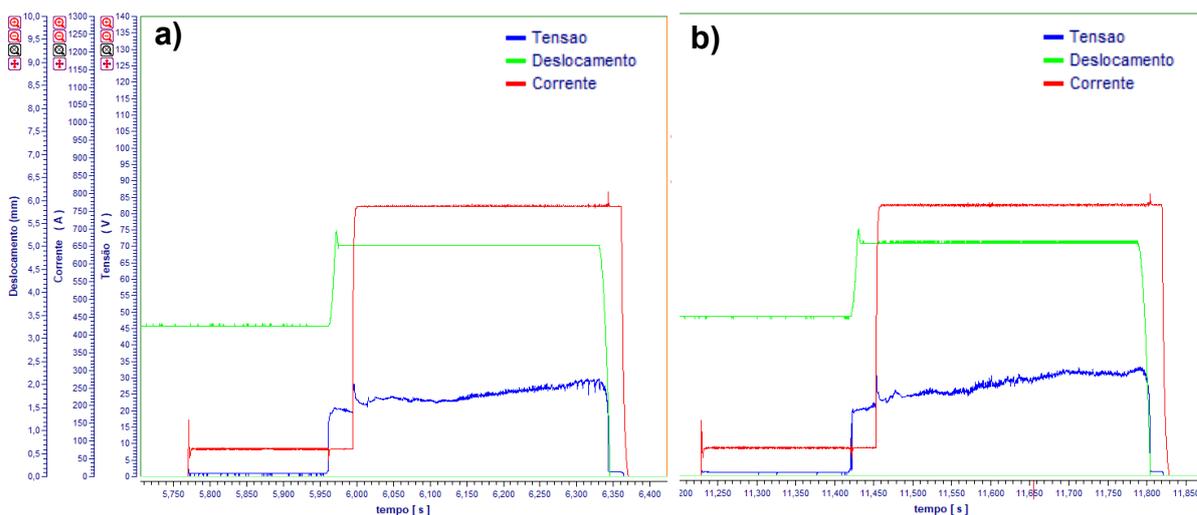
Em *Stud Welding*, a polaridade direta é utilizada na totalidade dos equipamentos fornecidos comercialmente e, portanto, não são encontradas informações a respeito da influência da polaridade neste processo. O que se pode deduzir, e considerando os efeitos de maior taxa de fusão em processos de soldagem com eletrodo consumível, é que isso acontece majoritariamente devido ao diâmetro do eletrodo (pino) utilizado em SW. Para que haja fusão suficiente em um consumível que apresenta entre 10 e 20 vezes o diâmetro de um arame de soldagem, mesmo que utilizando correntes de soldagem da ordem de 500 a 2500 A, se faz necessária a utilização de todos os recursos disponíveis, sendo um deles, a polaridade que favorece fusão do eletrodo. A comparação das soldas realizadas com as duas polaridades pode ser verificada na Figura 62, onde os sinais de deslocamento do pino tampouco o sinal de corrente apresentou alguma diferença entre as modalidades. No entanto, o sinal de tensão apresentou uma pequena variação. A tensão média da solda com polaridade positiva apresentou 25V, ligeiramente menor do que a solda realizada com polaridade negativa, que apresentou como tensão média 28V.

Para investigar se a polaridade proporcionava alguma influência no processo, como por exemplo, a alteração do sinal da tensão em comparação entre as polaridades utilizadas e ampliar a análise da influência da polaridade no processo SW, testes com corrente pulsada também foram realizados. Novamente os sinais de tensão foram obtidos, e desta vez, todos os sinais foram agrupados de forma sobreposta no oscilograma de tensão da Figura 63. É possível notar que os ensaios que utilizaram a polaridade negativa (direta), normalmente utilizada SW, apresentaram valores mais elevados em detrimento aos ensaios com polaridade positiva (reversa) tanto na condição de corrente constante como também na condição pulsada. A tensão média nos ensaios com corrente pulsada com polaridade negativa

e positiva foi de 27 V e 25 V respectivamente. Neste caso, o efeito da polaridade sobre a variação da tensão foi mais significativo do que a pulsação de corrente.

Figura 62 - Caracterização de diferentes configurações de polaridade para a mesma corrente média (750A) para a soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono

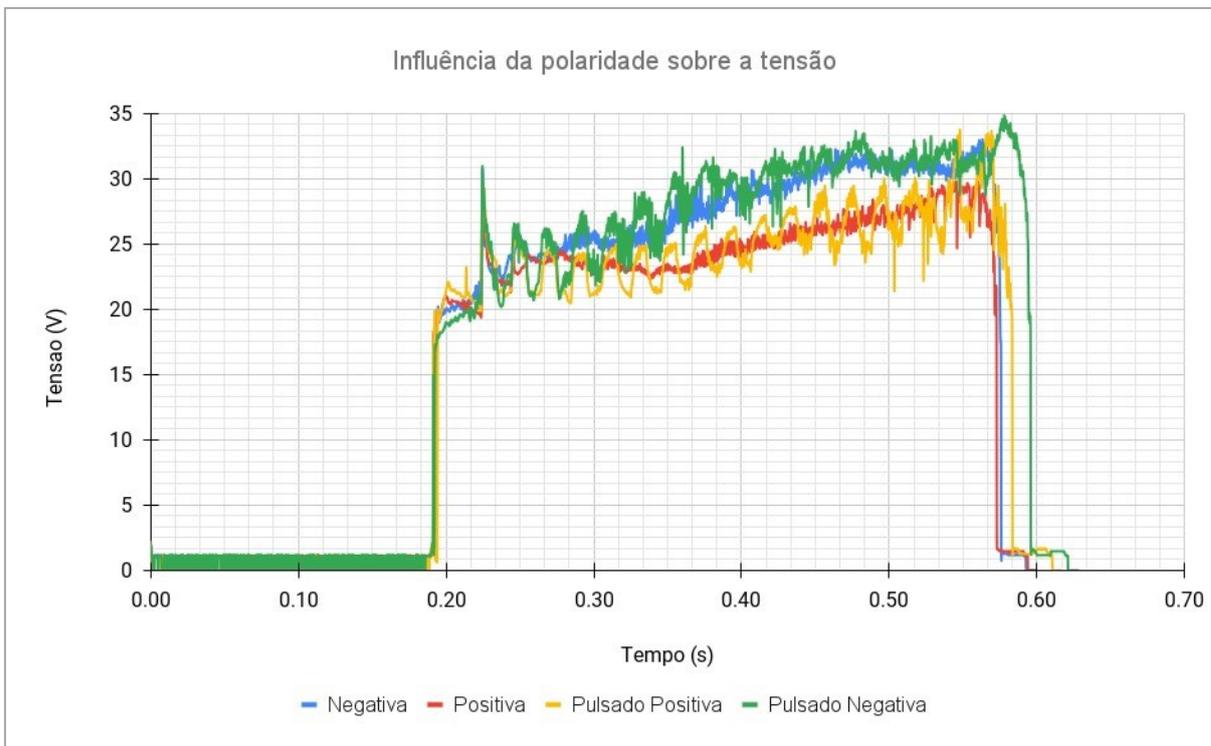
a) Polaridade positiva CC+, b) Polaridade negativa CC-



Fonte: O autor

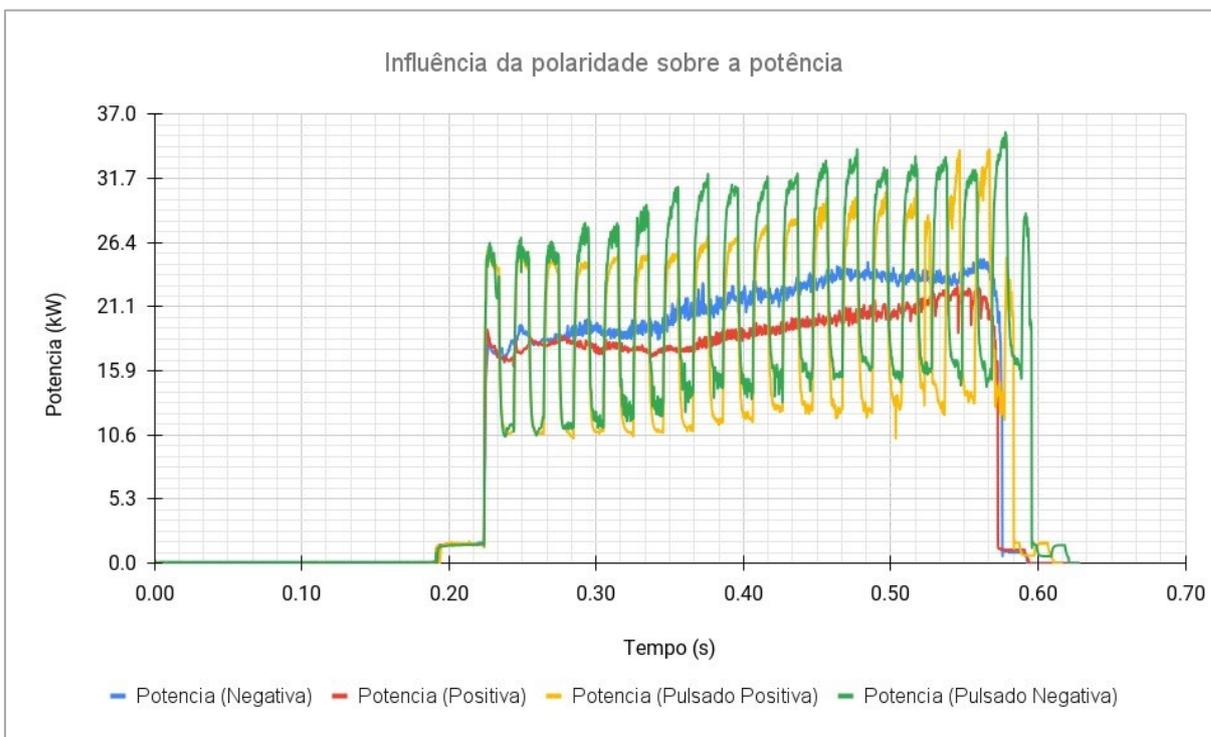
É possível notar que os ensaios que utilizaram a polaridade negativa, normalmente utilizada SW, apresentaram valores mais elevados em detrimento aos ensaios com polaridade positiva (reversa) tanto na condição de corrente constante como também na condição pulsada. A tensão média nos ensaios com corrente pulsada com polaridade negativa e positiva foi de 27 V e 25 V respectivamente. Neste caso, o efeito da polaridade sobre a variação da tensão foi mais significativo do que a pulsação de corrente.

Figura 63 – Comportamento da tensão de diferentes formatos de onda e configurações de polaridade para a mesma corrente média (750A) na soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono



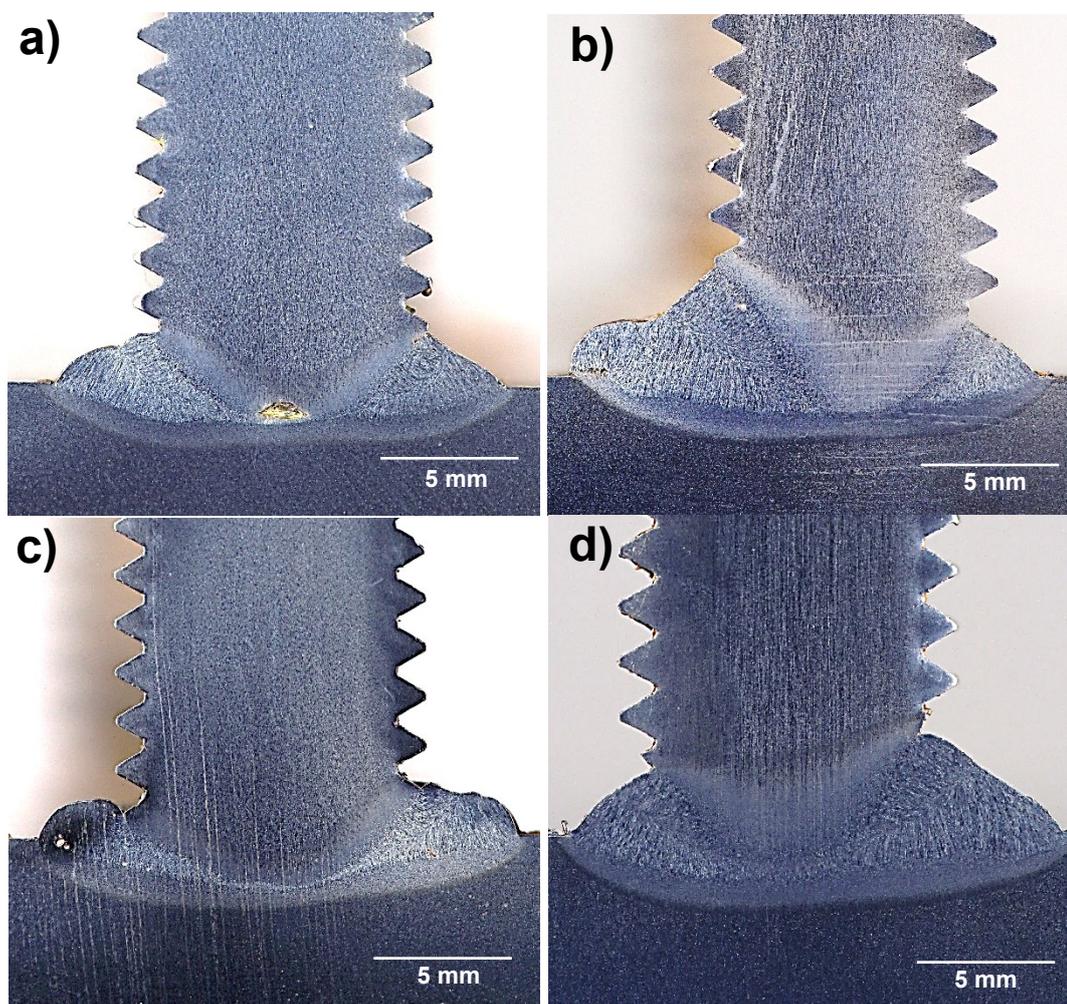
Fonte: O autor

Figura 64 - Oscilogramas de potência do processo *Stud Welding* com polaridade positiva e negativa



Fonte: o autor

Figura 65 - Influência da polaridade. a) CC+ constante, b) CC- constante, c) CC+ pulsado, d) CC- pulsado



Fonte: o autor

5.2 INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM E O TEMPO DE ARCO

O experimento proposto investigou inicialmente a relação entre corrente de soldagem e tempo de arco aberto no processo de *Stud Welding* para a soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro em aço carbono. A fonte de soldagem utilizada (*Soyer/BMK16i*) opera a uma corrente máxima de 1000 A e um tempo de até 1s (1000 ms).

Experimentos práticos prévios, seguindo as recomendações de fabricantes, sugerem uma parametrização ideal de 800 A e 300 ms para a soldagem de pinos com ponta cônica de 10 mm de diâmetro. Então, este experimento foi conduzido sob a premissa de que, enquanto essas condições ideais foram um ponto de partida fundamental, podem existir combinações alternativas de corrente e tempo que

também produzam resultados satisfatórios, ou até mesmo superiores, em termos de qualidade da solda e utilização eficiente dos equipamentos disponíveis. A pesquisa explorou diversas configurações de corrente e tempo, visando identificar uma janela operacional mais ampla que mantivesse ou melhorasse a integridade da solda.

Primeiramente, foram coletados dados experimentais variando a corrente (I) e o tempo (t) de soldagem. Para cada conjunto de parâmetros, a energia de soldagem considerada alvo foi de 6kJ, baseada na energia encontrada durante os ensaios com parâmetros recomendados pelos fabricantes. Os testes foram conduzidos utilizando uma mistura gasosa de Ar+15%CO₂. Desse modo, a tensão do processo com os parâmetros considerados ideais também apresentou comportamento padrão, não alterando seu valor médio, apresentando tensão média de 30 V.

Diferentemente da fórmula que calcula a energia elétrica total fornecida ao sistema conforme a Equação 8,

$$E = \eta \times U \times I \times t \quad (8)$$

em que (η) é a eficiência térmica do processo, (U) tensão, em volts, (I) é a corrente elétrica em amperes e (t) tempo de soldagem, em segundos, foi usada a Equação 9:

$$W = R * I^2 * t \quad (9)$$

onde (W) é a energia em joules, (I) é a corrente em amperes, (R) é a resistência em ohms, e (t) é o tempo em segundos, baseada na resistência. Neste caso, a tensão do processo verificada previamente foi assumida como constante (30V) assim como a resistência que foi medida em toda a faixa de condições testadas.

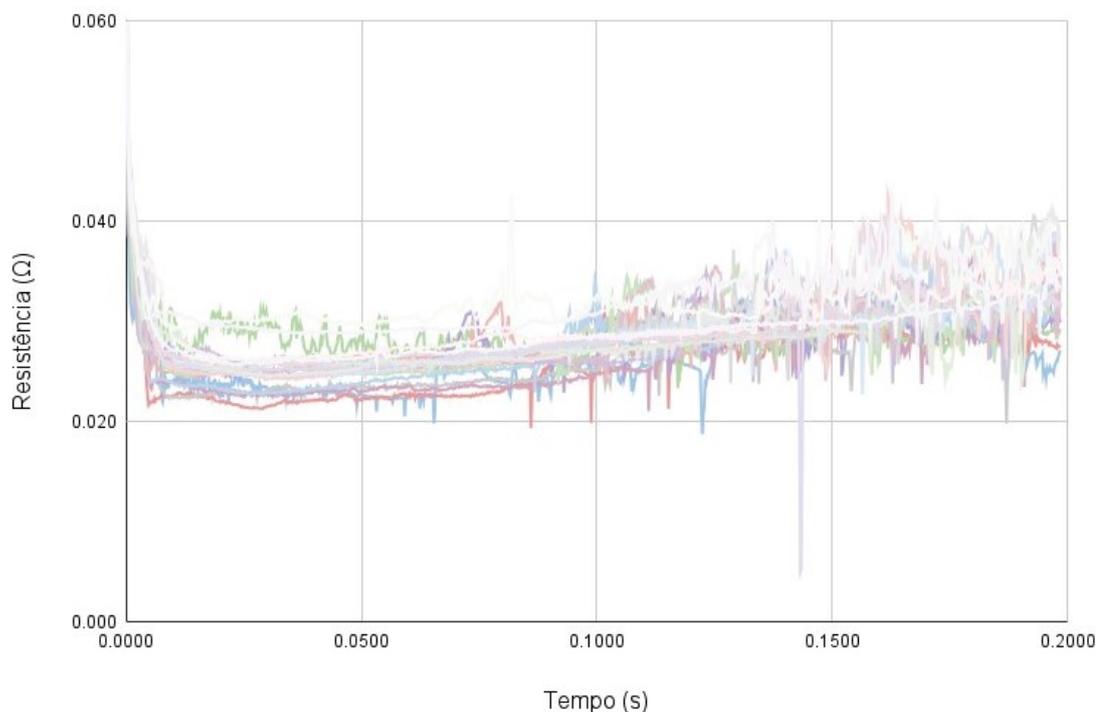
A Equação 9 representa uma simplificação para modelar a quantidade de energia envolvida na fusão do pino. Utilizando um valor constante para a resistência e considerando esse valor igual para todas as correntes de soldagem como condição de contorno, desde que respeitada a adequada proporção entre corrente e tempo, essa equação possibilita a projeção de novos parâmetros de soldagem do binômio corrente e tempo a partir de uma condição ideal preestabelecida. Esse tipo de projeção é interessante por vários fatores que foram avaliados no desenvolver do trabalho, como troca de parâmetros em função da posição, utilização de fontes com

menor capacidade de corrente, entre outros. Para usar a Equação 9, as variáveis foram rearranjadas para calcular o valor da resistência (R) a partir da Equação 10:

$$R = \frac{W}{I^2 * t} \quad (10)$$

Substituindo (W) pela energia ideal, e (I) pela corrente ideal e (t) pelo tempo ideal para obter (R), obtém-se o valor de resistência de 0,03 ohms. Este valor de resistência foi observado nas medições realizadas e apresentaram um comportamento constante sendo média de 0,03 ohms, conforme ilustrado na Figura 66. É importante ressaltar, que em modelos mais antigos de fontes de energia, é observada uma leve diminuição na corrente ao longo do tempo, causada pelo aumento da resistência no circuito de soldagem devido ao aquecimento. Contudo, em equipamentos que controlam a corrente, a corrente é mantida constante por meio do aumento da tensão (TRILLMICH; WELZ, 2016).

Figura 66 – Medição da resistência elétrica de vinte combinações diferentes de energia (Figura 68)



Fonte: O autor

A energia alvo para as novas condições foi mantida em 6 kJ, utilizando como referência os parâmetros de corrente e tempo (800 A e 300 ms). Considerando a resistência medida de 0,03 ohms e o valor estabelecido de energia alvo, a Equação 10 foi novamente rearranjada para isolar o tempo (t) em função da corrente (I), resultando na Equação 11:

$$t = \frac{6kJ}{0,3ohms * I^2} \quad (11)$$

A partir daí, foram estabelecidas vinte e duas combinações de corrente e tempo de soldagem, descritas na Tabela 1.

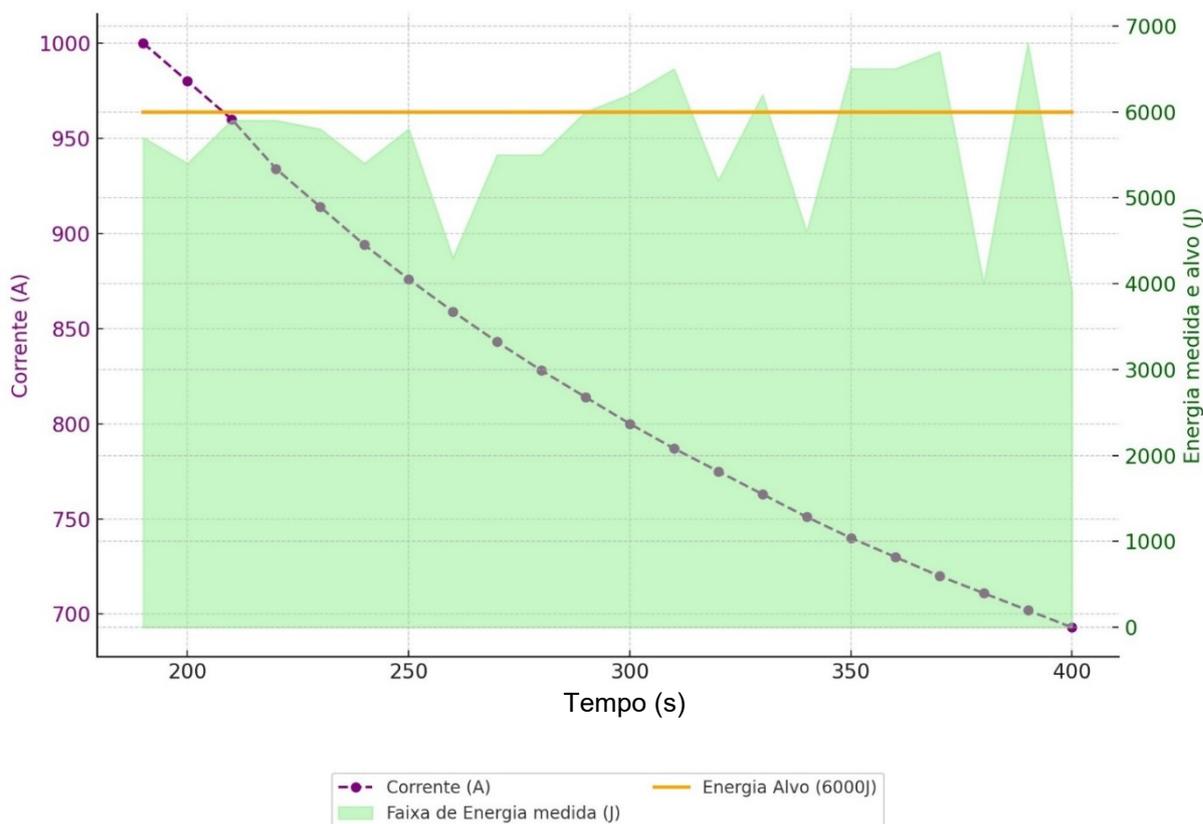
Tabela 1 – Parâmetros alternativos para soldagem de pinos M10 de aço carbono

Amostra	Corrente (A)	Tempo (s)	Energia medida (J)	Energia alvo (J)
1	1000	190	5700	6000
2	980	200	5400	6000
3	960	210	5900	6000
4	934	220	5900	6000
5	914	230	5800	6000
6	894	240	5400	6000
7	876	250	5800	6000
8	859	260	4300	6000
9	843	270	5500	6000
10	828	280	5500	6000
11	814	290	6000	6000
12	800	300	6200	6000
13	787	310	6500	6000
14	775	320	5200	6000
15	763	330	6200	6000
16	751	340	4600	6000
17	740	350	6500	6000
18	730	360	6500	6000
19	720	370	6700	6000
20	711	380	4000	6000
21	702	390	6800	6000
22	693	400	3900	6000

Fonte: O autor

Os parâmetros de tempo e corrente de soldagem da Tabela 1 foram inseridos na forma diagrama (Figura 67) para verificar a curva do processo.

Figura 67 – Curva de parametrização de corrente e tempo para a soldagem de um pino de aço carbono de 10 mm de diâmetro para SW a arco retraído



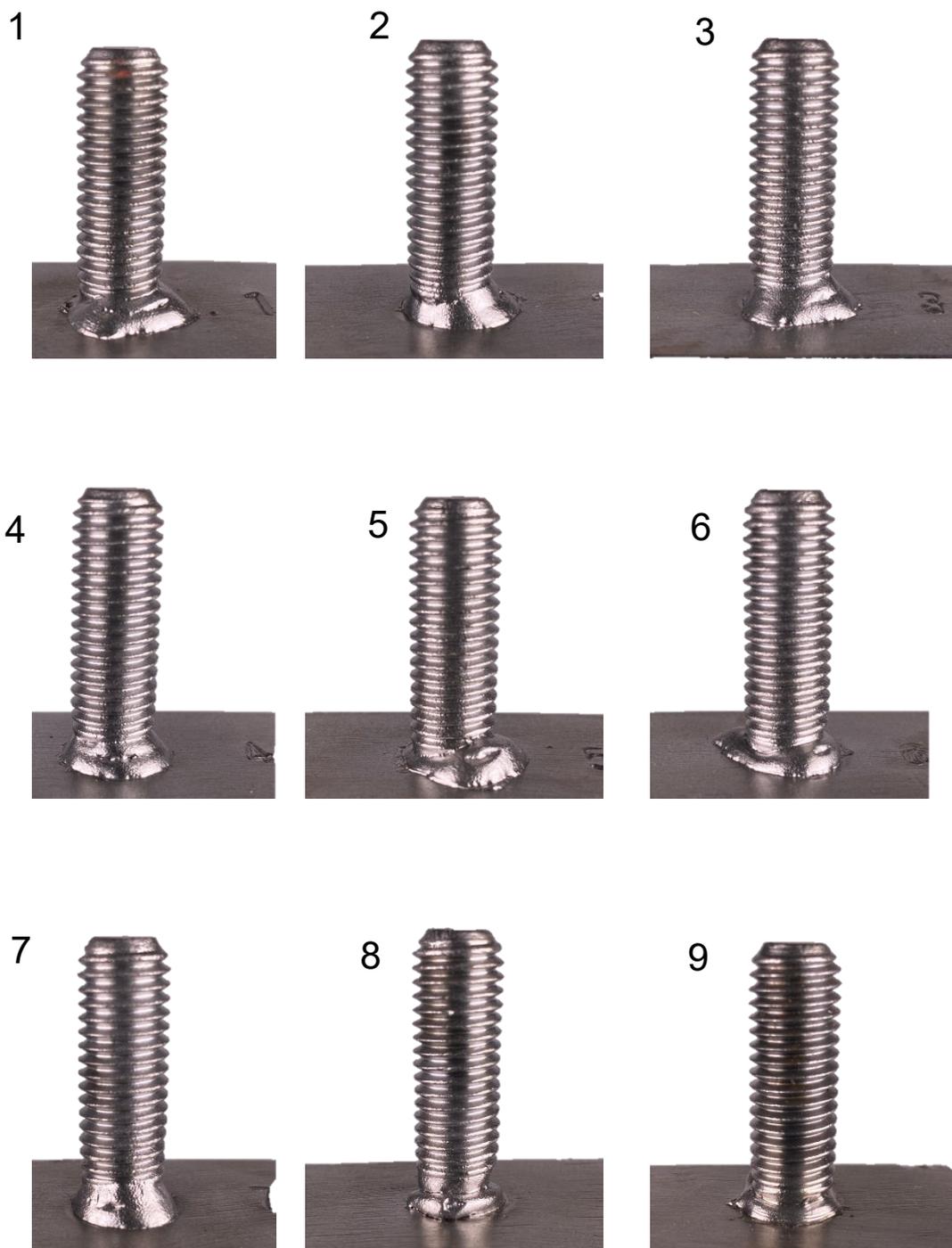
Fonte: O autor

Estes resultados sugerem os tempos de soldagem necessários para diferentes correntes a fim de manter a energia de soldagem constante em 6000 Joules. Nota-se que, à medida que a corrente aumenta, o tempo de soldagem necessário diminui para manter a energia constante, o que é consistente com a relação inversa entre corrente e tempo na fórmula de energia térmica. A Figura 68 ilustra o resultado das vinte e duas combinações de parâmetros da Tabela 1. É possível verificar que houve a formação de colar de solda em todas elas. Também fica evidente que a formação do colar se altera conforme a combinação escolhida, porém sem a formação de defeitos aparentemente visíveis.

Esses valores fornecem um ponto de partida para experimentos adicionais. Além disso, se R e I são constantes, a fórmula sugere que a energia é proporcional

ao tempo. No entanto, na prática, há outros fatores que podem influenciar a energia requerida para a soldagem e a ocorrência de defeitos, como o valor do recuo e estabilidade do sinal de tensão, gás de proteção, qualidade do equipamento e a habilidade do operador, por exemplo.

Figura 68 – Soldas realizadas com diferentes combinações de parâmetros de tempo e corrente da Tabela 1 para um pino de 10 mm de diâmetro



10



11



12



13



14



15



16

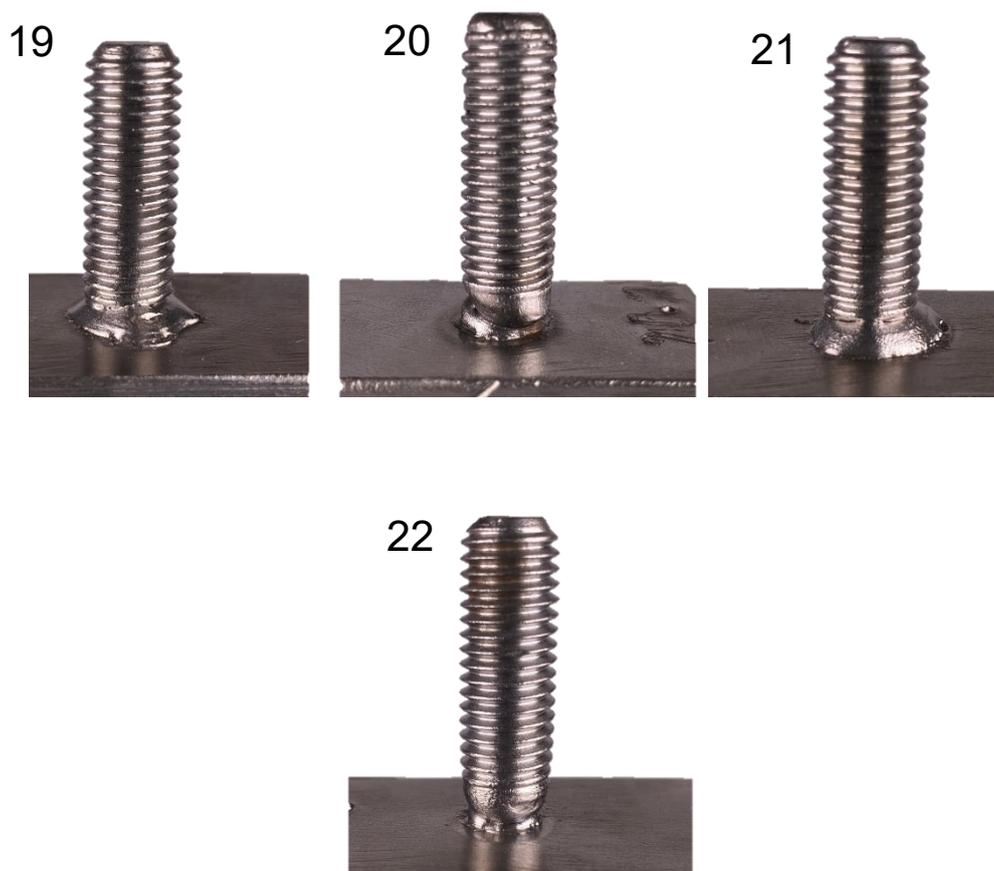


17



18





Fonte: O autor

Os testes mostraram que a relação entre tempo e corrente tem impacto direto na formação do colar de solda. De forma geral, quando a corrente é elevada e o tempo curto, em alguns casos pode ocorrer fusão excessiva do metal, podendo comprometer a integridade da junta e dificultar o controle do arco, além da possibilidade de sopro magnético (ver amostra 5 e 15). Por outro lado, quando a corrente é baixa e o tempo prolongado, o aquecimento favorece o escorrimento do metal fundido na posição plana, o que pode prejudicar a uniformidade do colar e levar a curtos-circuitos antes da solidificação completa (ver amostra 20 e 22).

Além dos parâmetros elétricos, o controle da poça de fusão também depende do método de proteção utilizado. A soldagem com anel cerâmico permite maior controle morfológico do colar, atuando como barreira física para limitar o escorrimento do material fundido e melhorar a retenção do calor. Em contrapartida, o bocal de gás convencional não oferece esse mesmo nível de contenção, tornando a geometria do colar mais dependente da tensão superficial do metal fundido e das forças do arco.

Nesse caso, a adição de CO₂ ao argônio reduz a tensão superficial, tornando o metal mais fluido e facilitando o escorrimento, o que pode ser vantajoso em certas condições, mas um problema quando se busca um colar com maior definição geométrica. Dessa forma, testes adicionais com anéis cerâmicos poderiam fornecer dados mais precisos sobre esse efeito.

É importante destacar que os parâmetros de protrusão e recuo do pino foram mantidos constantes ao longo dos testes. Entretanto, a variação desses parâmetros pode ser uma estratégia eficaz para melhorar o controle da morfologia do colar de solda. O ajuste da protrusão pode influenciar a quantidade de material disponível para fusão e a estabilidade do arco, enquanto o valor do recuo afeta a potência do arco favorecendo a fusão na ponta do pino.

5.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS MECÂNICAS DE PROTRUSÃO E RECUO

5.3.1 Relação entre Protrusão, Penetração e Movimento do Pino

Embora seja comum encontrar equívocos, o termo “Protrusão”, utilizado no presente trabalho, de fato, tem relação direta com termo mergulho mas é importante ressaltar que a protrusão e mergulho são conceitos distintos na soldagem de pinos (TRILLMICH, 2021) . A protrusão é um parâmetro que precisa ser definido antes do início do processo de soldagem e refere-se à distância inicial que o pino está posicionado acima da peça de trabalho. Mergulho, por outro lado, designa a quantidade de movimento descendente feito pelo pino até que ele pare completamente. Esse movimento pode ser influenciado pela protrusão, tensão da mola, gravidade, amortecimento, entre outros, e pode atingir um valor máximo que é igual à soma do valor do recuo mais o valor da protrusão. Se um colar plano é desejado na soldagem, uma protrusão mais curta é definida, o que reduz o mergulho proporcionalmente, e vice-versa (Figura 69).

Porém, ressalta-se, que é comum encontrar informações técnicas que utilizam o termo *plunge* para se referir ao valor que deve ser regulado na protrusão (ISO 14555, 2014) (ISO 13918, 2008). Isso acontece devido ao uso do termo “*plunge*” que, em português pode ser traduzido como "imersão" ou "mergulho", que tem influência direta no valor da protrusão regulado. Em alemão, o termo “*plunge*” pode ser traduzido como

"*Eintauchen*", com o mesmo significado anterior. O movimento de mergulho, que aproxima as zonas fundidas do pino e da peça, é vital para o resultado da soldagem. Isso porque quanto maior a protrusão do pino, maior será a energia potencial da mola. Tal fato, implica em alteração de velocidade de descida do pino (mergulho) e impacto sobre a poça de fusão, causando respingos. Nesses casos, a velocidade do mergulho não deve exceder velocidades médias de aproximadamente 200 mm/s (ISO 14555, 2014).

Por outro lado, algumas literaturas técnicas em língua inglesa e alemã, também fazem referência à protrusão do pino como um parâmetro isolado, a partir dos termos "*Protrusion*" e "*Überstand*", respectivamente (DVS, 2000a) (DVS, 2000b). A palavra "*Überstand*" em alemão é uma expressão que pode ser usada para descrever uma "saliência" ou "excesso", correspondendo a quantidade de pino que permanece para fora do anel cerâmico antes da soldagem.

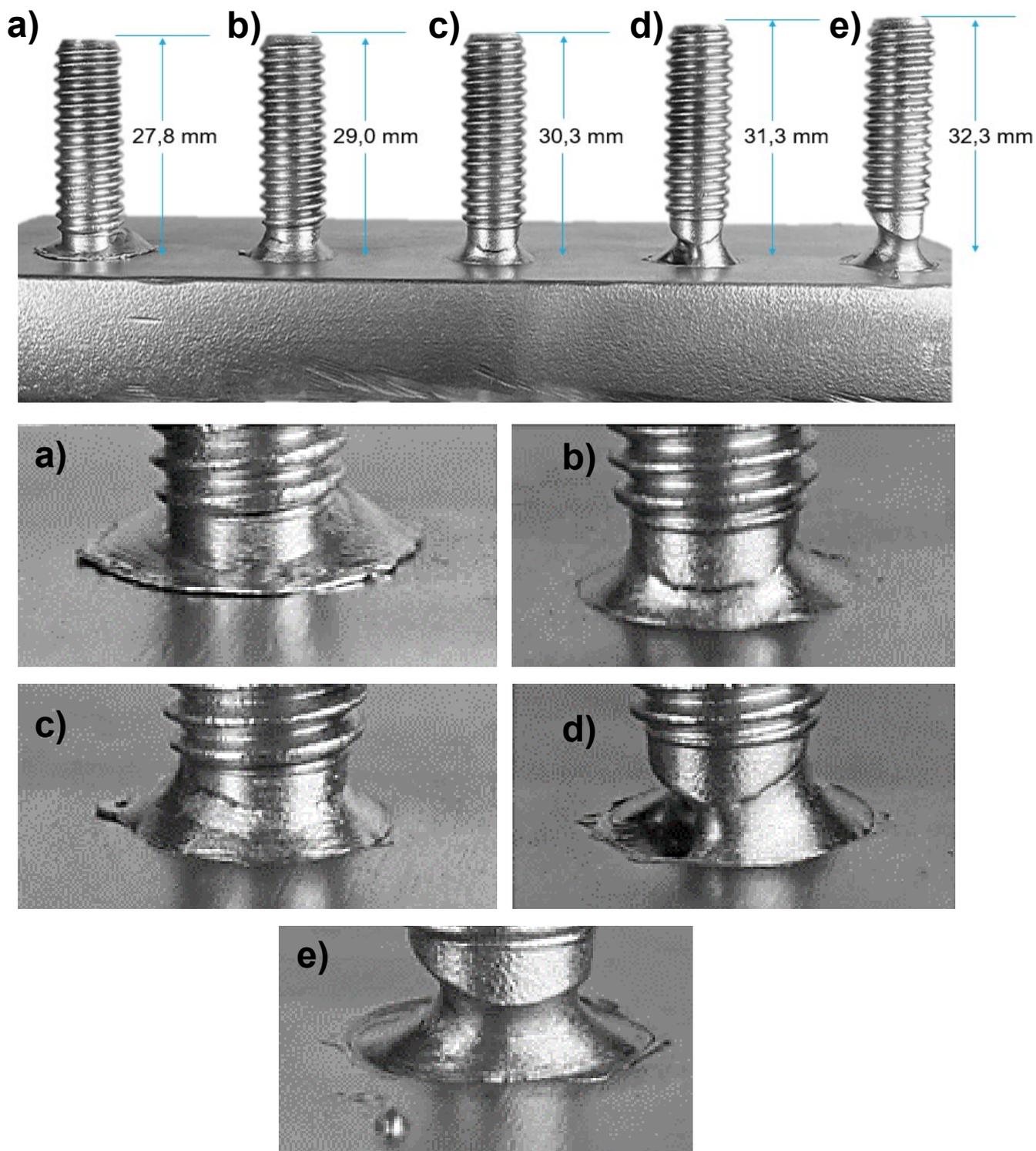
Com relação ao mergulho do pino, conhecido como *plunge*, mesmo que de forma sucinta, este tema já foi abordado em estudos específicos que exploraram alternativas ao uso de eletroímã com retorno por mola para controlar o movimento. Essas alternativas incluem motores especiais para gerenciar o mergulho e a posição (CHI, 2005), bem como sensores de movimento e força para monitorar e controlar a penetração (CHI; ZHANG; ZHANG, 2006). Esses estudos indicam que, mesmo após o contato inicial entre o pino e a peça, os motores continuam impulsionando o pino, que permanece em aquecimento devido ao efeito joule, até atingir determinada força ou valor de penetração regulados na fonte de soldagem e controlados pelo motor.

Um experimento realizado no presente trabalho é ilustrado na Figura 69. A análise do efeito da protrusão do pino no processo *Stud Welding* demonstra que esse parâmetro tem influência direta na distribuição do material fundido e na morfologia do colar de fusão. No entanto, o volume total de metal fundido disponível para a formação do colar não é determinado exclusivamente pela protrusão, mas sim pela energia de soldagem aplicada ao processo. A protrusão afeta como o material fundido se distribui e se solidifica, impactando a geometria final da solda. Com uma protrusão maior, há a possibilidade de maior compressão da mola do sistema eletromecânico (solenóide/eletroímã), o que pode gerar uma aceleração mais intensa do pino no momento do contato. Essa característica é relevante para sistemas que utilizam um mecanismo de recuo controlado, pois pode influenciar a maneira como o pino entra na poça de fusão e a dispersão do material fundido. Entretanto, a protrusão por si só

não determina a aceleração do pino, sendo essa mais dependente do valor de recuo programado no equipamento.

Conforme pode ser observado na Figura 69, uma protrusão maior direciona mais material para a formação do colar, pois, ao atingir a peça, o pino parcialmente sólido mergulha na poça de fusão, deslocando o metal líquido para as laterais. Esse deslocamento promove um aumento do volume do colar e melhora a ancoragem da junta soldada. Em contrapartida, quando a protrusão é menor, o contato do pino com a peça não é proeminente, conseqüentemente, há menor deslocamento de material líquido. Como resultado, há uma redução no tamanho do colar e possivelmente menor penetração da solda. Nos casos em que não há protrusão (Figura 69e), ou seja, quando o pino está nivelado com a face do anel cerâmico, o material fundido tende a escorrer, por efeito da gravidade, de forma não controlada. Isso pode resultar na formação de um estrangulamento geométrico na base do pino, onde o diâmetro final da solda pode ser inferior ao diâmetro original do pino, comprometendo a resistência mecânica da junta. Esse efeito ocorre porque, sem a distância adequada para que o pino fundido mergulhe na poça, o metal líquido pode se redistribuir de forma irregular antes da solidificação.

Figura 69 – Efeito da diferente regulagem de protrusão em pistola com sistema mecânico de movimentação do pino. a) 4 mm; b) 3 mm; c) 2 mm; d) 1 mm; e) 0 mm. Comprimento inicial do pino: 32 mm



Fonte: o autor

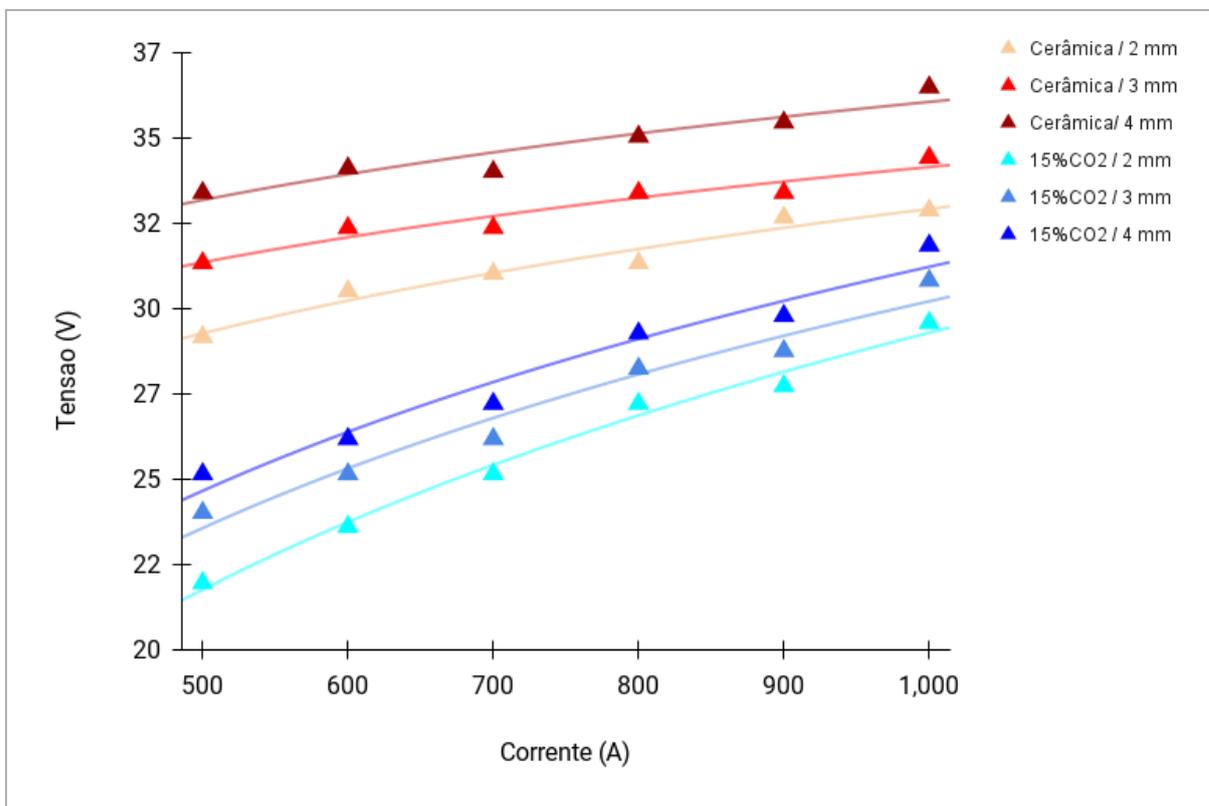
5.3.2 Relação entre Tensão e Recuo

Samardžić; et al. (2009) por meio de diferentes análises dos sinais de soldagem de pinos, concluem que o parâmetro mais apropriado para a avaliação da estabilidade do processo SW por arco retraído é a tensão de soldagem. No presente trabalho, na análise experimental da soldagem por arco retraído, foi verificada a relação entre alguns parâmetros o que é fundamental para compreender as dinâmicas do processo de soldagem e otimizar os parâmetros para obtenção de um processo robusto e sua automatização. A tensão, estreitamente ligada à corrente, reflete a resistência do arco. Variações na tensão podem indicar fenômenos transitórios no arco, como curtos-circuitos ou interrupções, que são críticos para a integridade da junta soldada.

Este estudo específico foca em duas variáveis principais: o tipo de proteção utilizado durante a soldagem e o valor do recuo do pino. Adicionalmente, é possível verificar também a influência da corrente de soldagem aplicada conforme os demais parâmetros estudados. Durante o experimento, foram utilizados dois tipos de proteção, como um anel cerâmico e a proteção por gás. Ambas as proteções têm o objetivo de estabilizar o arco elétrico e proteger a poça de fusão da oxidação e contaminação atmosférica.

Tradicionalmente, espera-se que diferentes meios de proteção resultem em diferentes características de arco e, conseqüentemente, em diferentes relações entre tensão e corrente, sendo que as variações no valor de recuo podem afetar significativamente a impedância e a estabilidade do arco. No contexto deste estudo, o recuo foi ajustado em 2, 3 e 4 mm, o que permitiu a análise do impacto dessa variação nas condições de soldagem. O consumível utilizado foi um pino roscado de aço carbono SAE 1020, com 10 mm de diâmetro. O gás utilizado foi uma mistura de Ar+15%CO₂. As medições dos valores de tensão média foram realizadas em todo o período de arco, em procedimentos que não apresentaram curtos-circuitos.

Figura 70 – Mapeamento da tensão do arco para diferentes níveis de corrente, valores de recuo e meios de proteção



Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura 70 evidencia que a relação entre tensão e corrente apresenta uma linearidade e é influenciado por vários fatores, incluindo o tipo de proteção e o valor do recuo. A partir dos dados coletados, observou-se que, para um dado valor de corrente, a tensão necessária aumenta com o incremento do valor de recuo. A resistência do meio aumenta com a distância entre os eletrodos porque ela é diretamente proporcional ao comprimento do percurso condutor. Em resumo, aumentar a distância entre os eletrodos aumenta o comprimento do percurso que a corrente precisa atravessar, elevando a resistência total do meio. Operando em correntes menores, como é o caso do experimento com 500 A com gás, percebe-se uma diferença de aproximadamente 6 V entre o menor e o maior valor de recuo, 2 e 4 mm respectivamente. Em níveis mais elevados de corrente, como é o caso do experimento com 1000 A, essa diferença diminui, permanecendo em aproximadamente 3 V para o caso da utilização de gás.

Os resultados também indicam uma diferença notável entre os dois meios de proteção. O anel cerâmico mostrou uma tensão mais alta em comparação com a proteção por gás para a mesma corrente e valor de recuo. Essa diferença pode ser

explicada pelas propriedades dos gases envolvidos na proteção do arco. No caso do anel cerâmico, o arco se mantém em um meio predominantemente preenchido pelo ar atmosférico, composto principalmente por nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e outros gases em menor proporção. Esses gases possuem potenciais de ionização elevados, o que dificulta a formação do plasma e exige uma maior tensão para iniciar e manter a ionização. Além disso, o oxigênio presente pode contribuir para reações de oxidação na poça de fusão e no pino, afetando a composição química da solda e aumentando a formação de óxidos metálicos.

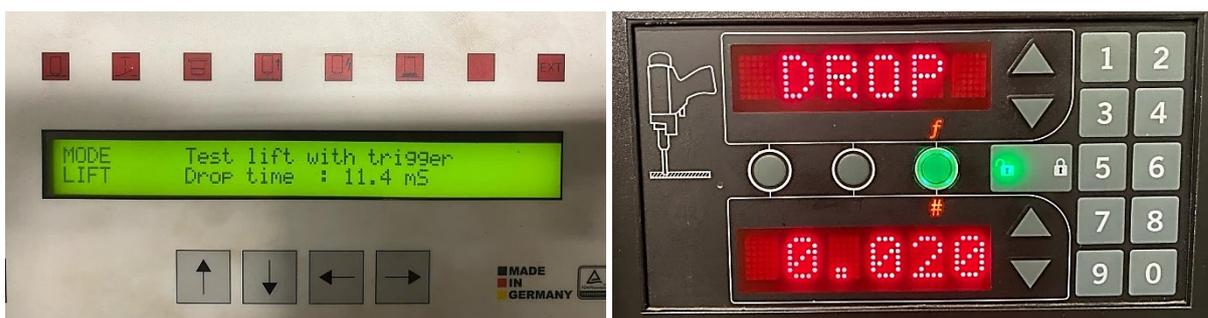
Em contrapartida, quando a proteção é feita com gases inertes (como argônio puro, CO_2 ou misturas Ar- CO_2), a ionização do meio é facilitada devido às menores energias de ionização desses gases. O argônio (Ar), por exemplo, possui um potencial de ionização relativamente baixo (15,76 eV) e é um gás quimicamente inerte, o que facilita a manutenção do arco e reduz a necessidade de tensão elevada. O dióxido de carbono (CO_2), por sua vez, pode se dissociar em monóxido de carbono (CO) e oxigênio atômico (O) sob altas temperaturas, promovendo efeitos adicionais na estabilidade do arco.

5.3.3 Relação entre Recuo, Protrusão, *Drop time* e Velocidade do Pino

Variáveis como tensão, tempo de queda (*Drop time*) e velocidade do pino são parâmetros indiretos de *Stud Welding* e, em alguns casos, como em sistemas automatizados, podem apresentar significativa contribuição no bom funcionamento do processo de soldagem se puderem ser manipulados. Assim, este estudo investiga a interação entre o valor de recuo, o tempo de mergulho (*Drop time*) e a velocidade média do pino durante a soldagem por meio de uma série de experimentos monitorados, onde foram analisados como diferentes comprimentos de arco (recuo) afetam a dinâmica do movimento do pino em deslocamento até a peça. Os resultados servem para a compreensão dos princípios básicos da física do movimento do pino e têm implicações diretas no projeto e na análise de sistemas mecânicos de pistolas. Compreendendo essa relação é possível utilizá-la para regular os parâmetros de recuo de forma indireta em fontes de soldagem que permitam o acesso a um modo de teste de funcionamento da pistola, geralmente denominado como “Modo *Lift*” ou “*Test Lift*” que desativa a imposição de corrente e comanda apenas o movimento do pino na pistola.

Para medir o valor de recuo o operador de *Stud Welding* necessita utilizar instrumentos de medição, como paquímetros de profundidade ou gabaritos específicos de acordo com o modelo de pistola. No entanto, alguns equipamentos de soldagem disponibilizam um sistema de verificação do funcionamento do recuo e acionamento da pistola, denominado modo “*Lift*” (ver Figura 71). Neste modo a fonte de soldagem desabilita o fornecimento de corrente para que o operador teste o recuo da pistola com um pino já posicionado na pinça. Após o disparo, a fonte de soldagem fornece um valor em milissegundos em seu visor, que corresponde ao intervalo de tempo entre o desligamento de energia que alimenta o solenoide da pistola até o toque do pino na peça. Este intervalo é denominado “*Drop Time*” que na prática refere-se ao tempo de descida do pino. A Figura 71 e a Figura 72 ilustram dois modelos diferentes de equipamentos que fornecem essa informação ao operador de soldagem.

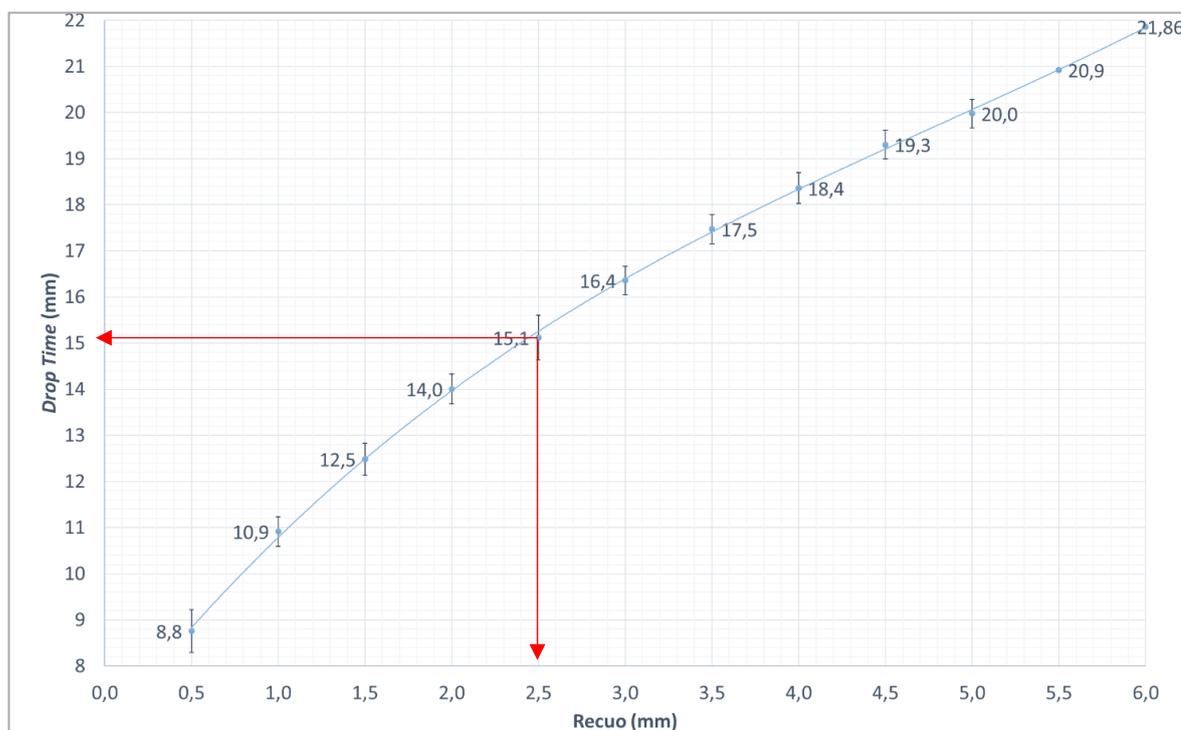
Figura 71 – Exemplos de modo de teste “*Lift*” (recuo) em diferentes modelos de fontes de soldagem



Fonte: O autor

Ao passo que o operador altera o valor de recuo para a mesma proeminência, a fonte fornece um valor correspondente de *drop time*. Isso acontece porque a distância que o pino deve percorrer até a peça torna-se maior ou menor. Entendendo isso, foi possível mapear as faixas de valores em milissegundos fornecidos pela fonte e perceber que existia uma relação linear entre o *drop time* e o recuo em toda faixa de valor de recuo regulado na pistola. Os valores de recuo foram medidos pelo sistema 3SR e elencados de acordo com o valor de *drop time* correspondente na Figura 72. Para exemplificar, observa-se o caso do recuo regulado em 2,5 mm que apresentou valores de *drop time* médio de 15,1 ms. Por meio deste mapeamento, o operador pode utilizar a Tabela 2 para configurar o recuo adequado para o seu procedimento.

Figura 72 – Influência do recuo sobre a variável “drop time” em pistola com movimentação do pino por eletroimã e mola, modelo Soyer/PH-3N



Fonte: O autor

É importante ressaltar que os valores apresentados na Figura 72 são exclusivos para os modelos de fonte e pistola de soldagem utilizados no presente estudo. Equipamentos diferentes destes podem apresentar variações nos valores de regulagem e não condizerem com o valor de recuo regulado. No entanto, estes testes podem ser replicados em outros equipamentos que forneçam os valores de *drop time* ou os sinais podem ser obtidos por sensores de movimento do pino para posterior avaliação.

Com o valor de recuo conhecido e o valor do tempo fornecido pelo equipamento de soldagem, é possível calcular a velocidade média de descida do pino. Foi empregada uma metodologia experimental para medir o tempo de queda e obter a velocidade média do pino com recuos variados, de 0,5 mm a 6 mm. Os dados foram coletados em doze pontos de elevação distintos, com incrementos de 0,5 mm e as medidas foram repetidas para garantir a consistência dos resultados. O experimento foi realizado sobre chapa sem a abertura do arco, no modo “*Lift*” do conjunto de soldagem da marca Soyer/BMK16i e a pistola de mesma marca modelo PH-3N. Os resultados obtidos revelaram uma correlação positiva entre a altura de elevação e o

tempo de queda médio, bem como entre a altura de elevação e a velocidade média. No entanto, foi possível mapear uma estreita faixa de valores para cada valor de recuo regulado e tomada o valor médio para cálculo da velocidade média (ver Tabela 2). A Tabela 2 apresenta todos os valores de recuo utilizados e os valores de *drop time* obtidos. Além disso, os cálculos de velocidade média foram realizados e evidenciou que a pistola PH-3N deslocou o pino em direção à peça em velocidades médias acima de 200 mm/s para valor de recuo superiores a 2,5 mm.

Tabela 2 – Mapeamento das variáveis de movimento em sistema de movimentação por eletroímã e mola

Recuo (mm)	Faixa de <i>drop time</i> (ms)	<i>Drop Time</i> Médio (ms)	Velocidade Média (mm/s)
0,5	8,3 - 9,2	8,75	57
1,0	10,6 - 11,2	11,0	91
1,5	12,1 - 12,8	12,5	120
2,0	13,7 - 14,3	14,0	143
2,5	14,6 - 15,6	15,1	166
3,0	16,0 - 16,7	16,65	180
3,5	17,2 - 17,8	17,25	203
4,0	18,0 - 18,7	18,5	216
4,5	19,0 - 19,6	19,35	233
5,0	19,7 - 20,3	20,1	249
5,5	20,9 - 20,9	20,9	263
6,0	21,9 - 21,9	21,9	274

Fonte: O Autor

Uma hipótese levantada durante os experimentos está relacionada com a influência do valor da protrusão sobre a velocidade do pino. Ou seja, para uma combinação de valores de protrusão e recuo, a velocidade média do pino poderia ser influenciada devido a maior compressão da mola para uma protrusão mais elevada. Para verificar essa influência foram testadas todas as combinações possíveis de regulação dos parâmetros protrusão/recuo da pistola PH-3N e os valores médios de “*drop time*” fornecido pela fonte foram plotados juntamente com os valores de deslocamento medidos nos oscilogramas. Os valores de *drop time* apresentados na Tabela 3 correspondem ao valor médio de 10 medições realizadas em cada combinação protrusão/recuo. Os valores de *drop time* foram verificados no painel do equipamento após o disparo.

Tabela 3 – Mapeamento do valor de “drop time” com diferentes regulagens de protrusão e recuo

Recuo (mm)	PROTRUSÃO (mm)												D.T Médio	σ
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5		
0,5	7,60	9,32	8,46	9,04	8,72	8,94	8,61	8,67	8,87	8,61	9,45	8,79	8,76	0,47
1,0	10,39	10,74	10,84	10,87	10,88	10,74	11,15	10,72	10,84	11,41	11,49		10,92	0,32
1,5	11,71	12,66	12,08	12,58	12,40	12,56	12,68	12,57	12,83	12,79			12,49	0,35
2,0	13,54	13,80	13,76	13,88	13,88	14,06	14,16	14,46	14,50				14,00	0,32
2,5	14,08	15,04	14,91	15,24	15,26	15,24	15,52	15,67					15,12	0,48
3,0	16,50	15,95	16,11	16,18	16,29	16,71	16,76						16,36	0,31
3,5	17,24	17,15	17,31	17,40	17,92	17,80							17,47	0,32
4,0	17,96	18,18	18,45	18,35	18,86								18,36	0,34
4,5	19,14	18,98	19,67	19,43									19,31	0,31
5,0	19,70	19,92	20,31										19,98	0,31
5,5	20,94	20,90											20,92	0,03
6,0	21,86												21,86	

Fonte: O Autor

Em alguns casos, as velocidades médias de deslocamento do pino, também denominada velocidade de mergulho do pino, podem influenciar diretamente na formação do colar e na geração de defeitos. A literatura cita velocidades médias de 200 mm/s e que essa velocidade é inversamente proporcional ao diâmetro do pino (TRILLMICH; WELZ, 2016). Essas informações sobre o comportamento dinâmico dos mecanismos de movimentação do pino também são fundamentais sob o ponto de vista do desenvolvimento e dimensionamento de produtos e pistolas para *Stud Welding*.

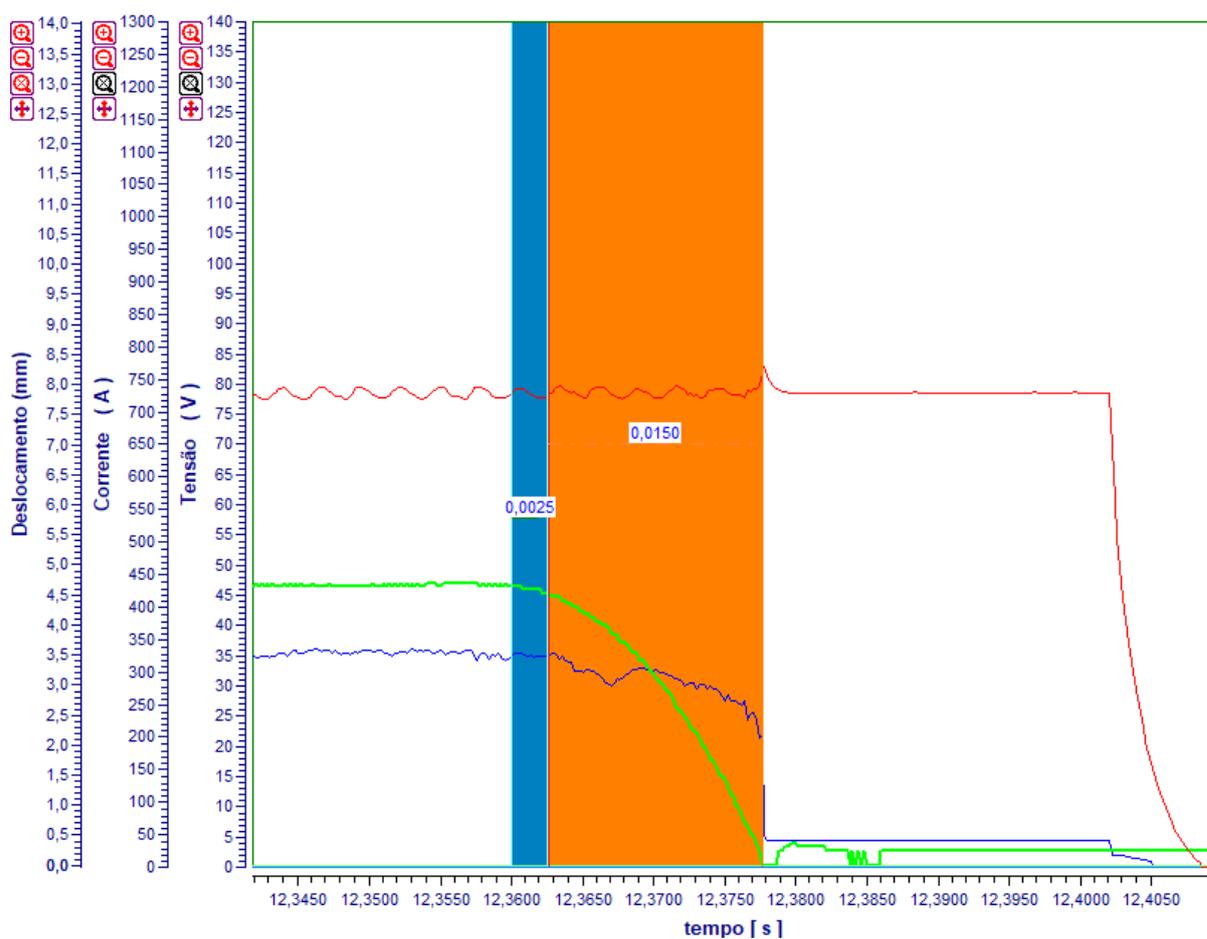
Durante as análises sobre a velocidade média do pino foi observada uma ligeira defasagem entre o tempo medido pela fonte com os tempos de deslocamento do pino medidos no equipamento de monitoração 3SR. No oscilograma do processo é possível selecionar a região de interesse e analisar de forma isolada o intervalo de tempo desejado. Nesse intervalo é possível obter valores médios e eficazes de corrente, tensão e deslocamento do pino, além do tempo de soldagem. Este recurso é evidenciado no oscilograma da Figura 73. O oscilograma apresenta a região final da solda realizada com um pino M10 de aço carbono. A região em laranja representa o tempo selecionado pelo operador onde se inicia o movimento de descida do pino. A região selecionada comumente apresentava valores menores em tempo sobre os valores apresentados na fonte de soldagem. Foi percebido, então, que para identificar o mesmo valor da fonte era necessário deslocar o cursor para esquerda. A região em azul representa este valor de tempo adicional antes do início do movimento do pino

que é medido pelo sensor de deslocamento linear. Desta forma, a soma dos dois valores de tempo representa o valor plotado no painel da fonte de soldagem para a variável *drop time*.

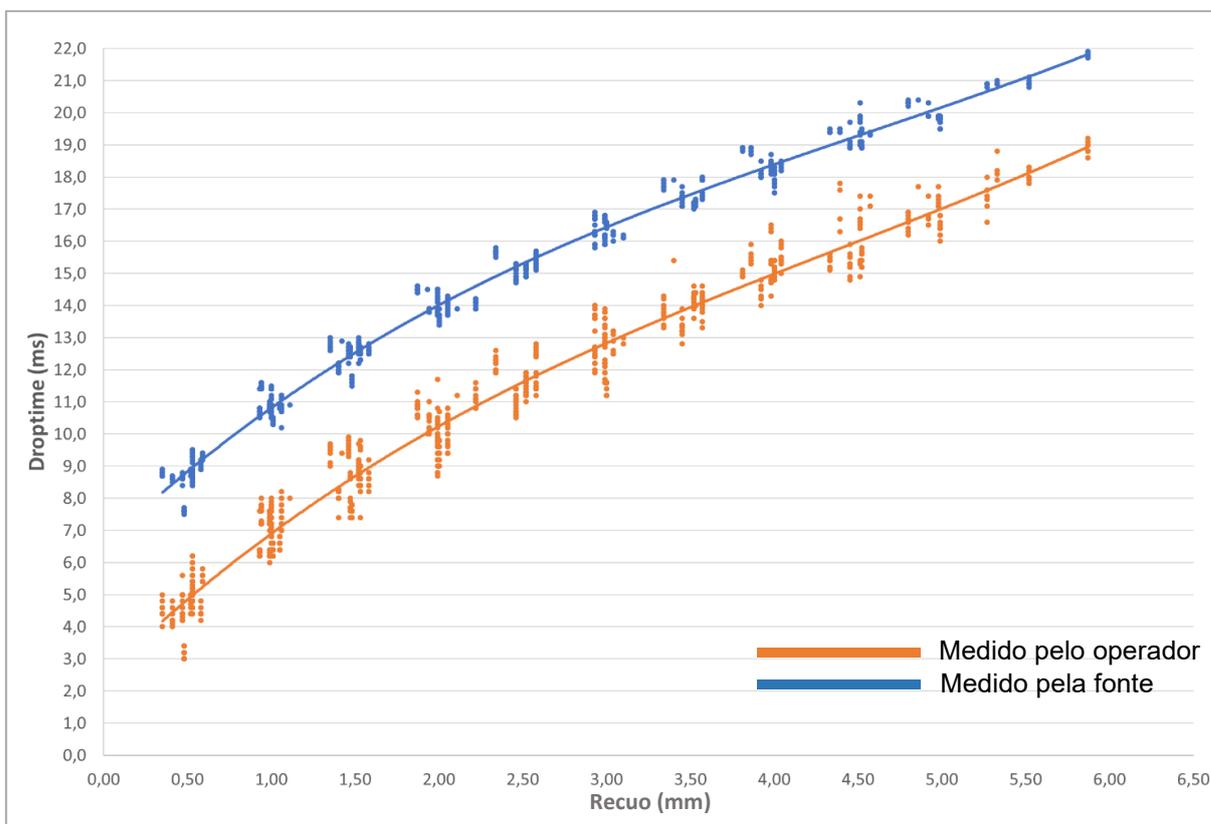
De modo a se obter um valor exato da velocidade (Tabela 2), esta variável foi calculada a partir dos valores de tempo e deslocamento reais, ou seja, considerando somente a região laranja do oscilograma.

As duas metodologias de verificação do tempo de queda do pino foram estudadas e plotados no gráfico da Figura 74. Embora apresente uma pequena defasagem, os valores apresentados pela fonte já servem como parâmetro para o operador estimar o valor de recuo regulado. No entanto, é necessário compreender os erros que podem ser atribuídos muitas vezes à medição realizada pelos equipamentos de soldagem de forma geral.

Figura 73 – Intervalos de medição do valor de “*drop time*” apontando o atraso do sistema de medição



Fonte: O autor

Figura 74 – Curvas do valor de *drop time* medidos pelo operador e pela fonte

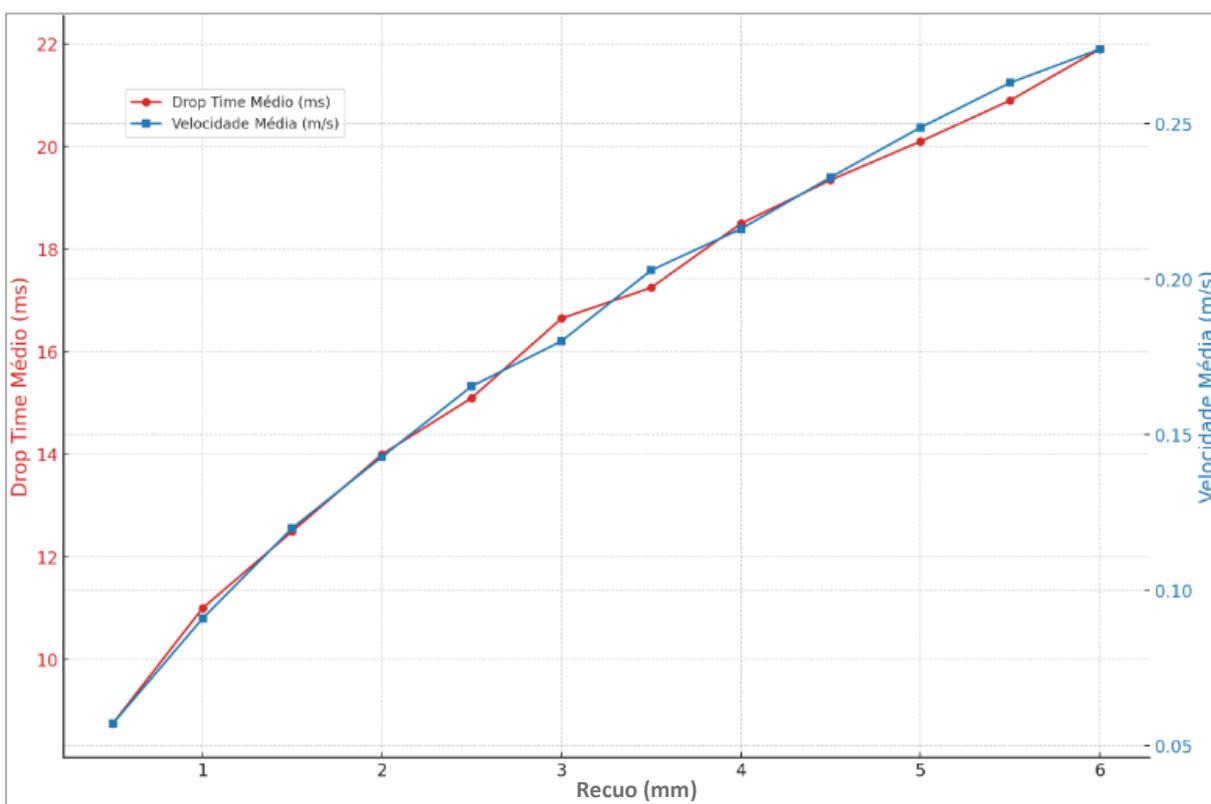
Fonte: O Autor

A explicação mais plausível para este fenômeno reside na disparidade de velocidade com a qual sinais elétricos e mecânicos são captados e interpretados pelos dispositivos de medição. Nos sistemas eletromecânicos, a reação dos dispositivos à entrada de sinais pode variar amplamente, baseando-se na tipologia do sinal a ser mensurado. Especificamente, neste caso, a resposta do conjunto mecânico a um comando pode experimentar um retardo significativo na interpretação do movimento comparado à detecção de um sinal elétrico imediato. Esse atraso decorre da inércia do conjunto mecânico, ou seja, do intervalo necessário para iniciar o movimento do pino após o recebimento do comando. Embora muito rápido, esse retardo de aproximadamente 3 a 4 ms é interpretado pelo sensor de deslocamento.

Contrastando, a fonte de soldagem, que processa um sinal elétrico direto, associado à tensão entre o pino e a peça, tem a capacidade de perceber alterações quase que instantaneamente. Isso se deve à rapidez com que os sinais elétricos se propagam, o que é muito superior e menos sujeito a interferências em comparação com a resposta dos sistemas mecânicos. Estes últimos são dependentes de movimentos físicos e podem ser impactados por elementos como atrito e inércia.

Por fim, foi elaborado um mapa para este conjunto (fonte e pistola Soyer), relacionando o valor de recuo, o tempo de queda do pino e sua velocidade média, apresentadas graficamente Figura 75, mostrando um aumento quase linear no tempo de queda (*drop time*) e um aumento proporcional na velocidade média com o aumento do recuo. Isso pode indicar que a força exercida pela mola é constante ou que há uma aceleração constante envolvida no movimento da mola.

Figura 75 – Relação entre o parâmetro de recuo, tempo de mergulho e velocidade média



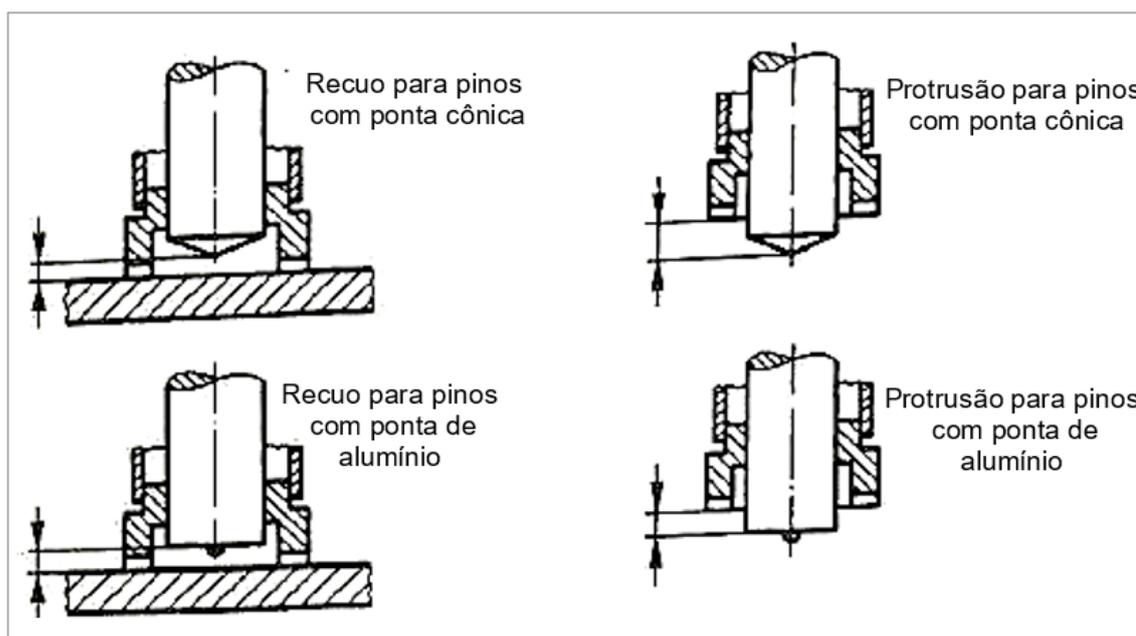
Fonte: O Autor

5.4 INFLUÊNCIA DA PONTA DO PINO

A complexidade inerente ao processo de Soldagem de pinos por Arco Retraído (SW) é influenciada pela geometria das pontas dos pinos utilizados. O mercado oferece uma variedade de formatos de pinos para soldagem, incluindo modelos com extremidades cônicas, com inserto de alumínio, abaulados e finos, cada um apresentando características únicas que, possivelmente, impactam o procedimento de soldagem. Atualmente, a prática de SW ajusta a protrusão e o recuo do pino baseando-se no formato específico da ponta, conforme ilustrado na Figura 31. Embora estas práticas sejam sustentadas por experiências empíricas acumuladas, uma análise detalhada que justifique essas escolhas específicas ainda é necessária.

Recomendações gerais indicam que pinos com pontas cônicas devem ter um recuo menor e uma protrusão maior em comparação com outros tipos, como os de ponta com esfera de alumínio, sugerindo que o entendimento completo da interação entre a geometria da ponta e a dinâmica do arco elétrico ainda não está completamente compreendido. Diferentes pontos de medição são empregados conforme a geometria da ponta: para pinos com ponta cônica, a medição é feita a partir da ponta propriamente dita, enquanto para pinos com esfera de alumínio, a esfera é ignorada, e a medição é realizada a partir da face plana do pino (Figura 76).

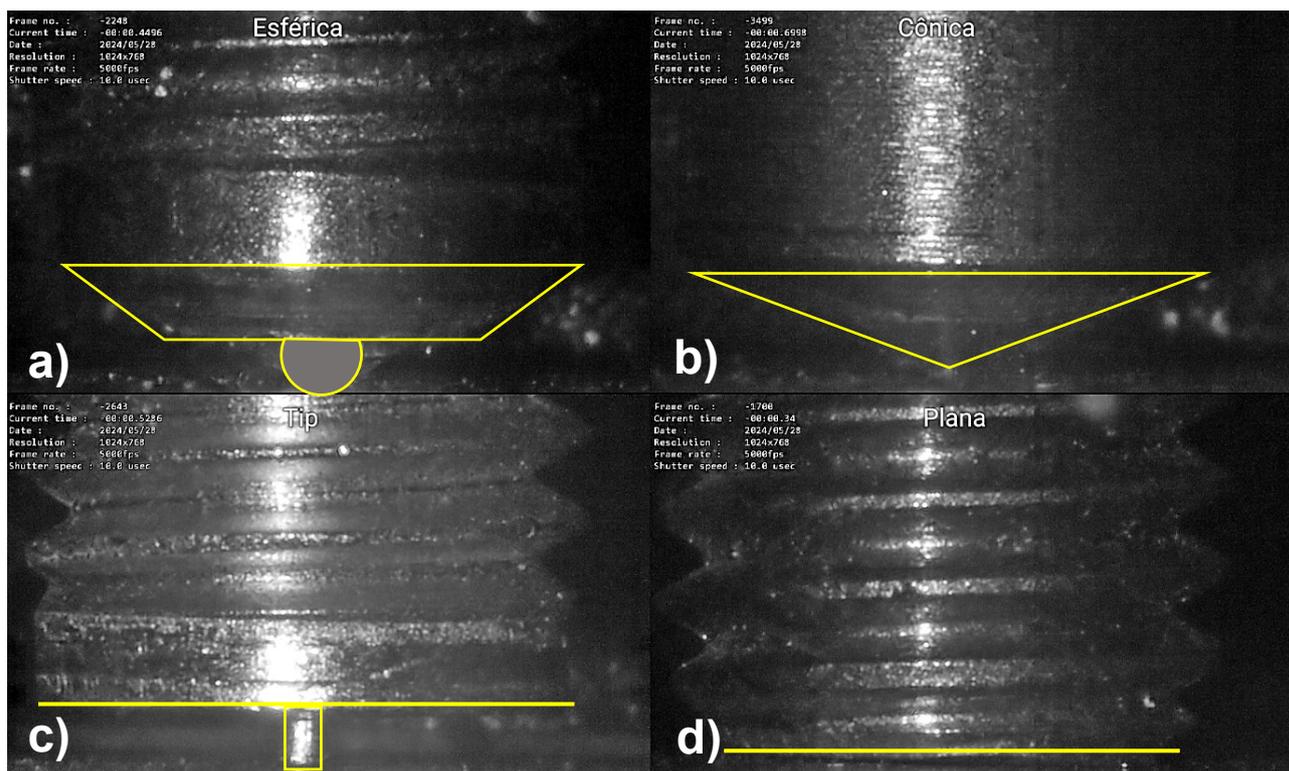
Figura 76 – Representação das variáveis recuo e protrusão conforme o tipo de ponta do pino



Fonte: (TRILLMICH; WELZ, 2016)

Este estudo explorou como variações na geometria das pontas de ignição afetam a fusão do metal e modificam o comprimento do arco elétrico durante a soldagem. A fase inicial da pesquisa focou em pinos M10 com ponta contendo a esfera de alumínio. O escopo do estudo foi posteriormente ampliado para incluir pinos com pontas cônicas, finas e planas, estas últimas foram usinadas para remover a ponta original. Este último tipo mencionado, não se trata de uma configuração usual, no entanto, poderá servir como um indicativo do motivo de se utilizar uma ponta específica em pinos de soldagem. O objetivo era examinar, por meio de filmagem (Figura 77), análise por oscilogramas, por macrografia e radiografia, como os parâmetros de SW e a configuração de ponta afetam o processo, utilizando anel cerâmico durante a soldagem assegurando a consistência dos resultados.

Figura 77 – Pontas testadas a) esférica b) cônica c) fina d) plana



Fonte: O Autor

Para auxiliar na compreensão de como o processo se inicia conforme a ponta do pino utilizada, a Figura 78 mostra um conjunto de fotos de pinos com diferentes geometrias de pontas sendo submetidos à soldagem. As geometrias são com ponta de ignição de alumínio, ponta fina, ponta cônica e uma ponta totalmente plana.

Neste experimento os parâmetros foram desenvolvidos para os modelos de pinos com a ponta de alumínio e para os demais modelos, os parâmetros foram replicados a título de comparação. Assim os melhores resultados eram esperados para este tipo de ponta. Os demais tipos foram submetidos aos mesmos parâmetros para identificar a interferência de cada um deles sobre o processo. Em contraste a este resultado, as amostras com outras configurações de ponta exibiram características de solda marcadamente diferentes, destacando a importância crítica da geometria da ponta no processo de SW e sua correlação com uma parametrização específica, especialmente ao usar anel cerâmico.

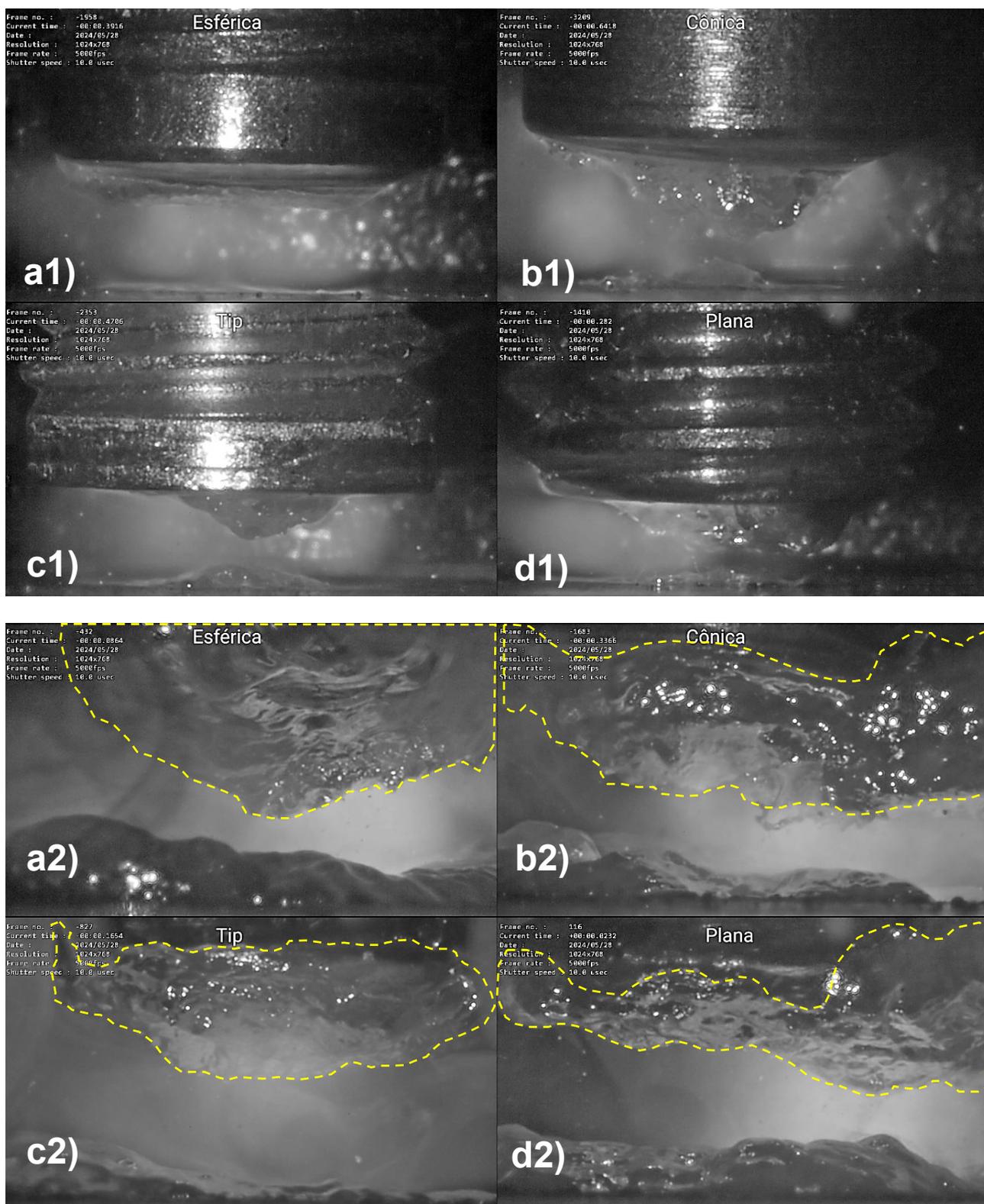
A presença de uma esfera de alumínio na ponta de alguns pinos de aço tende a facilitar a abertura do arco devido ao baixo potencial de ionização do alumínio (5,98 eV) em comparação ao ferro (7,87 eV). Ao iniciar o arco, essa esfera se funde rapidamente, liberando elétrons com maior facilidade e reduzindo a tensão necessária para a ignição. Além disso, o alumínio vaporizado pode atuar como um facilitador da ionização do plasma, tornando o arco mais estável e promovendo uma abertura mais rápida e consistente, especialmente em condições onde a formação do arco poderia ser dificultada pela presença de óxidos ou variações na superfície do pino e da peça.

Por meio de análise das filmagens, os resultados sugerem que a ponta de alumínio e a ponta fina facilitam a ignição do arco elétrico devido à sua menor área de superfície no ponto de contato, o que pode resultar em uma maior densidade de corrente e facilitar a ionização do ar entre o pino e a peça. Da mesma forma, foi possível observar que após a abertura do arco, a fusão destas pontas pode ser relativamente rápida devido ao menor volume de material que precisa ser fundido, o que permite que o arco elétrico passe rapidamente para a fusão na parte central do corpo principal do pino. A ponta cônica também auxilia na abertura do arco elétrico, especialmente na parte de menor diâmetro, onde a concentração de energia inicial é mais alta.

No entanto, a fusão da ponta cônica é mais complexa devido ao volume progressivamente maior de material para a mesma energia. Na ponta cônica a fusão é progressiva, e o arco deve escalar o pino, continuando até que a fusão atinja a área correspondente ao diâmetro do pino. À medida que o cone se funde e o diâmetro aumenta, a quantidade de material que precisa ser fundida também aumenta, o que exige mais energia e tempo de soldagem. Além disso, a manutenção do arco torna-se mais desafiadora, já que o perfil de fusão muda constantemente à medida que o

diâmetro do cone se alarga. Estas observações são evidenciadas na sequência de imagens da Figura 78. Consequentemente, o comprimento do arco é variável já no momento de abertura, diferentemente do que ocorre com a ponta esférica de alumínio ou a ponta totalmente plana. Adicionalmente, a protrusão para o pino cônico é configurada para ser maior, garantindo que a mínima penetração atinja a altura do cone, evitando, assim, uma soldagem incompleta ou com um diâmetro de colar inferior ao do pino. Se o cone não for completamente fundido, pode haver inconsistências na solda, como por exemplo um mergulho frio onde a ponta não foi completamente fundida e toca à peça ainda em estado sólido. Além disso, o valor do recuo deve ser ligeiramente menor que nas demais condições, visto que, após a fusão do cone o comprimento do arco seria demasiadamente alto.

Figura 78 – Imagens dos pinos de solda com diferentes geometrias de pontas sendo submetidos à soldagem, a) ponta esférica b) ponta cônica c) ponta fina d) ponta plana

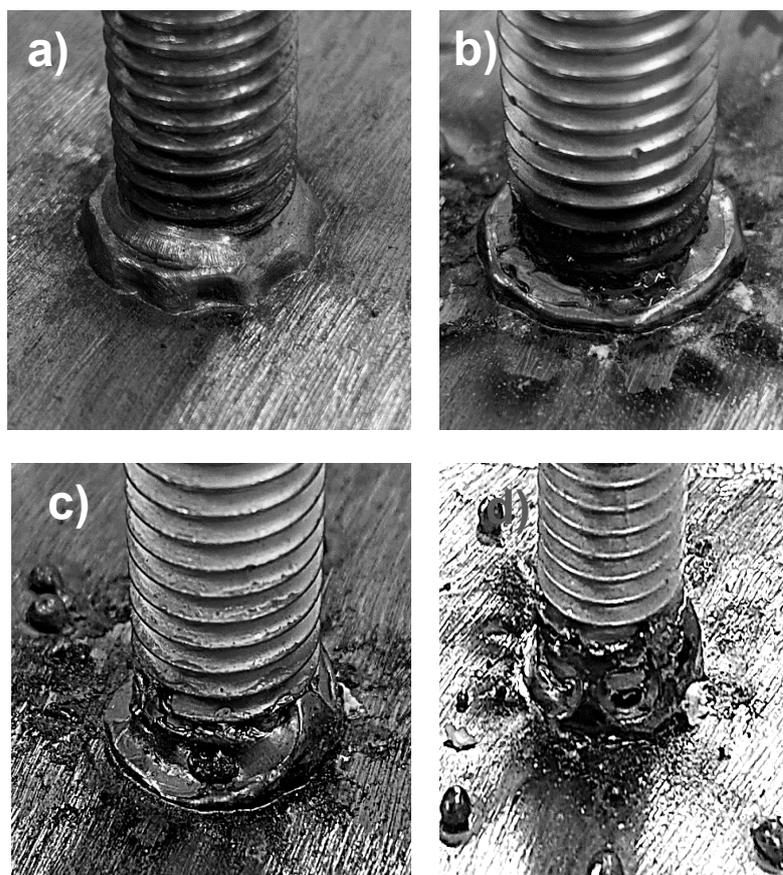


Fonte: O autor

Embora seja tecnicamente viável soldar todos os modelos de pinos com diferentes pontas, os resultados de inspeção visual (Figura 79) evidenciam que é

imperativo ajustar adequadamente os parâmetros de soldagem para cada caso ou alterar o tipo de contenção da poça como anel cerâmico ou utilização de bocais de gás. Para os mesmos parâmetros, fica evidente que a formação do colar foi influenciada. Neste teste específico, a hipótese para esta ocasião pode estar atrelada à influência da geometria do anel cerâmico que comporta apenas uma quantidade específica de material fundido de cada tipo de pino. Quando se utiliza outro tipo de ponta, a cônica por exemplo, que possui mais material para ser fundido com o mesmo parâmetro, este material pode extravasar pelos canais de desgaseificação do anel cerâmico devido ao pequeno espaço disponível para contenção. O volume de material fundido, considerando somente a ponta de ignição, resultou em, aproximadamente, $52,36 \text{ mm}^3$ para a ponta cônica. Este valor é muitas vezes maior que a ponta fina, composta por um pequeno cilindro, o qual apresenta um volume drasticamente menor de aproximadamente $1,0 \text{ mm}^3$.

Figura 79 – Resultado da solda realizada com diferentes tipos de pontas dos pinos porém com os mesmos parâmetros de soldagem a) Ponta esférica, b) ponta cônica c) ponta fina d) ponta plana

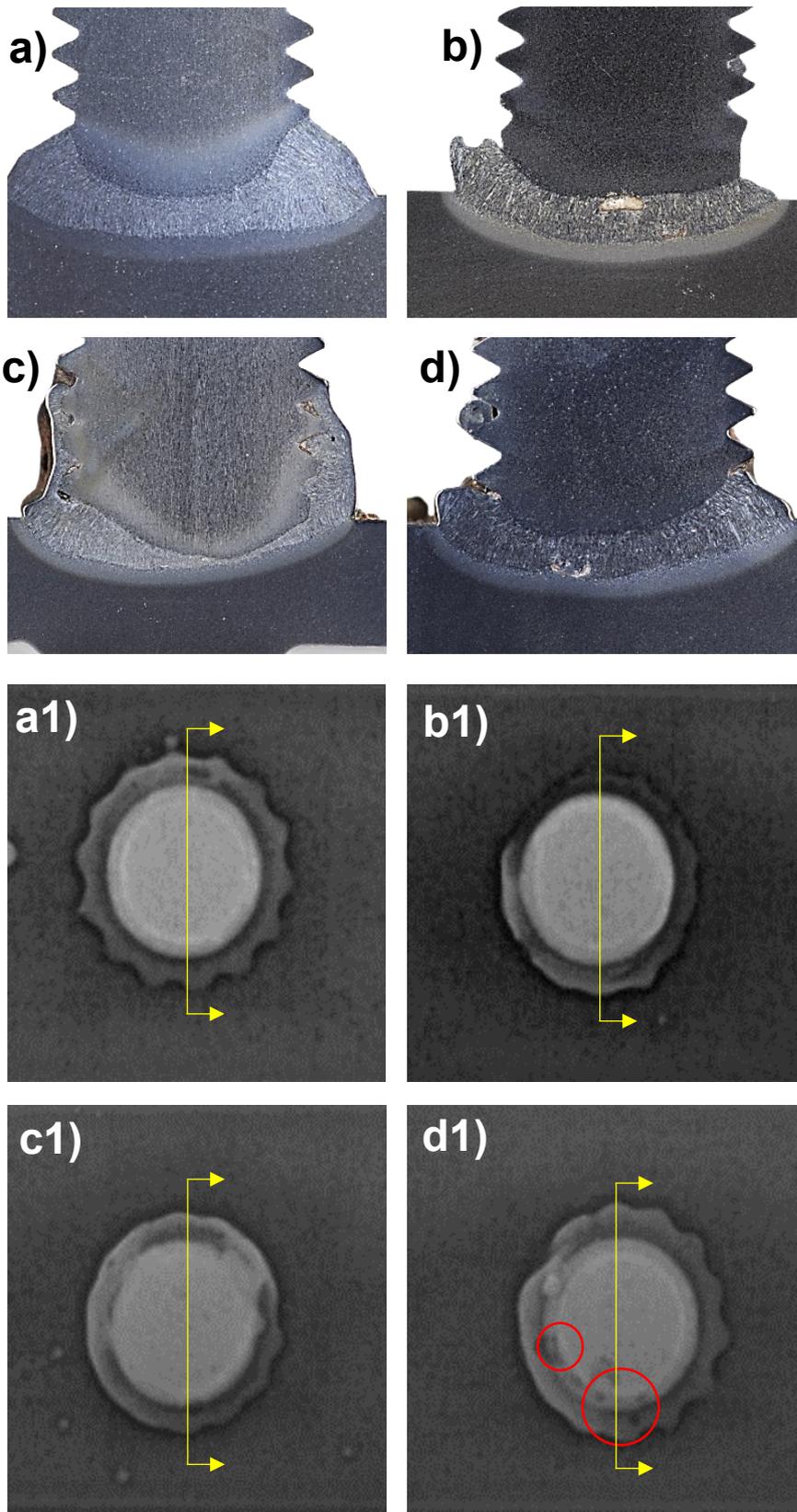


Fonte: O autor

Enquanto a inspeção visual serve como uma verificação inicial para identificar defeitos superficiais em soldas, ela não é capaz de avaliar a condição interna da junta soldada. Com o entendimento de que a integridade da solda vai além do que é visivelmente aparente, procedeu-se à complementação das avaliações visuais com a execução de macrografias em todas as amostras. As macrografias, apresentadas na Figura 80, revelam aspectos como a penetração da solda e possíveis defeitos internos. Adicionalmente, foram realizados ensaios não destrutivos por meio de radiografia, cujos resultados são ilustrados na Figura 80, oferecendo uma perspectiva sobre a integridade interna das soldas. Para o mesmo parâmetro de soldagem, não foram encontrados defeitos visíveis na macrografia em nenhuma das condições testadas. Porém, na radiografia é possível observar porosidade e falta de fusão na amostra de pino que não possuía nenhuma ponta em sua extremidade (face plana).

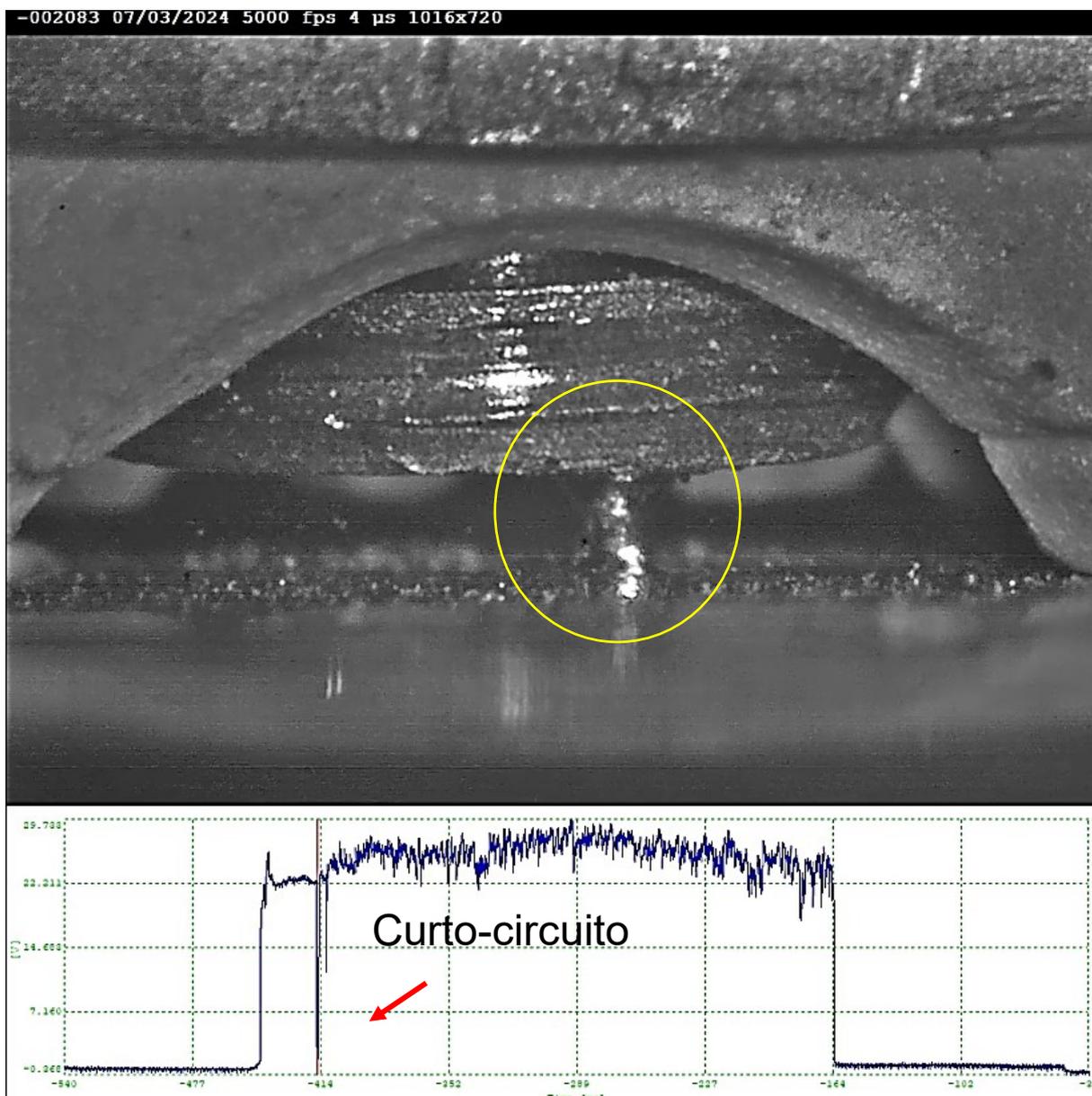
O pino sem ponta, com a face plana, apresentou instabilidade na abertura do arco observada por meio dos oscilogramas de tensão e nas filmagens de alta velocidade (Figura 81). Foi possível identificar a abertura do arco piloto no centro do pino para as condições de ponta cônica, esférica e fina. No entanto, novamente, a ponta plana propiciou a abertura do arco de forma descentralizada e posterior fusão não uniforme. Neste caso, quando não se tem uma saliência na extremidade do pino o arco tem extrema dificuldade em iniciar no centro e com isso gera uma fusão não uniforme na extremidade do pino que por consequência gerou curtos-circuitos no instante inicial do procedimento. Estes curtos podem comprometer a execução da solda diminuindo a potência média, ou até mesmo, paralisar o processo de fusão devido ao longo tempo em curto-circuito gerando apenas aquecimento por efeito joule até acabar o tempo de soldagem. Um pino soldado nessa condição não atinge a resistência mecânica necessária, sobretudo, devido à má formação do colar de solda. Apesar das instabilidades observadas durante a execução do processo, foi possível realizar algumas soldas com o pino sem ponta.

Figura 80 – Macrografias e inspeção por raio-x. a) com ponta esférica de alumínio, b) ponta cônica c) ponta fina d) ponta plana



Fonte: O autor

Figura 81 – Curtos-circuitos observados na inicialização do arco piloto com pino sem ponta de ignição (extremidade plana)



Fonte: O autor

Este experimento sublinha de forma clara a influência da ponta de ignição sobre os parâmetros de soldagem, realçando a importância de uma seleção criteriosa destes componentes, bem como do ajuste preciso dos parâmetros de soldagem, para garantir a qualidade e a integridade das junções soldadas. Observou-se que, de fato, a forma da ponta do pino pode afetar diretamente a velocidade de fusão do corpo do pino e, por conseguinte, o comprimento do arco elétrico. Variações nesse comprimento resultam em alterações significativas na tensão e, em equipamentos controlados por

corrente, na energia de soldagem. Um arco mais extenso tende a ser mais instável, aumentando a propensão ao sopro do arco (TRILLMICH; WELZ, 2016).

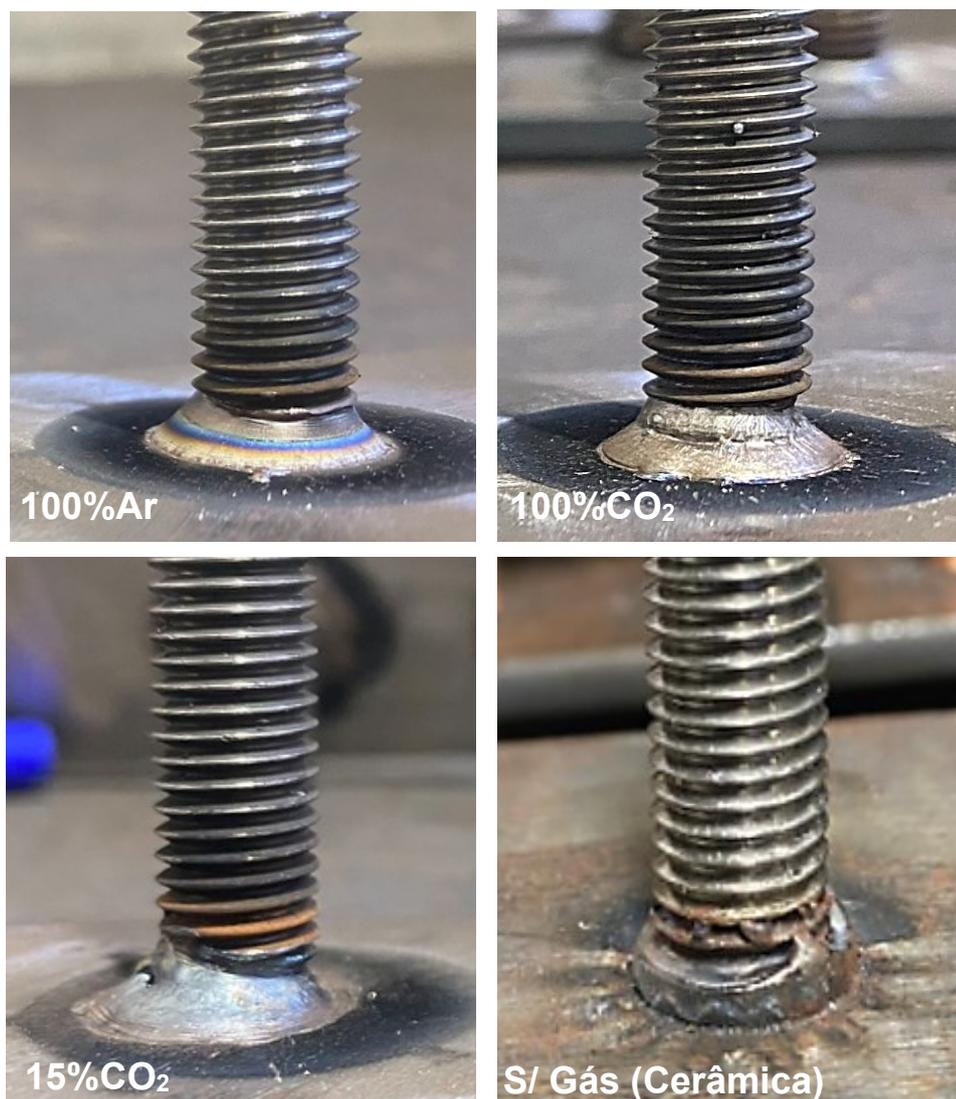
5.5 INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO

Na soldagem a arco, diferentes gases são utilizados para criar um ambiente protegido ao redor do arco elétrico e da poça de fusão. Isso ajuda a prevenir a oxidação e contaminação do metal de solda pela atmosfera. Os gases mais comuns usados na soldagem a arco incluem Argônio (Ar), Dióxido de Carbono (CO₂), além de Hélio (He) e Nitrogênio (N₂) e misturas entre eles. Cada um desses gases promove características distintas ao processo de soldagem de pinos, afetando a penetração, a estabilidade do arco e a aparência do colar de solda, além de outros fatores microestruturais.

Este processo, portanto, mostrou uma certa dependência da escolha adequada dos gases de proteção, que afetam a estabilidade do arco elétrico, na qualidade da solda e na integridade estrutural das juntas soldadas. Assim, este capítulo se concentra na análise comparativa do uso de diferentes gases de proteção - Argônio puro, CO₂ puro, uma mistura de CO₂ e Argônio (C15), e um anel cerâmico - durante a soldagem de pinos de aço carbono. Através da observação dos sinais de tensão, corrente, potência e temperatura, bem como da análise macroestrutural das zonas de solda, buscou-se entender as influências de cada gás na estabilidade do processo e na qualidade da solda obtida.

Para conduzir este estudo, foram utilizados os pinos roscados de aço carbono com um diâmetro de 10 mm. Os pinos foram soldados em chapas de aço utilizando diferentes gases de proteção: 100% Argônio, 100% CO₂, uma mistura de 15% CO₂ e 85% Argônio (C15), e um anel cerâmico. As soldagens foram realizadas em condições controladas, registrando-se os sinais de tensão, corrente, potência e temperatura durante o processo. As imagens da formação do colar e das macrografias das soldas foram obtidas para análise da qualidade e integridade das juntas. Para tanto, o *software ImageJ* foi utilizado para medir as áreas das zonas fundidas (ZFs) e das zonas termicamente afetadas (ZTAs) nas diferentes condições de soldagem. A temperatura no verso da chapa de aço carbono com 9,5 mm foi medida por meio de termopares tipo K. As soldas podem ser visualizadas na Figura 82.

Figura 82 – Comparação entre soldas realizadas com diferentes tipos de gases e anel cerâmico

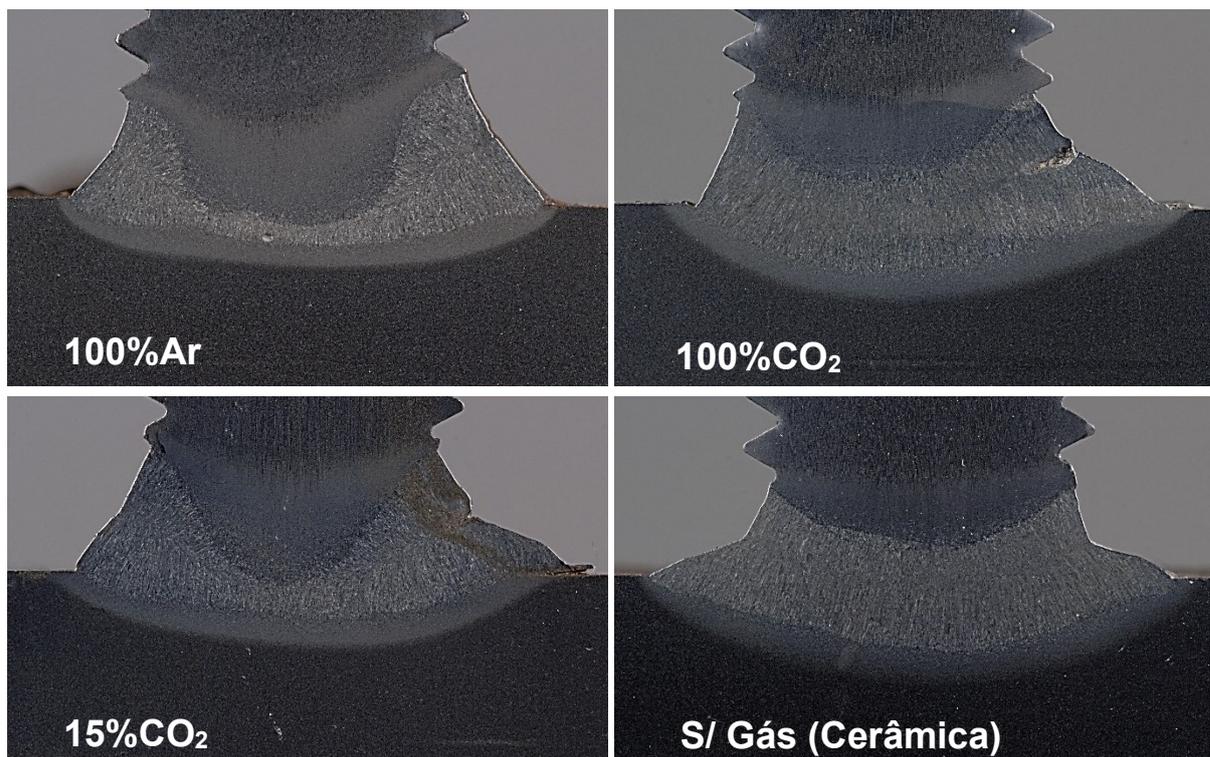


Fonte: O autor

A análise das soldas realizadas com diferentes meios de proteção evidencia variações na morfologia e coloração do colar de fusão, indicando possíveis diferenças nas condições térmicas do processo. A coloração da superfície do metal pode estar associada à interação do metal fundido com os gases do ambiente e à taxa de resfriamento, refletindo diferenças na oxidação e na dissipação de calor. No caso do argônio puro (100% Ar) e da mistura com 15% CO₂, observa-se uma coloração mais homogênea e tons azulados, o que pode ser resultado de um resfriamento mais controlado em temperaturas mais baixas. O argônio, sendo um gás inerte, minimiza reações oxidativas e favorece um resfriamento mais gradual, permitindo que o colar fundido se solidifique sem formação excessiva de óxidos na superfície. Em contrapartida, as soldas realizadas com 100% CO₂ e somente com anel cerâmico sem

proteção gasosa adicional, percebe-se uma aparência mais acinzentada e irregular. Isso ocorre porque o CO_2 , ao ser dissociado pelo arco elétrico, libera oxigênio, tornando o ambiente mais reativo. Esse oxigênio em contato com o metal superaquecido favorece a formação de óxidos metálicos, o que contribui para uma coloração mais escura e uma superfície menos homogênea. Além disso, a maior reatividade do ambiente pode resultar em um aquecimento mais intenso do colar de fusão, já que a energia térmica é dissipada de maneira diferente quando há maior envolvimento de reações químicas. A proteção por anel cerâmico, por sua vez, não fornece um ambiente controlado, permitindo a presença do ar atmosférico (composto de nitrogênio e oxigênio), o que também favorece a oxidação intensa do colar e um resfriamento menos uniforme. Essa condição pode resultar em maior variação térmica na região fundida, contribuindo para a formação de colares menos uniformes e com maior rugosidade. As macrografias e as medições das variáveis elétricas e de temperatura do processo (Figura 87 e 88) corroboram estas hipóteses. Além disso, a análise das macrografias (Figura 83) e a realização de medições das soldas permitem uma avaliação detalhada das áreas fundidas e das zonas termicamente afetadas (ZTAs) para cada gás de proteção utilizado e pelo anel cerâmico.

Figura 83 – Comparação entre tipos de proteção com gases e anel cerâmico



Fonte: O autor

A solda utilizando Argônio puro resultou uma zona fundida (ZF) de, aproximadamente, 25 mm², com um estreitamento no centro da solda. Esta dimensão da ZF sugere uma taxa de transferência de calor não elevada (Figura 88), resultando em uma penetração moderada se comparada com as demais. A ZTA no pino apresenta uma área de 19 mm², enquanto a ZTA na peça é de 11 mm². Uma ZTA com maior área no pino é esperada, visto que o pino apresenta uma massa consideravelmente menor que a peça. Além disso, a configuração de polaridade é negativa no pino (CC-) o que promove ainda mais aquecimento no consumível. Apesar das reduzidas dimensões das áreas, considera-se neste caso que a estabilidade do arco elétrico proporcionada pelo Argônio puro resultou em uma solda com qualidade adequada, sem inclusões ou contaminações.

A utilização da mistura de argônio e 15% de CO₂ (C15) resultou em uma ZF de, aproximadamente 35 mm², indicando uma maior transferência de calor em comparação com o argônio puro. A ZTA no pino é de 20 mm², e a ZTA na peça é de 15 mm². A maior ZF e as ZTAs mais extensas refletem a maior tensão do CO₂, que contribui para uma penetração mais profunda da solda. No entanto, a presença de argônio na mistura ajuda a manter uma estabilidade razoável do arco em vazões de

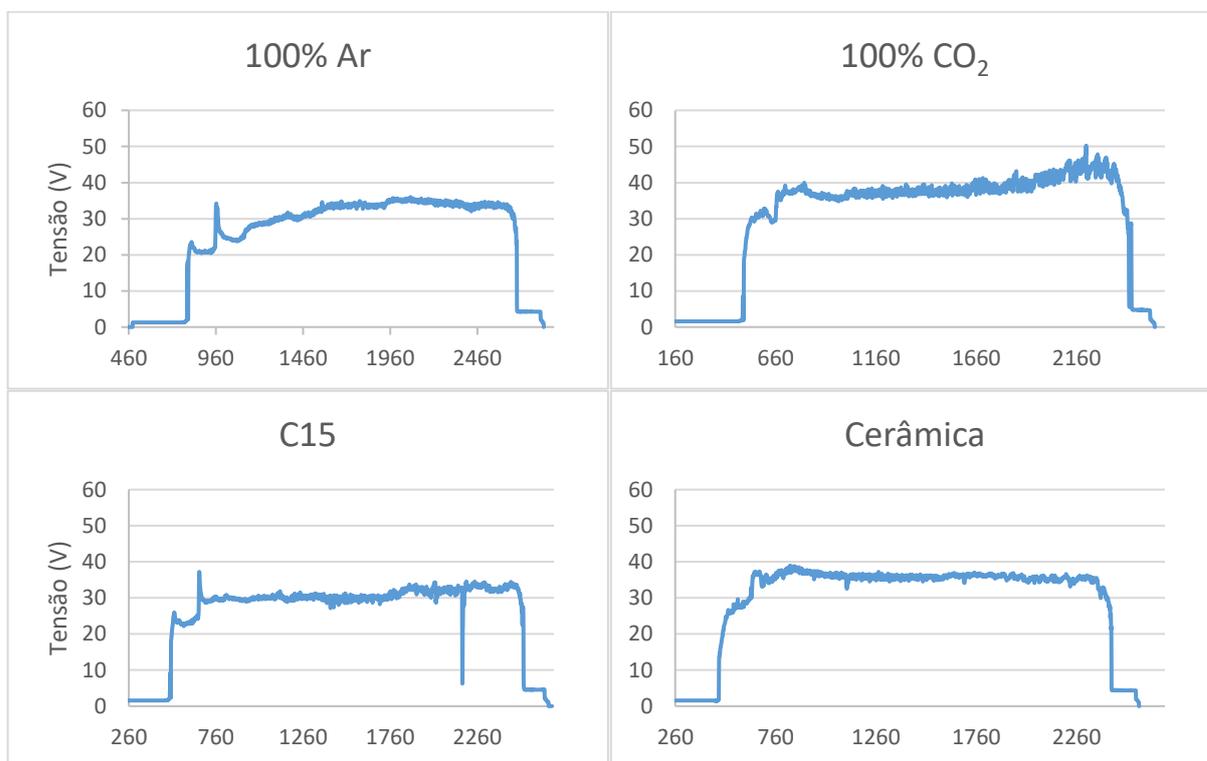
até 10 l/min, reduzindo a quantidade de respingos e melhorando o aspecto visual do colar em comparação com o uso de CO₂ puro.

A solda realizada com CO₂ puro resultou em uma ZF com 37 mm². Isso resultou numa penetração pronunciada, similar ao anel cerâmico, beneficiada pela tensão mais alta do CO₂, que aumenta a transferência de calor devido ao aumento da potência para a mesma corrente utilizada (Figura 87). A ZTA no pino é de 14,1 mm², enquanto a ZTA na peça é de 14,3 mm². Além disso, a reatividade do CO₂ resultou em uma maior turbulência do arco elétrico, causando flutuações de tensão e um valor próximo ao valor encontrado quando se utiliza anel cerâmico, além da maior incidência de respingos.

O uso de um anel cerâmico como proteção resultou em uma ZF de 41 mm², a maior entre todas as condições testadas. Isso indica a transferência de calor e penetração da solda. A ZTA no pino é de 13,6 mm², enquanto a ZTA na peça é de 17,7 mm². A cerâmica proporciona uma proteção física adicional, mantendo o arco elétrico estável e prevenindo a contaminação da poça de fusão. Apesar de não haver proteção gasosa essa condição resulta em uma solda de qualidade adequada, sem a presença de defeitos e uma penetração elevada. A solda sem proteção gasosa só é possível devido ao tempo relativamente curto da soldagem de pinos por arco retraído (até 1s). O elevado nível de corrente também é responsável pra desgaseificação da área da solda, que é praticamente isolado do ar atmosférico rico em nitrogênio.

Com relação à estabilidade do arco, outra função do gás, o Argônio puro se destaca por apresentar maior estabilidade no sinal de tensão durante a soldagem de pinos (Figura 84, Figura 85 e Figura 92). Essa estabilidade pode ser atribuída às propriedades inerentes do gás. Sendo um gás inerte, o argônio não reage quimicamente com o metal fundido, criando uma atmosfera de soldagem limpa que previne a contaminação por oxigênio e nitrogênio, os quais podem causar porosidade e inclusões na solda.

Figura 84 – Comparação dos sinais de tensão entre proteções distintas com gás e anel cerâmico



Fonte: O autor

A inércia química do argônio resulta em um arco elétrico estável, facilitando a manutenção de uma tensão constante (Figura 86 e 92). Sendo assim, as flutuações no sinal de tensão são mínimas (abaixo de 1 V). Desta maneira são garantidas uma distribuição uniforme do arco sobre a peça e menor temperatura no verso da chapa soldada (Figura 88).

O uso de CO₂ puro e da mistura C15 (15% CO₂ e 85% Argônio) apresentou algumas peculiaridades em termos de estabilidade do arco, refletidos nas flutuações observadas nos sinais de tensão (Figura 84 e Figura 92). Essas condições resultaram em um arco elétrico ligeiramente mais turbulento (Figura 91), manifestando-se em maiores flutuações de tensão ao longo do tempo. O comportamento instável do CO₂ é visível nas curvas de tensão, que mostram variações significativas comparadas ao Argônio puro.

A mistura C15, que combina Argônio e CO₂, em teoria busca equilibrar as propriedades dos dois gases. As curvas de tensão para a mistura C15 apresentam um comportamento intermediário, com menos flutuações que o CO₂ puro, mas ainda com variações perceptíveis. Essa mistura oferece um bom compromisso entre a estabilidade do arco e a penetração da solda, sendo uma opção viável para diversas

aplicações industriais, sobretudo no processo MIG/MAG. No entanto, a presença de CO₂ na mistura ainda contribui para alguma instabilidade, embora mitigada pela adição de argônio. Em determinadas vazões de gás (acima de 5 l/min) a mistura foi a única condição que apresentou curtos-circuitos durante o procedimento (Figura 92).

O anel cerâmico é uma opção viável e ideal para situações em que não é prático usar gases de proteção, como em locais remotos ou em operações de campo. No entanto, ele apresenta algumas singularidades operacionais em comparação com a utilização dos gases. Nesse caso, a solda está exposta ao ar atmosférico e também a uma mistura de vapores gerados durante a solda. Embora ofereça uma barreira física que protege a poça de fusão do oxigênio e do nitrogênio presentes no ar, ajudando a prevenir a oxidação e a contaminação, não existe uma atmosfera inerte para proporcionar um arco controlado, como no caso do argônio por exemplo. O ar atmosférico é rico em oxigênio e nitrogênio, que podem interferir na estabilidade do arco, promovendo a formação de óxidos e nitretos que podem afetar a consistência do arco. Além disso, embora o nitrogênio seja geralmente inerte em temperatura ambiente, ele pode reagir com certos materiais (aços inoxidáveis) quando submetido a elevadas temperaturas como a do plasma, formando nitretos que podem alterar as propriedades mecânicas da solda. Foi verificado que nesta condição a peça atinge a maior temperatura no seu verso, em comparação com as demais condições com gases, próximo dos 300°C.

Figura 85 – Sinais de corrente para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas

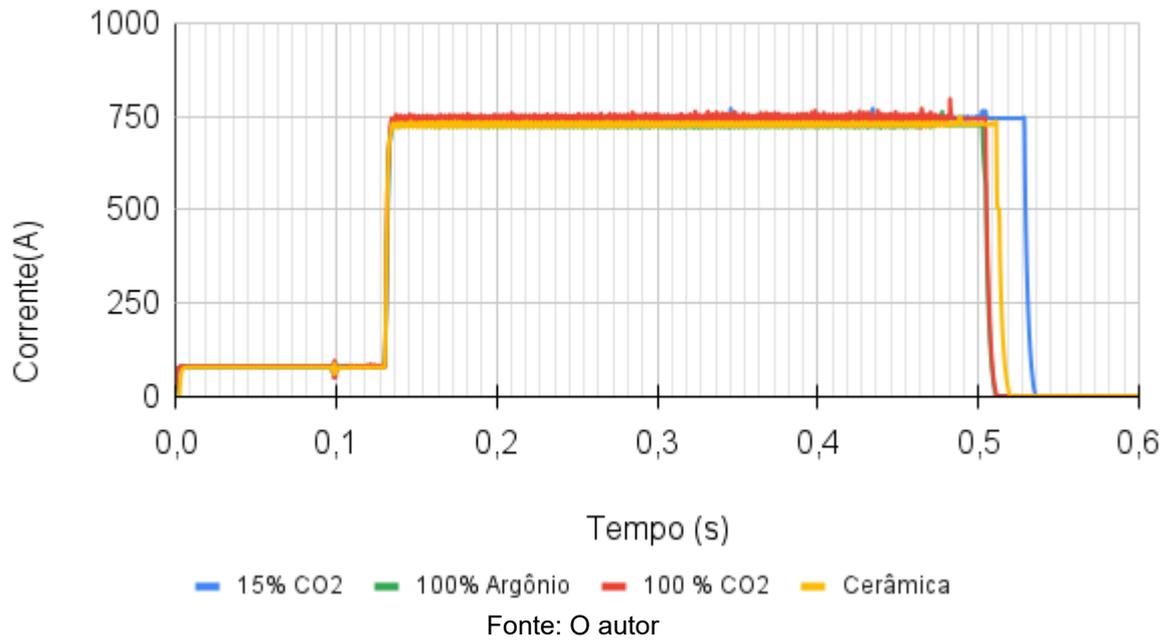


Figura 86 - Sinais de tensão para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas

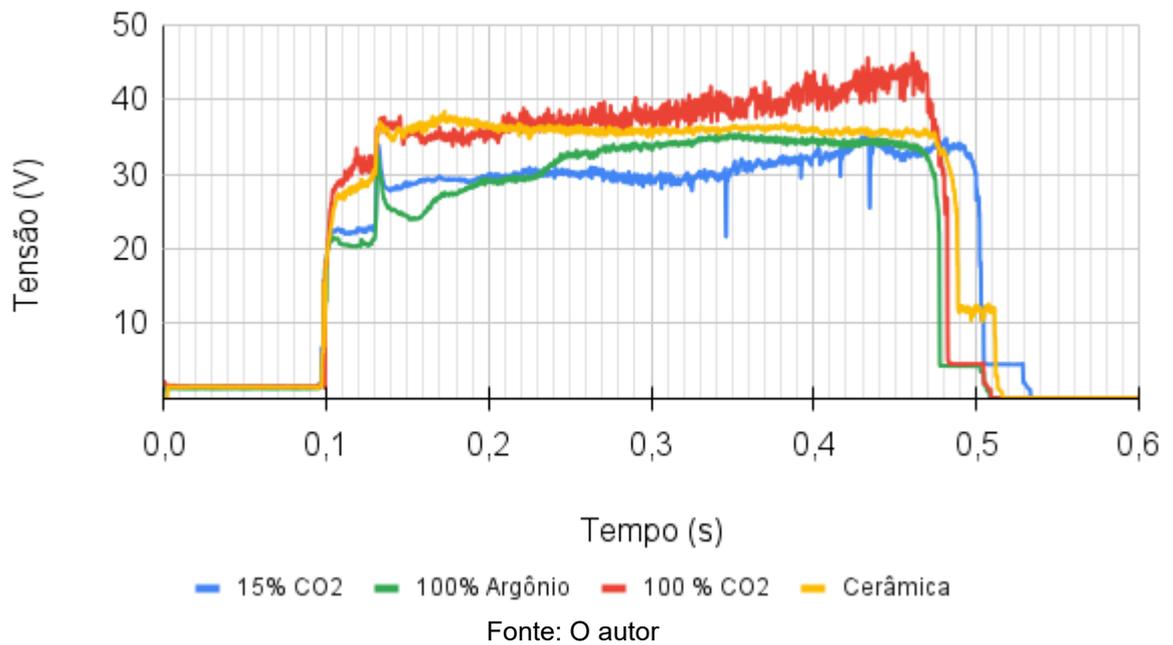


Figura 87 - Sinais de potência para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas

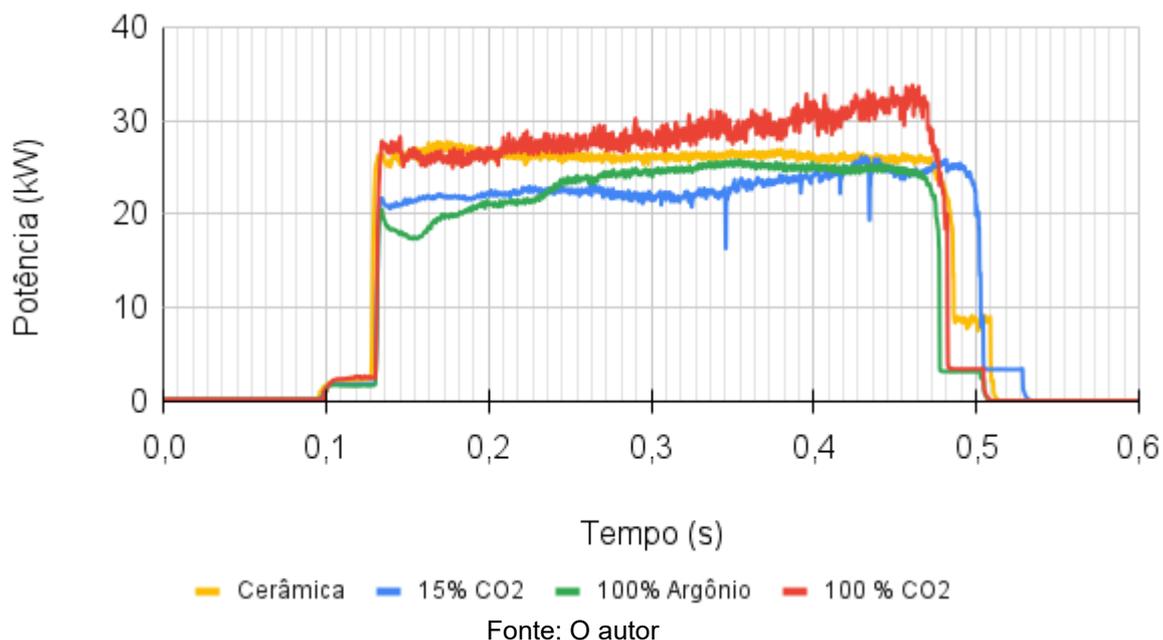


Figura 88 - Sinais de temperatura no verso da peça soldada para todas as distintas proteções com gás e anel cerâmico testadas

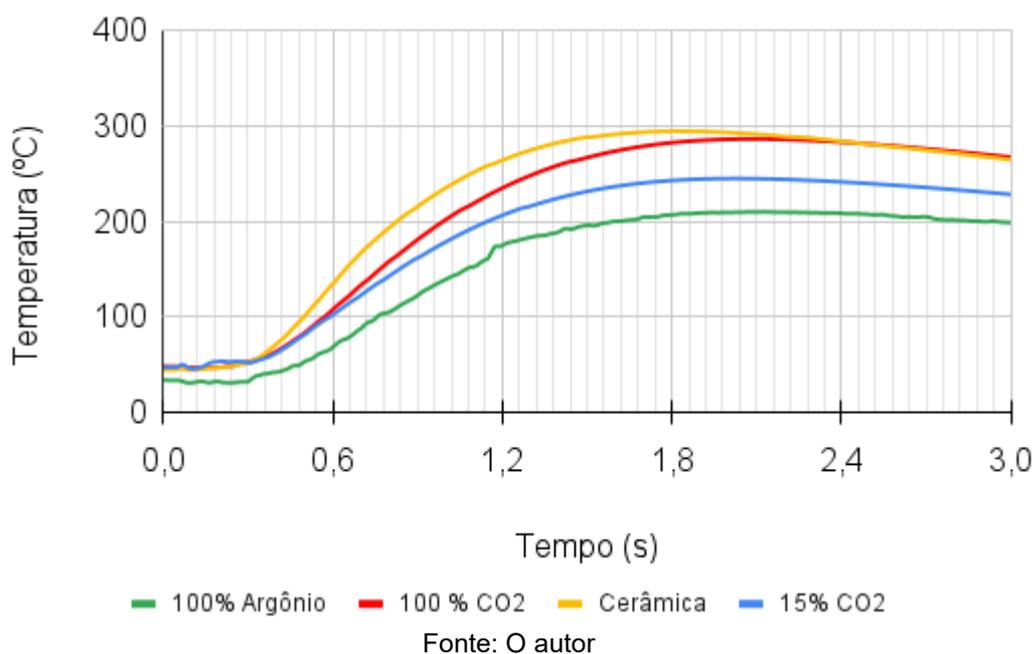
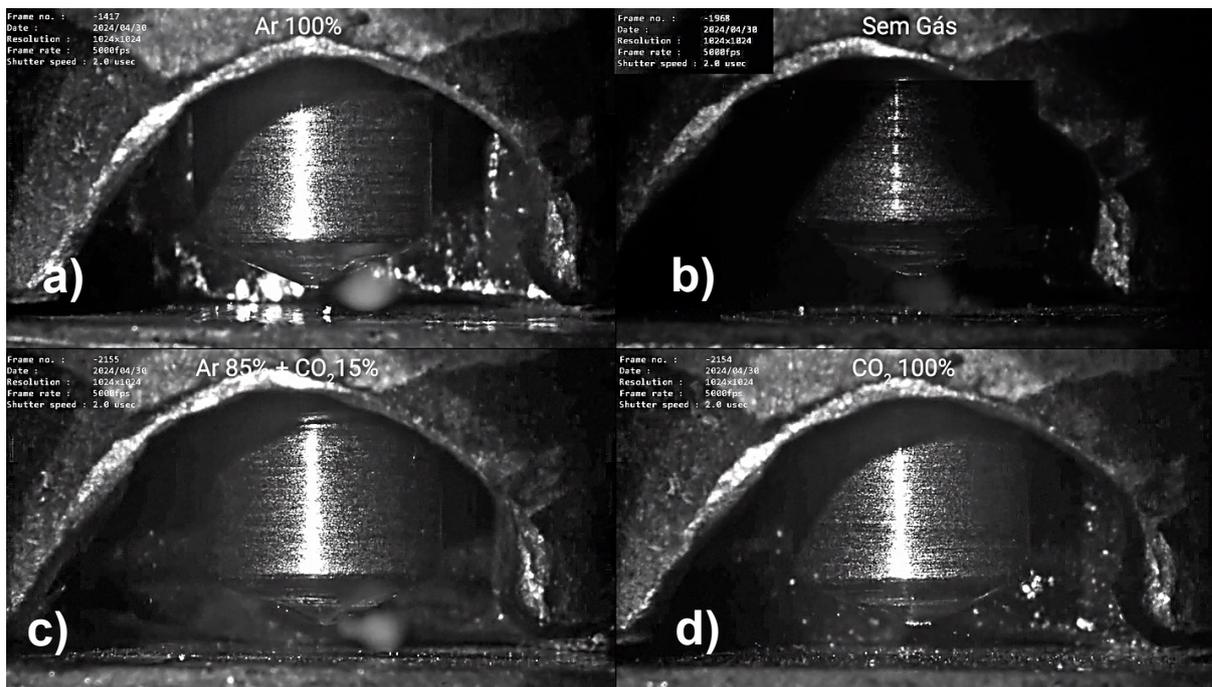
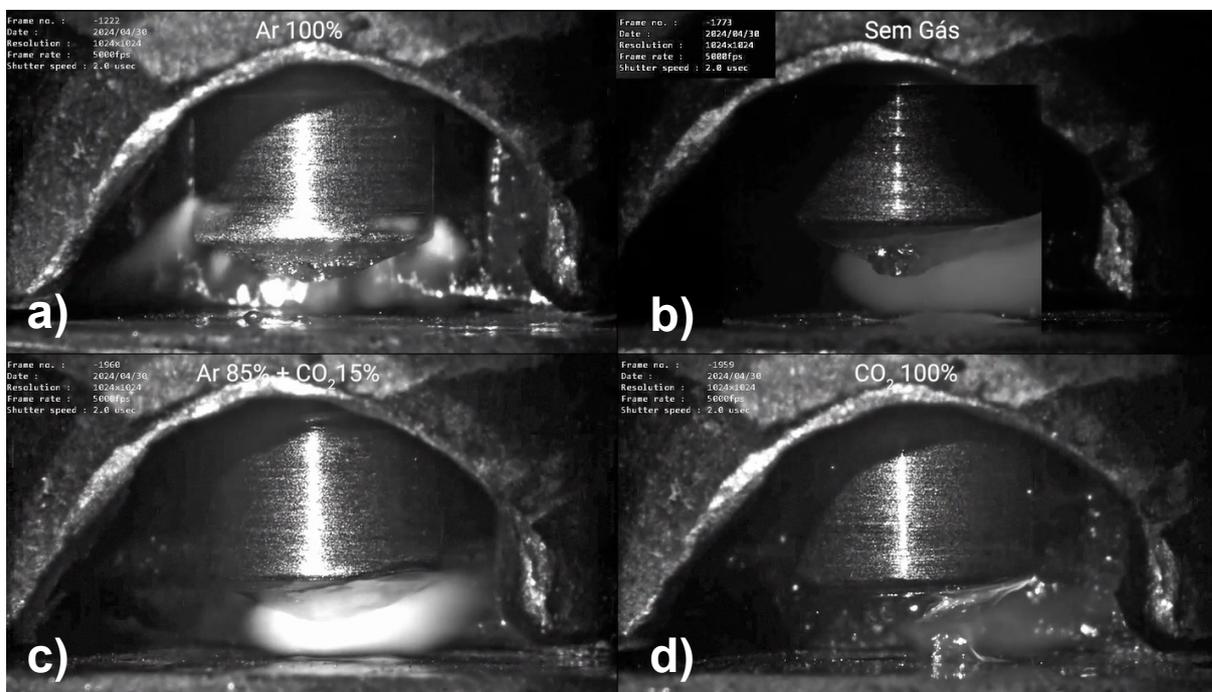


Figura 89 – Instante inicial da abertura do arco piloto para as diferentes condições de proteção testadas



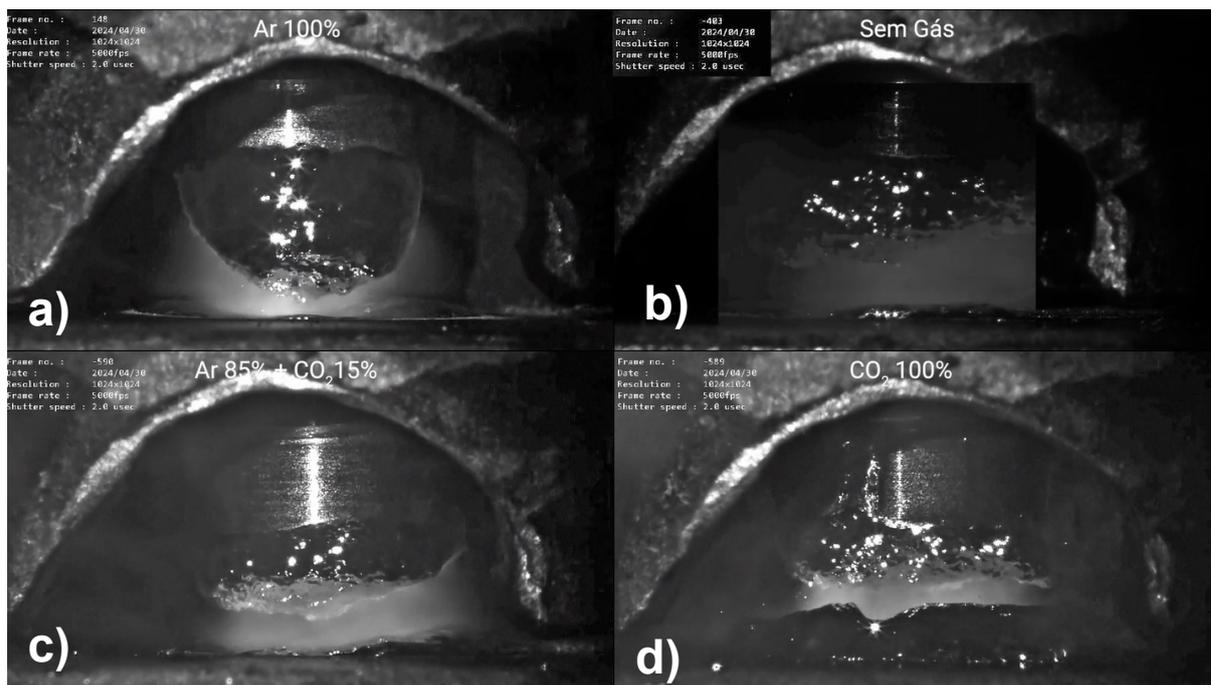
Fonte: O autor

Figura 90 - Instante inicial da abertura do arco principal para as diferentes condições de proteção testadas



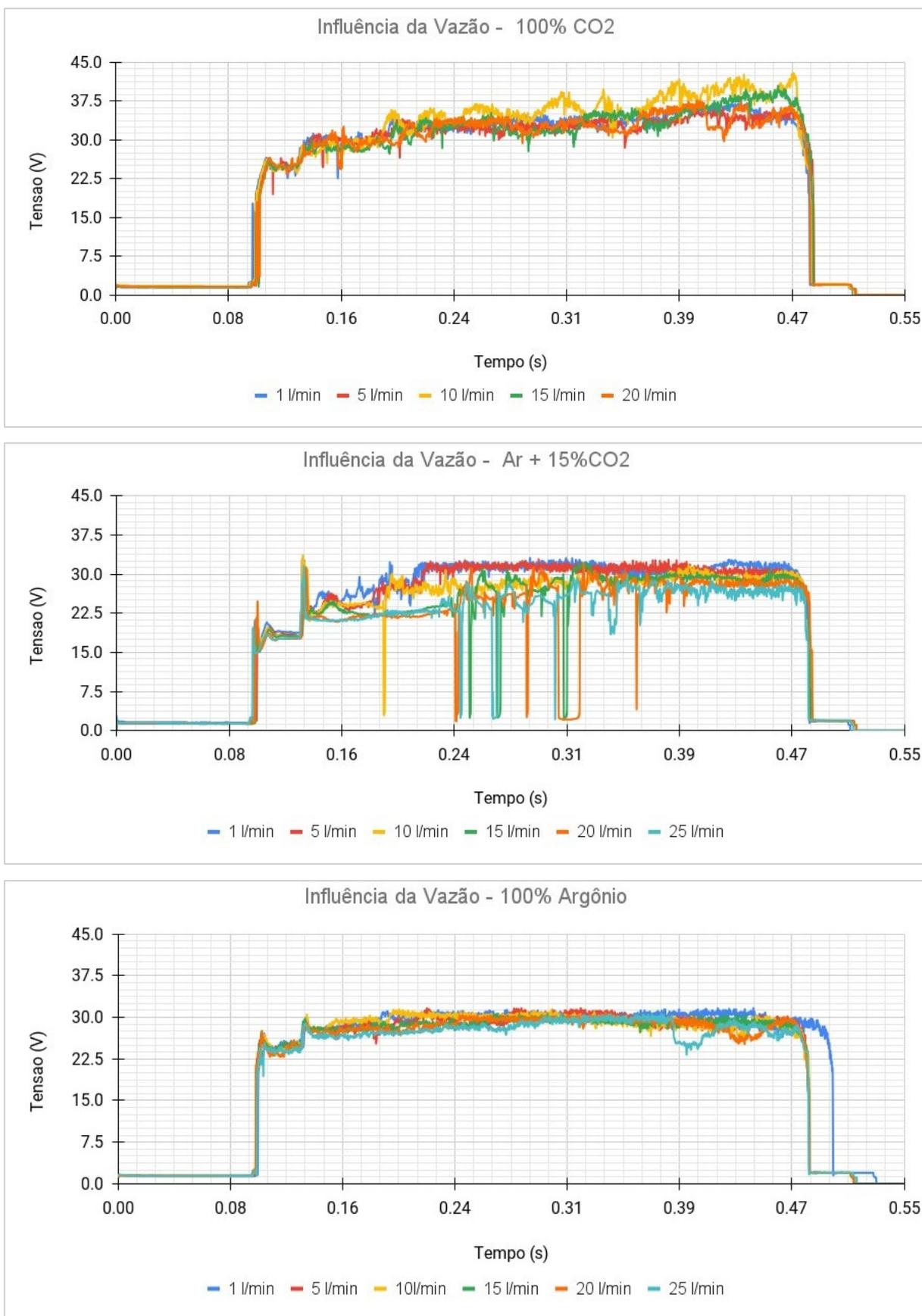
Fonte: O autor

Figura 91 – instante final do arco principal evidenciado diferentes níveis de fusão do pino e da peça



Fonte: O autor

As ligeiras instabilidades observadas nas medições com misturas contendo CO_2 ou CO_2 puro podem ser atribuídas à ação das moléculas de CO_2 no plasma. O CO_2 é ionizado pela alta energia do arco, gerando íons positivos e elétrons livres, mas também se dissocia em monóxido de carbono (CO) e oxigênio atômico (O). Esses processos geram flutuações na densidade de partículas no plasma, contribuindo para a instabilidade do arco. Além disso, a recombinação do oxigênio em moléculas de O_2 libera uma quantidade significativa de energia, aumentando a transferência de calor para o metal base em comparação com o argônio puro, que não passa por processos similares. Isso resulta em tensões mais altas devido à maior resistência elétrica do arco e em temperaturas mais elevadas no verso da chapa, devido à maior densidade de energia associada ao CO_2 . (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Figura 92 – Influência da vazão dos gases Argônio, CO₂ e mistura entre eles

Fonte: O autor

Os sinais de tensão juntamente com as medições das zonas fundidas e da ZTA corroboram as observações visuais das macrografias, destacando as diferenças na qualidade das soldas obtidas com cada gás de proteção. A maior área da zona fundida observada com o uso de cerâmica e CO₂ puro sugere que esses métodos promovem uma penetração mais profunda para a mesma corrente, o que pode ser desejável em certas aplicações. No entanto, a maior estabilidade do arco, considerando a variabilidade do sinal da tensão, foram obtidas com o Argônio puro. Assim, a escolha do gás de proteção deve ser cuidadosamente considerada, levando em conta as especificidades do processo de soldagem e as características desejadas da junta soldada.

5.6 INFLUÊNCIA DO CAMPO MAGNÉTICO

No presente estudo a influência do campo magnético sobre o processo de soldagem também foi investigado. Esta técnica amplamente discutida na revisão bibliográfica do presente trabalho, se mostra como uma tecnologia emergente para a soldagem de pinos sendo oferecida por poucos fabricantes de equipamentos até o presente período. Conforme Reiter e Dibiasi (2006) a soldagem utilizando campo magnético é auxiliado por uma geometria de pino especial que a apresenta uma pequena ponta fina em sua extremidade. Este tipo de pino foi evidenciado no item 5.4 do presente trabalho. Neste caso a patente depositada sobre este equipamento mostra o binômio pino/bobina como uma só aliança para ter o adequado aproveitamento da técnica.

Uma das justificativas do uso desta técnica com campo magnético seria a solução de problemas como a soldagem de pinos de maior diâmetro em chapas cada vez mais finas, por conta da potência reduzida que é capaz de ser empregada com este tipo de tecnologia. Deste modo, distorções na peça e problemas metalúrgicos oriundos do aquecimento excessivo dos metais soldados seriam atenuados. Normalmente, informações encontradas em catálogos de fabricantes de equipamentos apontam fortemente para um cunho comercial e, portanto, por muitas vezes carecem de uma abordagem científica orientando o consumidor final. Outra vantagem pouco citada está atrelada a redução do sopro magnético e soldagem fora de posição com pinos de grande diâmetro (acima de 12 mm) (CRAMER et al., 2014).

De modo a entender as nuances desta tecnologia, foram realizados experimentos de comparação com as tecnologias existentes (gás e anel cerâmico) em suas condições padrão, ou seja, nas melhores condições amplamente recomendadas para cada tipo de solda com pinos de 10 mm de diâmetro. Estes testes foram divididos em duas etapas. A primeira diz respeito ao comparativo propriamente dito entre as versões e a segunda etapa se baseia em uma comparação entre o método convencional (anel cerâmico) com a técnica com campo magnético utilizando os parâmetros idênticos tanto em chapa espessa (6,4 mm) quanto em chapa fina (2 mm). Na primeira etapa, para a soldagem com anel cerâmico foi utilizado o pino com o inserto de alumínio na ponta e para o procedimento com gás foi utilizado o pino de ponta cônica e gás argônio com vazão de 5 l/min. Para a modalidade em questão – assistida por campo magnético- foi utilizado o pino com ponta fina, também conhecido

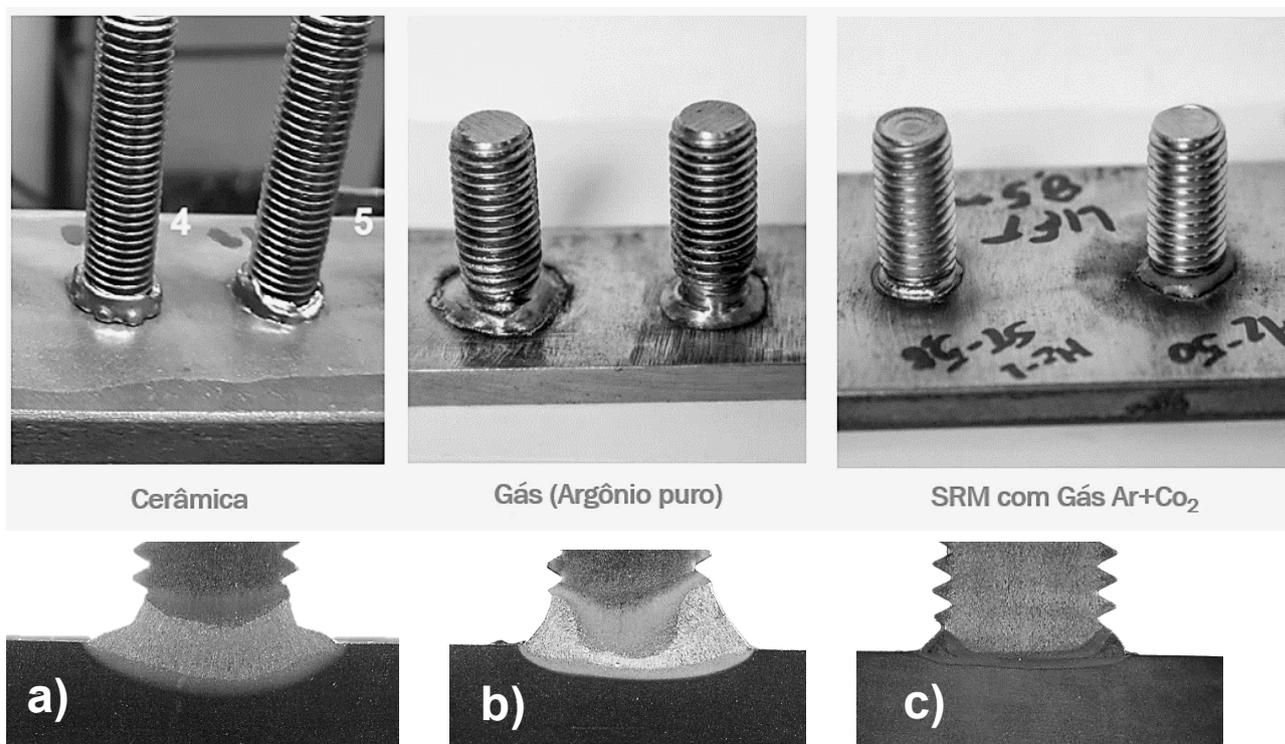
pelo nome comercial HZ-1 pela fabricante *Soyer GmbH* (SOYER GMBH, 2006). O equipamento de soldagem utilizado para esta técnica foi do fabricante Soyer, pistola PH-3N SRM (*radialsymmetrischen Magnetfeld*). Vale ressaltar que a utilização de bocais especiais que geram o campo magnético na região do pino também faz o uso de gás de proteção adicionalmente. Os parâmetros para cada tipo de solda estão elencados na Tabela 4. Na Figura 93 é possível comparar as diferenças básicas das soldas realizadas com cada modalidade do presente experimento.

Tabela 4 – Parâmetros para três técnicas distintas de soldagem de pinos

Técnica	Tempo (ms)	Corrente (A)	Protrusão (mm)	Recuo (mm)
Campo Magnético	125	700	1,5	1,5
Gás	325	850	3,0	1,5
Anel Cerâmico	325	750	2,5	2,0

Fonte: O Autor

Figura 93 – Aparência do colar de solda e macrografias com técnicas distintas de soldagem de pinos por arco retraído. a) Soldagem com anel cerâmico, b) Soldagem com gás, c) Soldagem com gás assistido por campo magnético

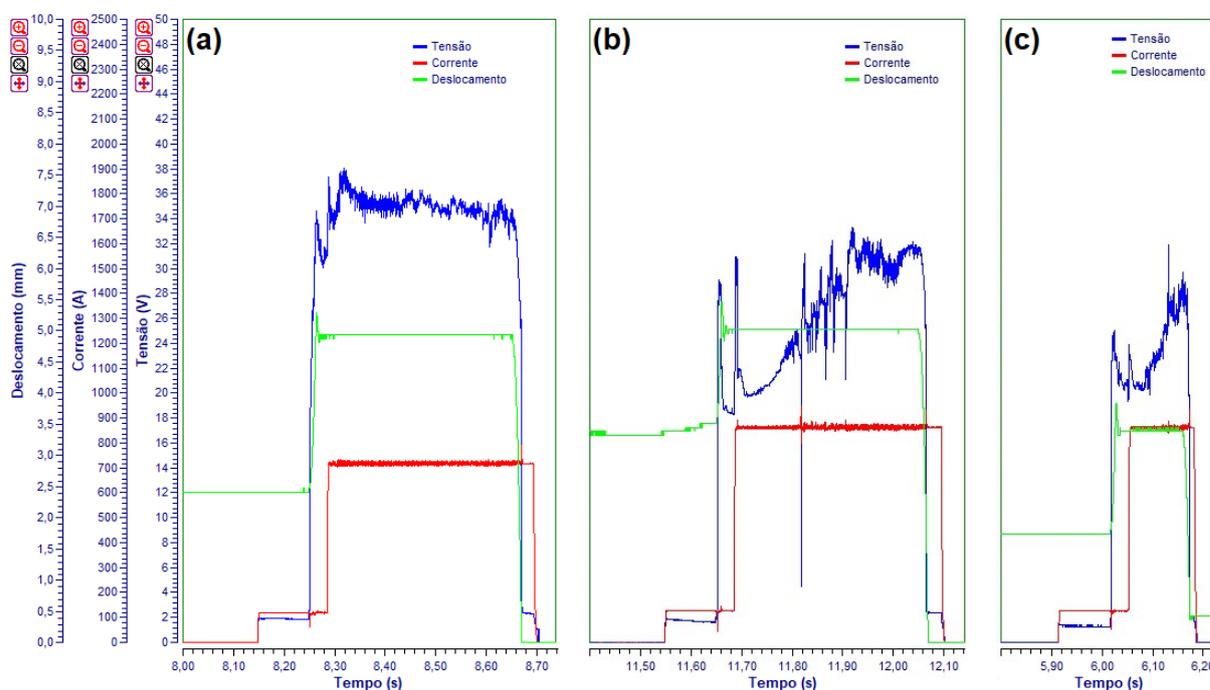


Fonte : O autor

As soldagens com as três técnicas distintas realizadas no âmbito deste trabalho evidenciam diferenças significativas entre si. Por si só, os parâmetros de soldagem para cada condição já apresentam diferenças conforme recomendações. Vale lembrar que de certa forma algumas diferenças entre a técnica com gás e anel cerâmico com os mesmos parâmetros já havia sido apresentada anteriormente. No entanto, a tecnologia com campo magnético apresentou uma ZF e ZTA substancialmente menor que as demais condições. Isso é de certa forma esperado, considerando que o tempo de soldagem diminuiu quase três vezes das outras condições com gás e com anel cerâmico. A primeira análise pode ser feita a partir dos oscilogramas obtidos nas três condições (Figura 94).

Mantendo os oscilogramas em escalas idênticas, é possível notar o reduzido tempo para a soldagem realizada com campo magnético. Considerando a (7) sobre a energia de soldagem, o tempo é uma variável diretamente proporcional à energia imposta para realizar fusão. Deste modo é evidente que a energia será mais baixa em relação aos parâmetros recomendados para outras técnicas. Além disso, embora a corrente de soldagem seja ligeiramente maior (850 A) o recuo e a protrusão recomendados são menores em relação aos demais. Com um valor de recuo reduzido, o valor de tensão é baixo, conseqüentemente o valor da potência também será menor.

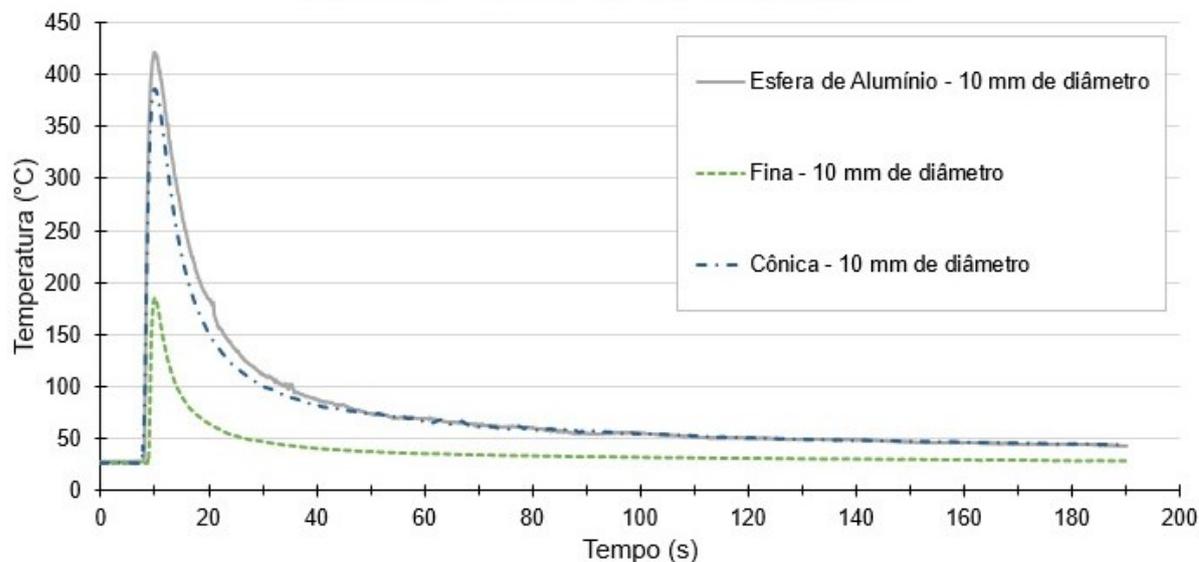
Figura 94 - Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino M10 com diferentes pontas de ignição: (a) ponta de esfera de alumínio, (b) ponta cônica e (c) ponta fina (HZ1)



Fonte: O autor

A fim de obter mais subsídios para esta análise, os resultados da Figura 94 foram acompanhados por medições de temperatura no verso da chapa, utilizando termopares tipo K. O objetivo era avaliar a eficiência de diferentes técnicas do processo *Stud Welding*. O aquecimento excessivo das peças soldadas é um tema relevante por conta dos defeitos produzidos como distorções, *burntrough* (perfuração) e efeitos metalúrgicos. Uma abordagem específica para este tema é amplamente discutida no trabalho de Marchione (2023), onde o autor apresenta resultados de uma extensa matriz de experimentos acerca do aquecimento de chapas durante a soldagem de pinos.

Figura 95 – Medição de temperatura referente aos oscilogramas da Figura 94 realizada no verso de uma chapa de aço carbono com 6,4 mm de espessura



Fonte: O autor

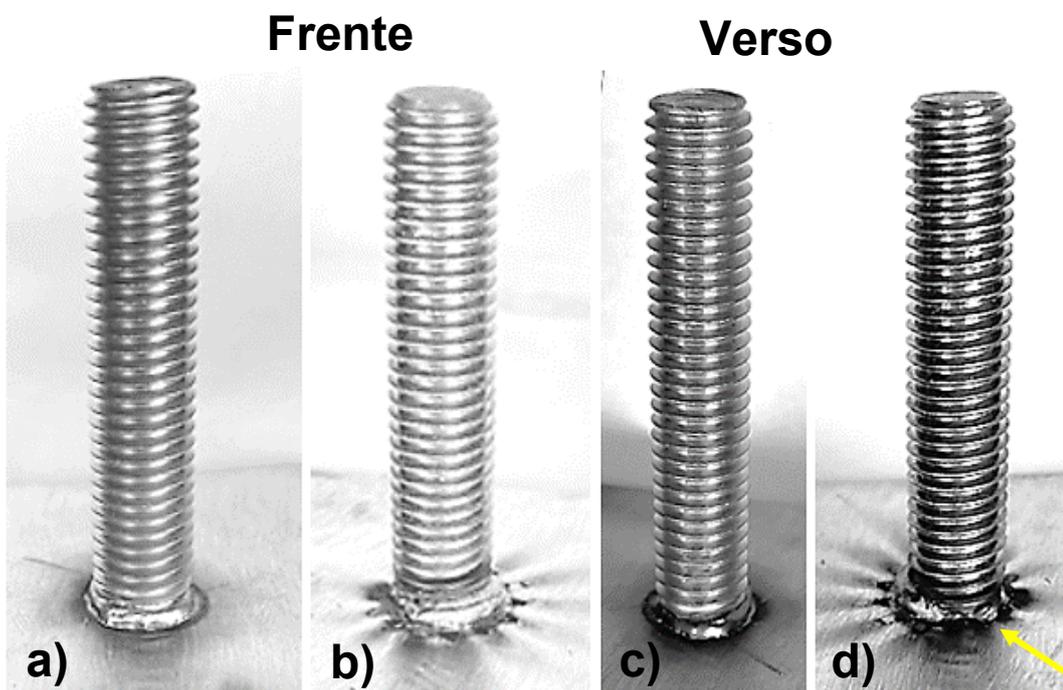
Nas condições recomendadas por fabricantes especializados em soldagem de pinos, de fato, os resultados mostram que a técnica com campo magnético possui menor potência e energia (Figura 94) e por consequência menor aporte térmico na peça (Figura 95). No entanto, não foram encontradas informações do motivo de não utilizar os mesmos parâmetros de soldagem para o método convencional (anel cerâmico). Resultados apresentados no item 5.2 deste trabalho, sugerem que é possível soldar com diferentes parâmetros o mesmo pino. Para verificar isso, foram realizadas soldagens comparativas com duas técnicas, com anel cerâmico e com a tecnologia do campo magnético em duas espessuras de chapas de aço carbono, 6,4 mm e uma chapa fina de 2 mm. Neste caso foram usados os parâmetros da soldagem com campo magnético (Tabela 4).

Após a realização das soldagens com os mesmos parâmetros para técnicas diferentes foi possível avaliar os colares de solda. A solda com o anel cerâmico usando parâmetros destinados à técnica com campo magnético, mostrou-se tão adequada quanto a outra. Na Figura 96 é possível visualizar o resultado do colar de solda produzido pelas duas versões usando os mesmos parâmetros de soldagem. Visualmente, as amostras soldadas com campo magnético evidenciam um colar menor, com dimensões próximas ao diâmetro do pino. Por outro lado, as soldas realizadas com o anel cerâmico, sem campo magnético, apresentaram um volume de colar mal distribuído no entorno do pino para os mesmos parâmetros. Além disso, é

possível perceber que em uma determinada parte do colar não há material sobressalente e no lado oposto existe material em excesso (Figura 96). Esta característica é um indicativo de que possivelmente pode ter havido sopro magnético nesta solda, onde arco funde mais uma determinada região da extremidade do pino em detrimento ao restante.

Embora o colar de solda não tenha apresentado uniformidade geométrica, a solda foi considerada aprovada seguindo critérios da norma ISO 14555, onde foi submetida por teste de dobramento e macrografia tanto para chapa fina (Figura 97) quanto para a chapa mais espessa (Figura 98). No teste de dobramento da chapa fina, a norma considera a solda aprovada mesmo quando a fratura acontece na peça, conforme observado para as duas condições em chapa fina (Figura 97).

Figura 96 – Comparativo entre versão convencional com anel cerâmico e campo magnético com gás
a) Frente da solda com campo magnético b) frente da solda com anel cerâmico, c) verso da solda com campo magnético, d) verso da solda com anel cerâmico



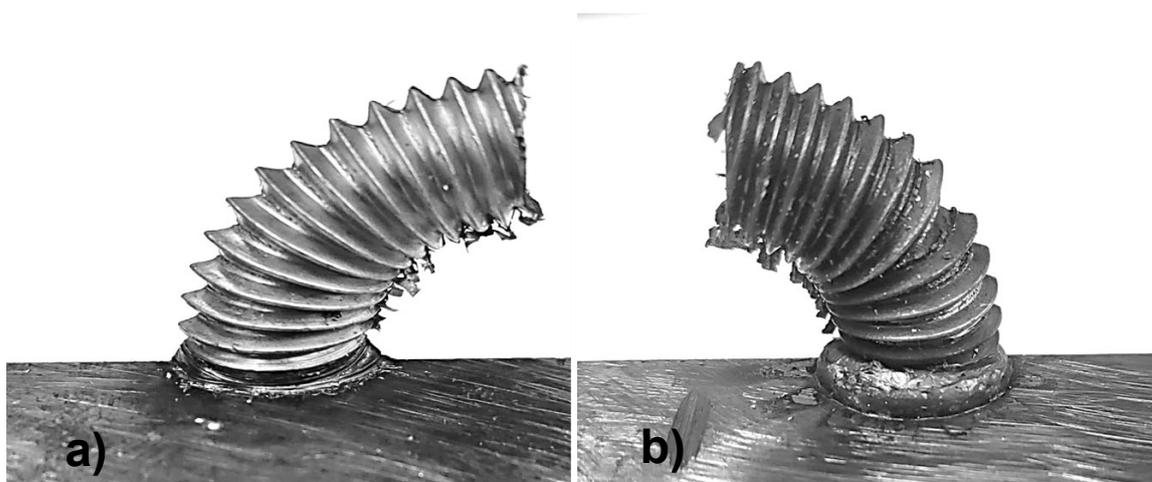
Fonte: O autor

Figura 97 – Teste de dobramento realizado em duas amostras com parâmetros idênticos e versões distintas em chapa fina de aço (2 mm). a) campo magnético com gás b) anel cerâmico



Fonte: O autor

Figura 98 - Teste de dobramento realizado em duas amostras com parâmetros idênticos e versões distintas em chapa de aço (6,4 mm). a) campo magnético com gás b) anel cerâmico

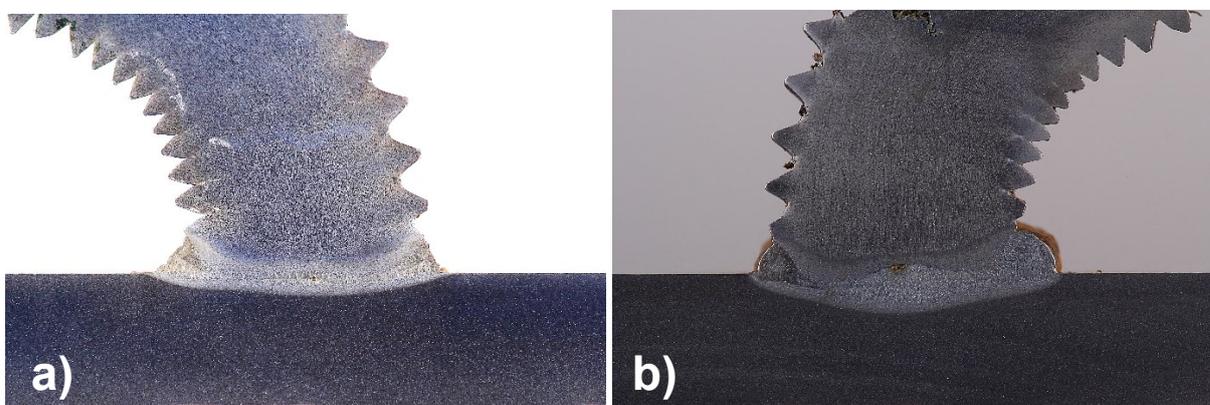


Fonte: O autor

As imagens das macrografias também evidenciam que houve uma ligeira diferença na morfologia da ZF e da ZTA entre as duas condições testadas. Na amostra

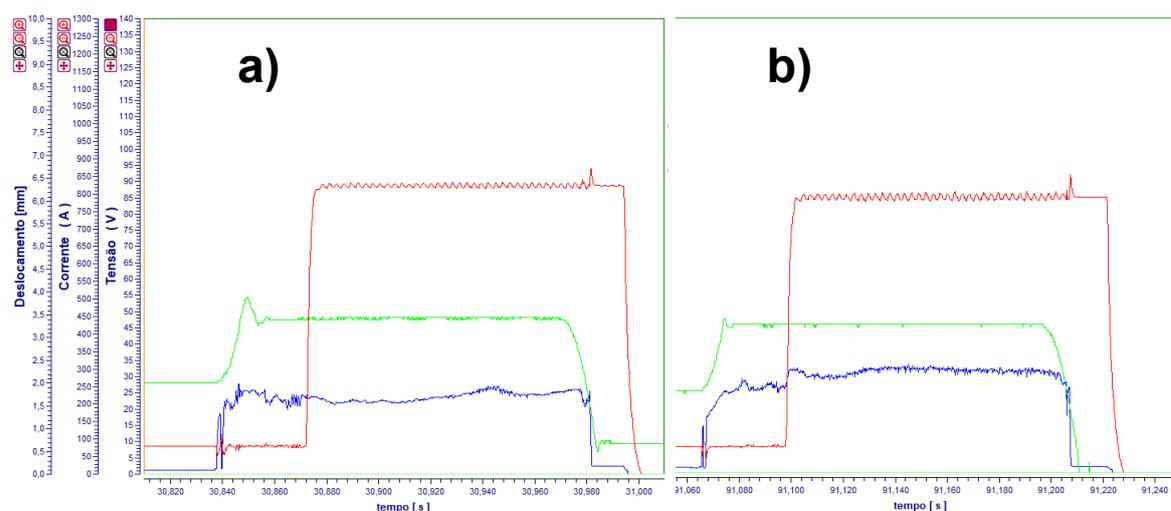
soldada com o campo magnético, estas áreas ainda se mostram menores em comparação à amostra soldada com anel cerâmico, mesmo utilizando parâmetros idênticos de soldagem. Neste caso, o que é diferente é a presença do gás de proteção que atua na diminuição do valor de tensão, consequentemente, no valor da potência. Isso também afetou a capacidade fusão dos materiais. A potência média do procedimento com campo magnético foi de 19,1 kW enquanto para a versão com anel cerâmico a potência aumentou para 24,7 kW. O aumento de potência é claramente pronunciado devido ao aumento da tensão no processo com anel cerâmico (Figura 100).

Figura 99 – Macrografias das amostras soldadas com campo magnético e anel cerâmico



Fonte: O autor

Figura 100 – Oscilogramas das duas condições testadas a) campo magnético e gás b) anel cerâmico

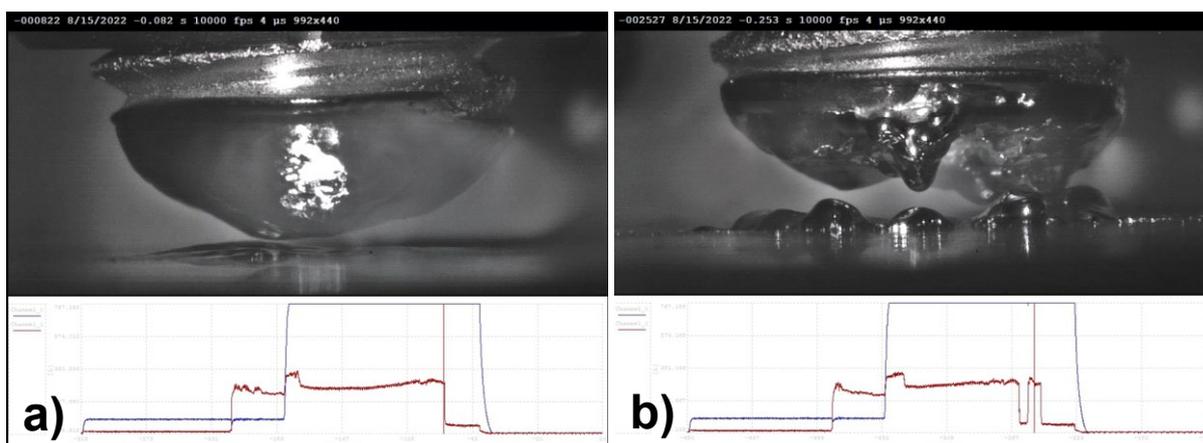


Fonte: O autor

Por meio das filmagens em alta velocidade foi possível visualizar a varredura do arco sobre a superfície do pino. Além disso, foi possível identificar curtos-circuitos

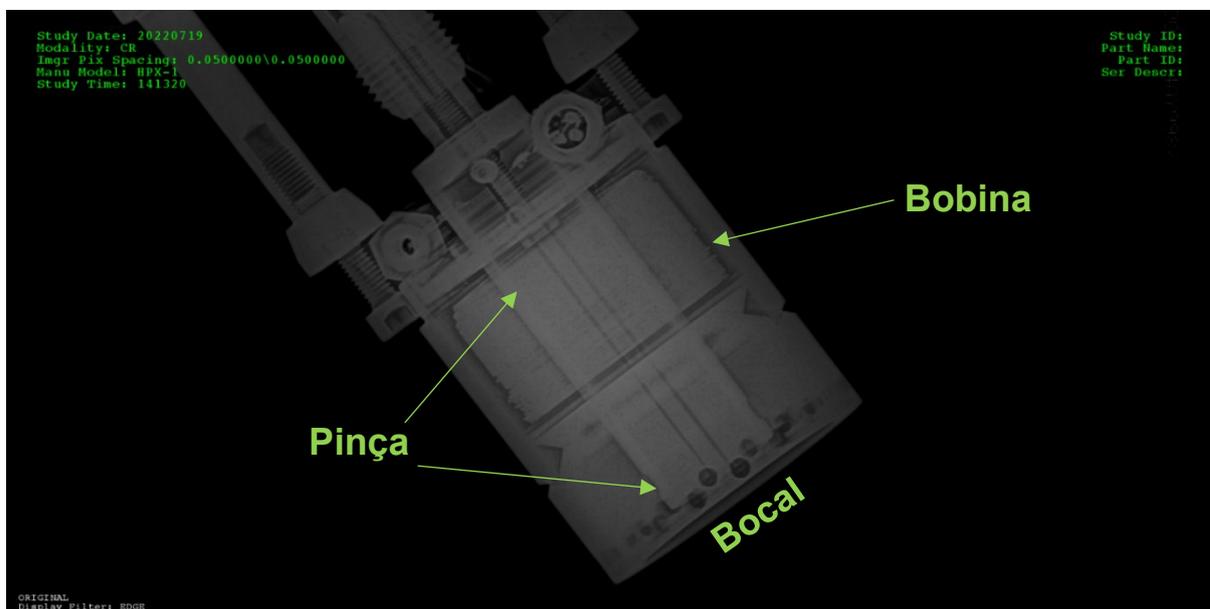
em alguns casos com a versão convencional (anel cerâmico). Esses casos são mostrados na Figura 101, onde fica evidente o curto-circuito que aconteceu na versão convencional (Figura 101b).

Figura 101 – Instantes das filmagens em alta velocidade das soldas realizadas com (a) campo magnético e (b) soldagem convencional com anel cerâmico



Fonte: O autor

Figura 102 – Radiografia realizada em bocal comercial concebido para soldagem com campo magnético e gás



Fonte: O autor

De forma simplificada, o efeito provocado pelo campo magnético nas soldas do presente trabalho pode ser explicado pela teoria do eletromagnetismo. Quando uma corrente elétrica (I) passa por um condutor, ela cria um campo magnético ao redor do condutor. No caso de uma bobina, onde o fio é enrolado em várias voltas, o campo

magnético produzido por cada volta se soma, criando um campo magnético cumulativo ao longo do eixo da bobina. No equipamento que proporciona esse tipo de soldagem a bobina fica muito próxima à região de fusão do pino (Figura 102) e o campo magnético criado por ela tem forte influência no resultado da solda. Assim, é correto afirmar que correntes mais altas na bobina geram campos magnéticos mais fortes devido ao princípio fundamental do eletromagnetismo descrito pela Lei de Ampère. Essa lei estabelece que a força do campo magnético gerado por uma corrente elétrica é diretamente proporcional à magnitude dessa corrente. A Lei de Ampère pode ser expressa na forma generalizada (12) para calcular o campo magnético dentro de uma bobina considerando a presença de um núcleo ferromagnético por:

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{NI}{L} \quad (12)$$

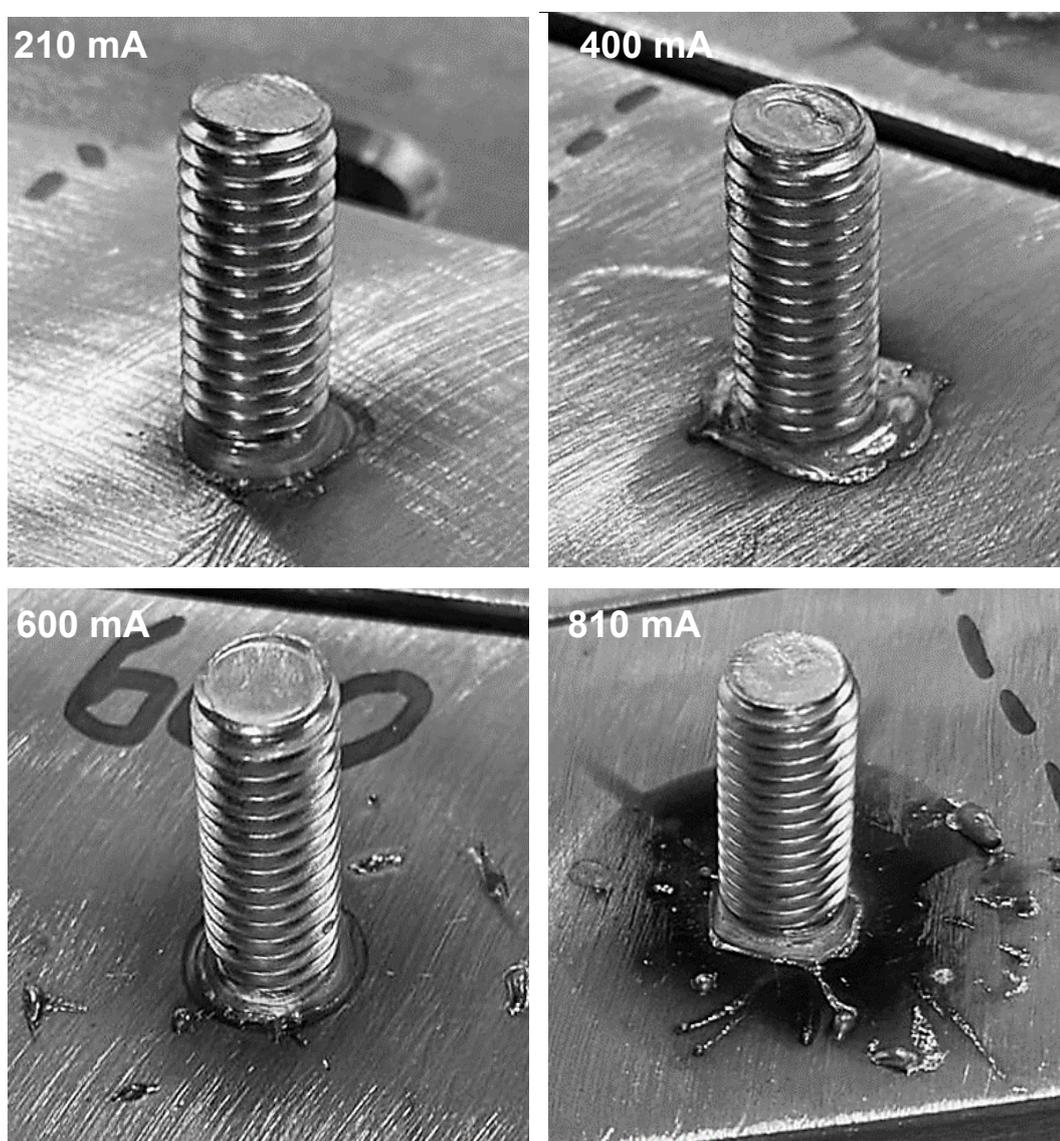
em que:

- B é a densidade do fluxo magnético (T, tesla),
- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo (H/m)
- μ_r é a permeabilidade relativa do material (adimensional),
- N é o número de voltas da bobina,
- I é a corrente elétrica passando pela bobina em amperes (A),
- L é o comprimento da bobina (m).

Além disso, o campo magnético também depende do número de voltas da bobina. No presente estudo não foi possível averiguar o número de voltas da bobina ou o diâmetro do fio do enrolamento tampouco são encontradas informações sobre isso. O que se sabe é que mais voltas resultam em um campo magnético mais forte, pois cada volta contribui adicionalmente para o campo total. A permeabilidade determina a facilidade com que o campo magnético é formado no ambiente ao redor da bobina.

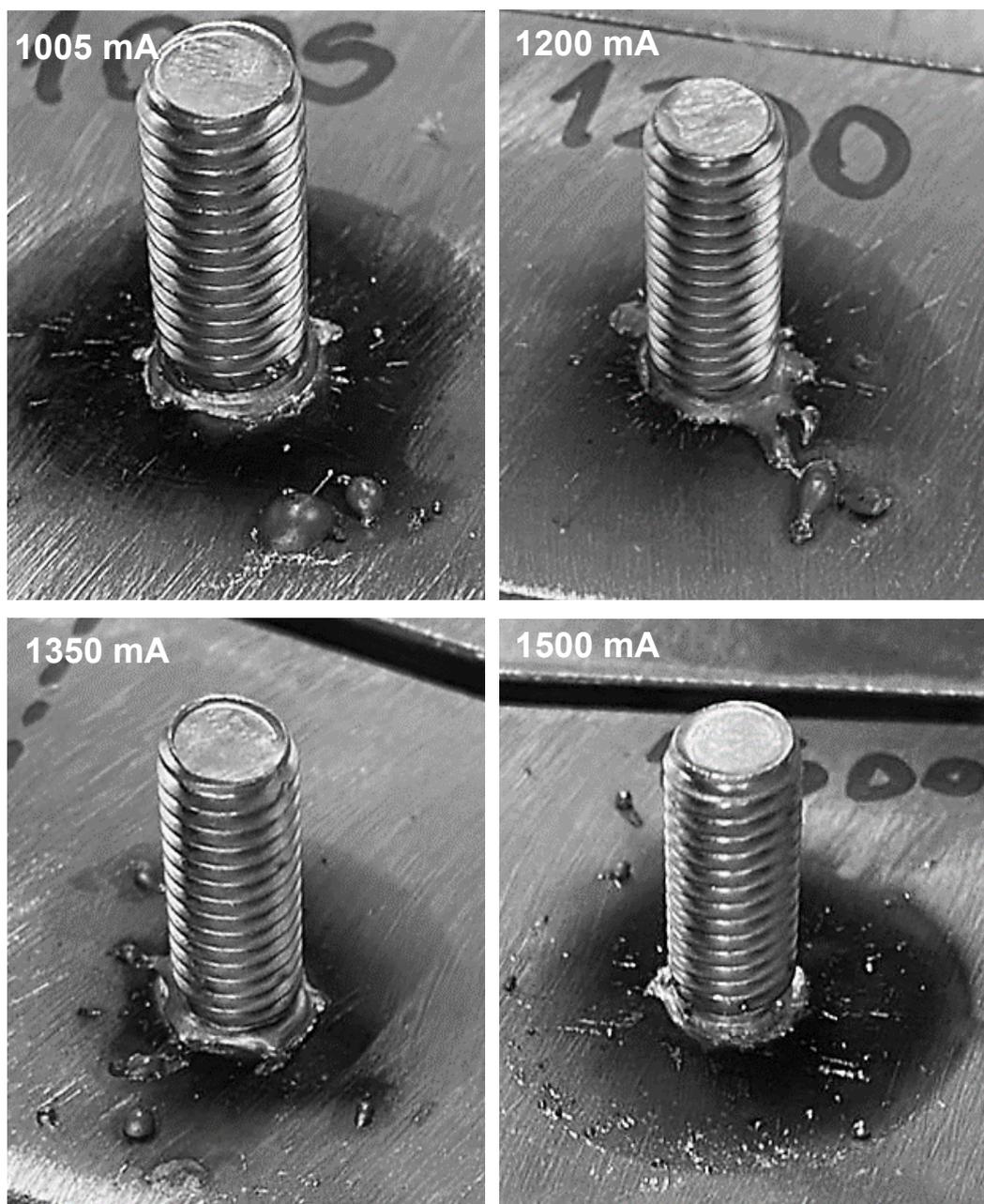
Para validar esta afirmação, foram conduzidos experimentos variando apenas o valor de corrente aplicado na bobina do bocal para o mesmo procedimento. O equipamento utilizado para estas soldas permite ajustar até 1500 mA (1,5 A) de corrente na bobina. O valor recomendado pelo fabricante para a soldagem com um pino M10, por exemplo, é de 210 ms. Este valor foi considerado como um valor de partida para os experimentos sendo os valores utilizados 210, 400, 600, 810, 1005, 1200, 1350 e 1500 mA. O resultado das soldas pode ser observado nas Figura 103 e Figura 104.

Figura 103 – Resultado das soldas realizadas variando o valor de corrente na bobina do bocal entre 210, 400, 600, 810 mA



Fonte: O autor

Figura 104 - Resultado das soldas realizadas variando o valor de corrente na bobina do bocal entre 1005, 1200, 1350 e 1500 mA



Fonte: O autor

A análise das amostras de soldagem de pinos utilizando correntes na bobina variando de 210 mA a 1500 mA, revelou diferenças significativas na aparência das soldas produzidas. Essas diferenças podem ser atribuídas diretamente à intensidade do campo magnético gerado pela corrente aplicada, que, por sua vez, afeta o comportamento do arco elétrico durante o processo de soldagem. Os resultados mostram que o campo gerado pode ser forte a ponto de lançar material da ponta do pino por meio da força centrífuga gerada (Figura 103 e Figura 104).

Com uma corrente de 210 mA, observa-se que o campo magnético ajudou a concentrar o material fundido embaixo do pino, resultando em uma solda relativamente limpa sem a presença de um colar evidente. Quando a corrente foi aumentada para 400 mA, o campo magnético tornou-se moderadamente mais forte, mas ainda insuficiente para lançar material fundido para fora da área da solda.

A corrente de 600 mA demonstrou ser a corrente onde já houve força centrífuga suficiente para soltar uma porção de material fundido da extremidade do pino. Porém, as amostras apresentaram colares de solda uniformes, com dimensão aproximada do diâmetro do pino com poucos respingos, indicando uma fusão adequada por inspeção visual. Por outro lado, à medida que a corrente aumentou para 810 mA, os resultados começaram a se deteriorar. A corrente mais alta gerou um campo magnético mais pronunciado, resultando em soldas com a presença exagerada de respingos, indicando que a corrente de 810 mA é excessiva e causa instabilidade no processo de soldagem.

Essa tendência negativa continuou com correntes ainda mais altas. A corrente de 1000, 1200, 1350 e 1500 mA por exemplo, resultaram em soldas com características peculiares como material fundido em excesso e colares de solda irregulares, o que sugere que o campo magnético gerado é demasiadamente forte, provocando desestabilização do arco. Essas correntes são claramente muito altas para serem aplicadas em pinos de diâmetros pequenos e corrente baixas para o processo, a ponto de comprometer severamente a qualidade da solda.

No caso de um arco de soldagem, as partículas carregadas (elétrons e íons) no plasma do arco são desviadas pela força de Lorentz devido ao campo magnético gerado pela corrente na bobina. Esse desvio causa uma rotação do arco, que pode ser considerada como um movimento circular das partículas carregadas. A rotação do arco, e a força centrífuga, por sua vez, fazem com que o material fundido desenvolva uma velocidade tangencial (v_t). A relação entre a força centrífuga (F_c), a rotação do arco e a velocidade tangencial (v_t) do metal fundido é fundamental para entender como o campo magnético afeta a distribuição do material durante a soldagem. A velocidade tangencial em uma partícula que se move em um círculo de raio (r) é dada pela (13:

$$vt = r\omega \quad (13)$$

em que:

- r é o raio do círculo (mm),
- ω é a velocidade angular (rad/s).

A força centrífuga resultante, que age para fora do centro do círculo, é dada pela (14):

$$F_c = \frac{mvt^2}{r} \quad (14)$$

em que:

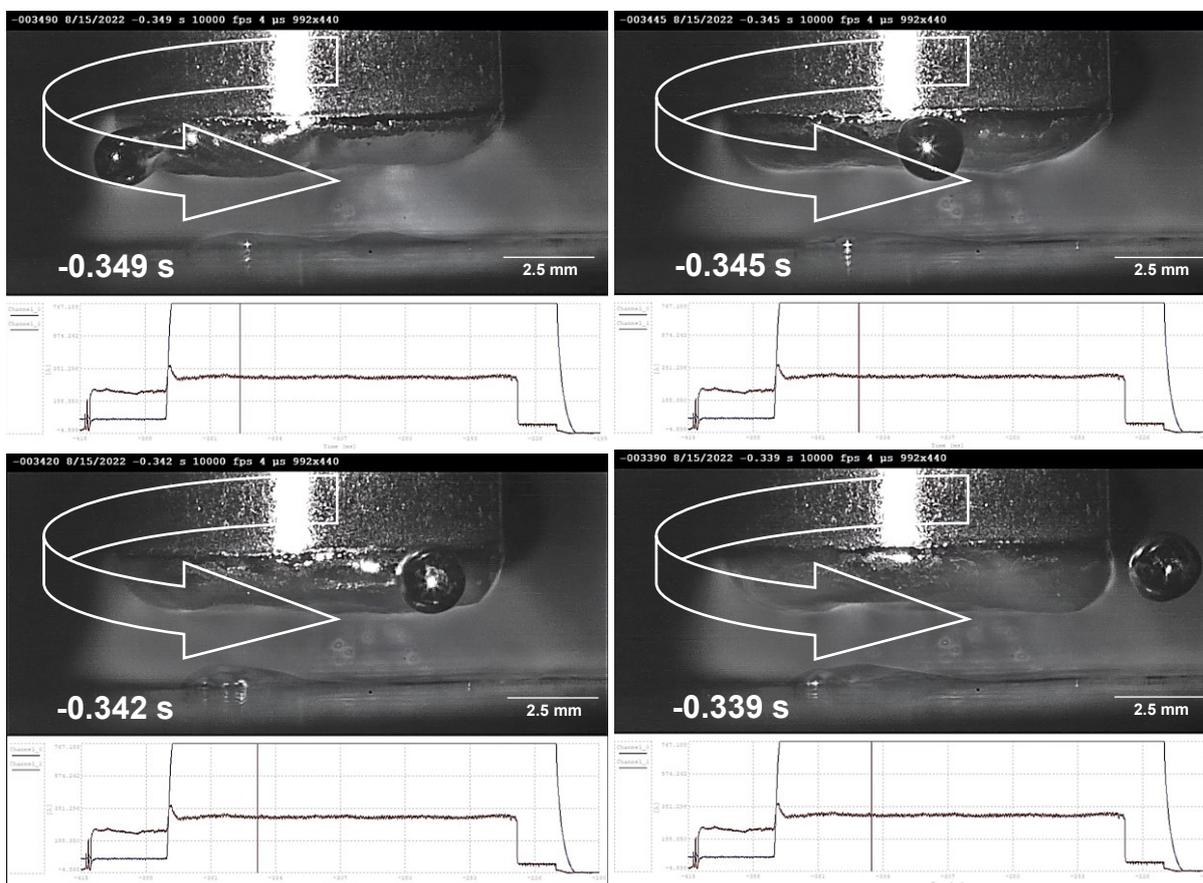
- F_c é a força centrífuga (N)
- m é a massa do objeto (kg),
- vt é a velocidade tangencial do objeto (m/s),
- r é o raio do círculo (m).

Assim, a rotação do arco devido ao campo magnético pode efetivamente "carregar" o metal fundido e lançá-lo para fora, longe do centro do arco se for suficientemente forte (Figura 105). Se a corrente aplicada na bobina não for suficientemente forte para gerar uma força que expulse o material da ponta do pino para as bordas, é possível obter uma distribuição mais uniforme do material fundido sob o pino. No presente trabalho não foi possível calcular a força exercida na região fundida, pois não se obteve algum sistema de medição adequado para estimar a massa da poça. Porém, por meio das filmagens em alta velocidade foi possível verificar a velocidade da rotação do arco.

Zhang et al. (2022) relata ainda sobre a influência de outras forças que atuam na poça de fusão. Estas incluem a força do arco (F_{arc}), a gravidade (g) e a tensão superficial (γ) da poça de fusão. A combinação dessas forças resulta na expansão da poça de fusão sob a influência do campo magnético. Na Figura 105 é possível visualizar nitidamente a ejeção de material fundido (respingo) gerado pela força

centrífuga do processo. A seta inserida na figura serve para mostrar a trajetória da gota de metal líquido e o sentido da força gerada pelo campo magnético.

Figura 105 – Representação do metal fundido sendo lançado da ponta do pino pela força centrífuga do campo gerado



Fonte: O autor

5.7 CARACTERIZAÇÕES DE ASPECTO METALÚRGICO

A soldagem de pinos por arco retraído (ou *Drawn Arc Stud Welding*) é uma técnica aplicada na construção de estruturas metálicas, como já destacado no presente estudo em itens anteriores. É importante ressaltar de antemão que, diferentemente da característica metalúrgica de um cordão de solda realizado por um processo a arco como o MIG/MAG ou TIG, em SW existe uma característica peculiar. Por se tratar de um processo onde se tem um pino como material de adição e eletrodo ao mesmo tempo que não tem a sua estrutura totalmente fundida, e sim apenas a ponta, este processo pode ser denominado como eletrodo “semi-consumível”. Além disso, como existe fusão parcial nos dois elementos envolvidos na soldagem (interface pino/peça), neste caso, existem duas regiões afetadas pelo calor na mesma solda, uma na peça e outra no corpo do pino.

Brätz e Henkel (2023) apresentam um estudo metalúrgico da solda realizada por SW por meio de uma análise quantitativa da microestrutura das soldas de pinos em aços estruturais, utilizando métodos de metalografia quantitativa para compreender as propriedades resultantes das regiões soldadas. O estudo utilizou pinos de aço de baixo carbono de 20 mm de diâmetro soldados em placas de aço estrutural genérico, abrangendo desde aços não ligados e normalizados até aços micro-ligados e temperados.

As análises revelaram que a microestrutura da ZF é predominantemente composta por ferrita com fases secundárias, como a ferrita de *Widmanstätten* (WF) e a bainita superior (UB), independentemente da composição do material de base. Essa consistência na microestrutura sugere que o processo SW promove uma fusão homogênea entre o pino e a peça base. Além disso, a microestrutura da ZTA mostrou-se fortemente dependente da composição do material de base. Aços com maior teor de carbono equivalente (CE) apresentaram transformações martensíticas extensas na ZTA, resultando em alta dureza e potencial fragilidade. Em contraste, aços micro-ligados com menores CE demonstraram menor endurecimento e melhor resistência à formação de martensita (BRÄTZ et al., 2019).

Nesse contexto, o presente estudo realizou uma análise de soldas realizada com *Stud Welding* por arco retraído (*Drawn Arc*), em que um pino de 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento, composto de aço baixo carbono (1020) e revestido com níquel, foi soldado a uma peça de aço naval de 12,7 mm de espessura. Para

compreender o comportamento metalúrgico da solda, foram realizadas micrografias, com ampliação de 500X em microscópio ótico, de diversas regiões da junta soldada (Figura 106). As regiões analisadas incluem o Metal do Pino (MB Pino), a Zona Termicamente Afetada de Grão Fino do Pino (ZTA GF Pino), a Zona Termicamente Afetada de Grão Grosso do Pino (ZTA GG Pino), a Zona Fundida (ZF), a Zona Termicamente Afetada de Grão Grosseiro da Peça (ZTA GG Peça), a Zona Termicamente Afetada de Grão Fino da Peça (ZTA GF Peça) e o Metal da Peça (MB Peça) (Figura 106).

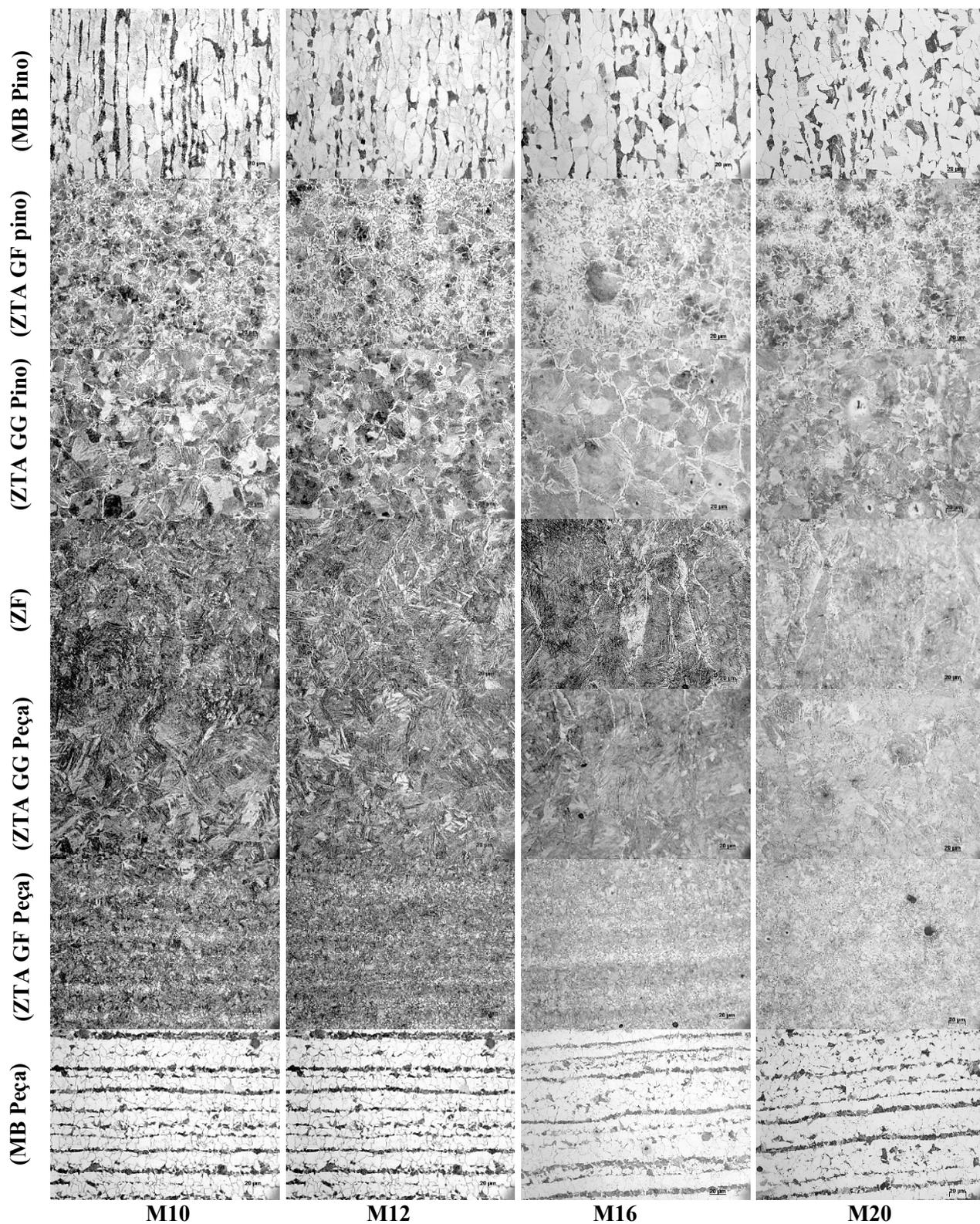
No metal do pino (MB Pino) a micrografia mostra um padrão de grãos típicos de aços de baixo carbono, que são finos e homogêneos, devido ao tratamento térmico ou à laminação a frio. Na ZTA do pino, a região de grão fino (GF) é afetada pelo calor da soldagem, mas não atinge temperaturas suficientes para causar o crescimento significativo dos grãos. A presença de grãos finos na solda sugere que a zona foi submetida a uma taxa de resfriamento rápida. Na ZTA GG Pino, a microestrutura exibe grãos maiores devido à exposição a temperaturas elevadas durante o processo de soldagem. O crescimento dos grãos pode diminuir a resistência mecânica e a dureza, tornando esta região potencialmente mais suscetível a falhas sob tensão mecânica. A análise desta zona é importante para prever possíveis pontos de fragilidade na solda. A zona fundida (ZF) é a região onde ocorreu a fusão completa dos materiais do pino e da peça. A microestrutura nesta zona é tipicamente composta por dendritas ou uma mistura de fases, resultantes da solidificação do metal fundido. A ZF é a região que mais sofre transformações metalúrgicas, sendo essencial para a formação da junta soldada. A composição química e a taxa de resfriamento durante a solidificação influenciam a microestrutura final, afetando diretamente as propriedades mecânicas e a resistência da solda.

Pelo lado da peça, tem-se as mesmas regiões anteriores. Semelhante à ZTA GG Pino, a ZTA GG Peça apresenta grãos aumentados devido ao calor da soldagem. Esta área na peça também é crítica, pois pode representar uma zona de menor resistência. A ZTA GF Peça mostra grãos refinados, indicando uma rápida taxa de resfriamento nesta zona da peça. A presença de grãos finos sugere que esta região pode ter melhores propriedades mecânicas em comparação com a ZTA de grão grosso. Por fim, o MB Peça representa a estrutura original do aço antes da soldagem. A micrografia mostra uma estrutura de grãos típica de um aço laminado com grãos alongados e possivelmente tratado termicamente.

Adicionalmente, foi medido o comportamento da dureza nas zonas fundidas de soldas realizadas entre diferentes combinações de materiais, utilizando pinos de aço inoxidável austenítico e aço carbono em chapas de aço inoxidável austenítico 304. Para ilustrar essas variações, foram obtidos perfis de dureza nos pinos, zonas fundidas e chapas (material de base). Os resultados indicam comportamentos distintos entre soldas com materiais semelhantes (pino e chapa de aço inoxidável austenítico) e soldas dissimilares (pino de aço carbono e chapa de aço inoxidável austenítico).

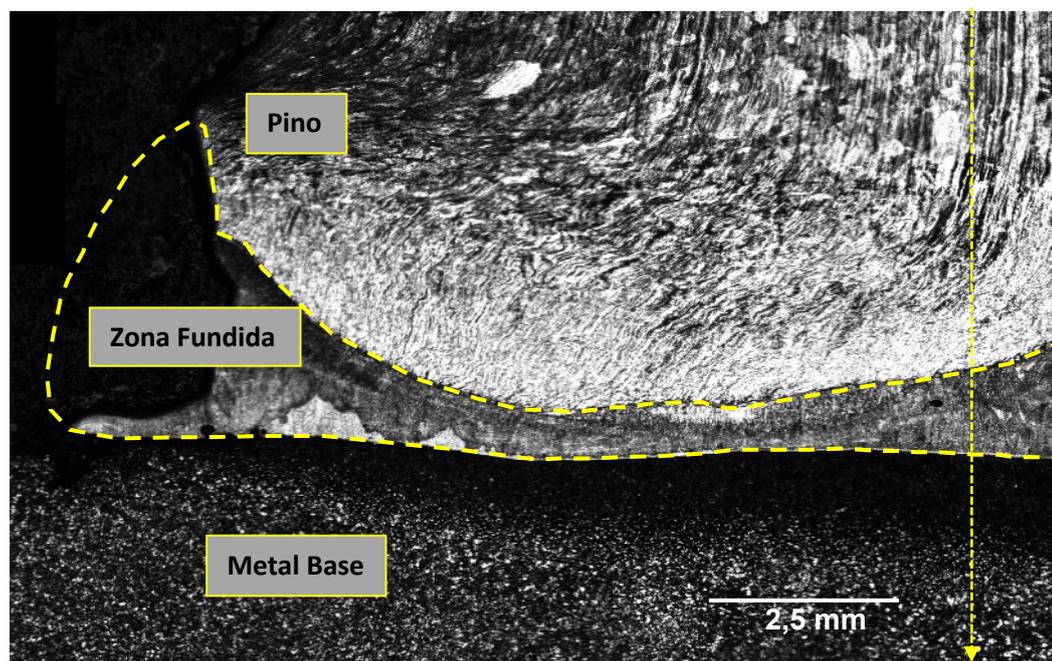
Na Figura 109, que apresenta o perfil de dureza para a solda dissimilar, realizada com um pino de aço carbono classe 5.8 e uma chapa de aço inoxidável 304, nota-se um comportamento típico na zona fundida. Houve um aumento significativo na dureza, atingindo valores de 400 HV. Normalmente, esse aumento se deve à formação de fases mais duras, como a martensita, que se formam durante o resfriamento da solda. A diferença na composição química entre o aço carbono e o aço inoxidável austenítico promove transformações de fase que resultam em uma microestrutura mais dura na zona fundida. Essas transformações são típicas em soldagens dissimilares, onde a mistura de materiais com diferentes composições provoca o surgimento de estruturas mais duras na área de fusão ou pode estar relacionada com a formação de compostos secundários do tipo carbonetos de cromo.

Figura 106 – Micrografia da região soldada por SW a arco retraído para diferentes diâmetros de pinos de aço baixo carbono revestido com níquel



Fonte: O autor

Figura 107 – Perfil de dureza para solda realizada com pino M10 de aço carbono classe 5.8, em chapa de aço inoxidável 304

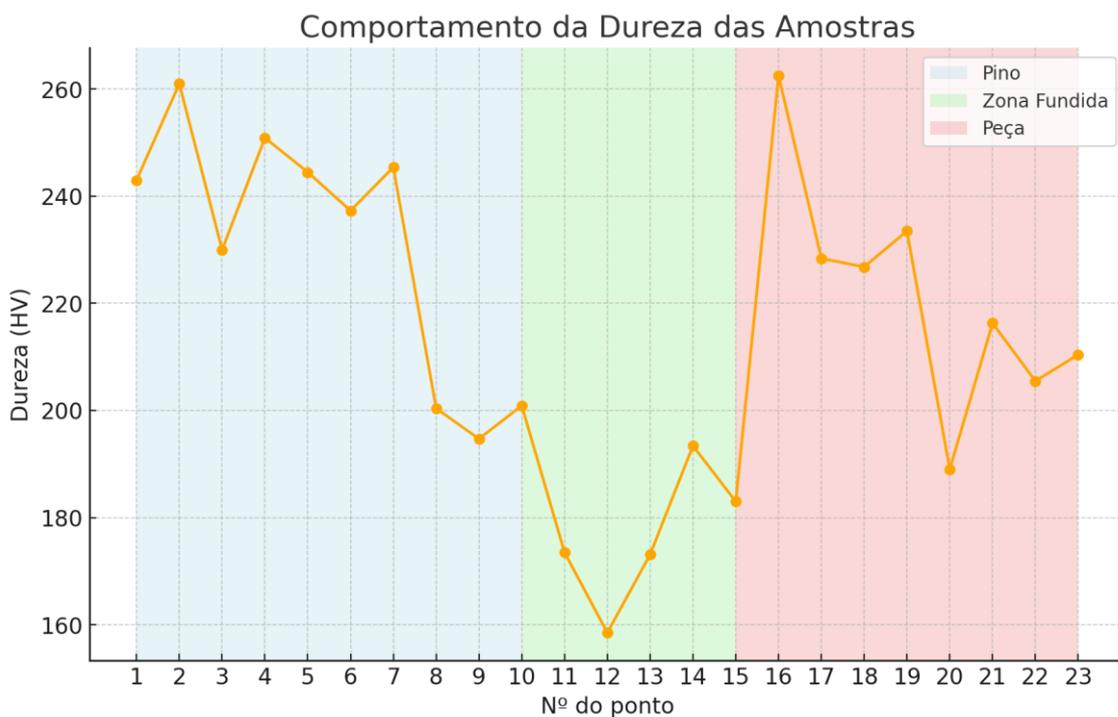
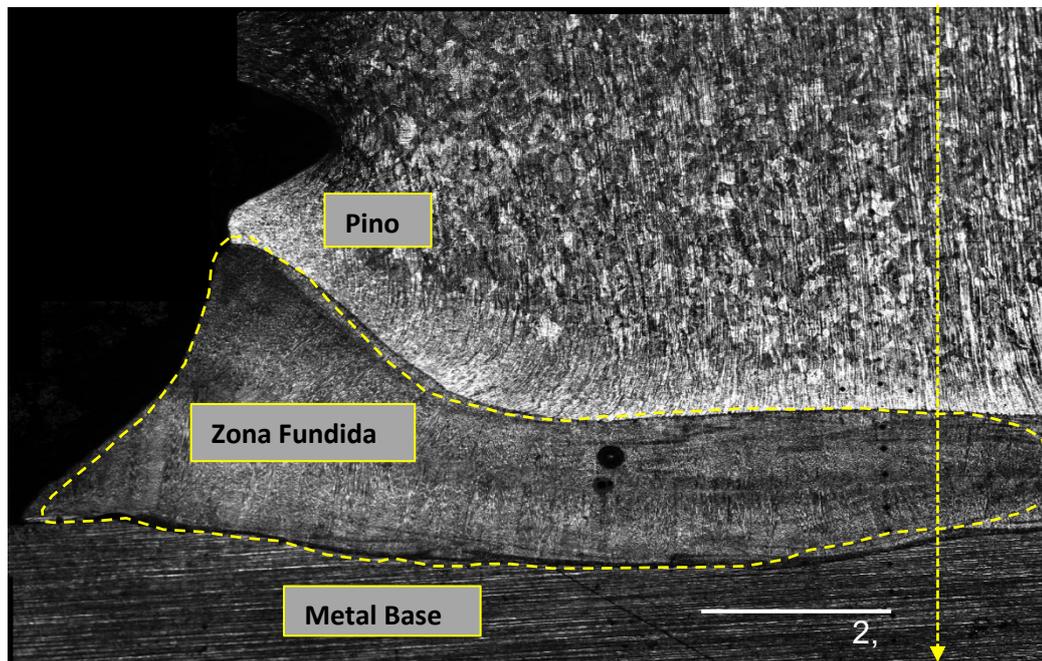


Fonte: O autor

Por outro lado, na Figura 108, que apresenta o perfil de dureza para a solda entre um pino de aço inoxidável austenítico (A2-50) e uma chapa de aço inoxidável 304, observa-se uma tendência clara de diminuição da dureza na zona fundida. Isso pode ser explicado pela recristalização e perda do encruamento que ocorre durante o processo de fusão. Os materiais inoxidáveis austeníticos, submetidos à laminação a

frio, adquirem dureza devido ao encruamento. Entretanto, durante a soldagem, a zona fundida atinge temperaturas suficientemente elevadas para eliminar esse encruamento, resultando em uma microestrutura bruta de fusão, o que justifica a redução da dureza observada. Além disso, os aços inoxidáveis têm baixa condutividade térmica, devido ao maior teor de elementos de liga (impurezas). Assim, a zona fundida, e suas imediações, ficaram mais tempos mantidas a altas temperaturas. Isso produziu, provavelmente, o crescimento de grão e relaxação da tensão residual, diminuindo localmente a dureza. Nos pontos de medição entre o pino e a chapa, a dureza média na zona fundida foi consideravelmente inferior em comparação às áreas não afetadas pelo calor.

Figura 108 - Perfil de dureza para solda realizada com pino M10 de aço inoxidável classe A2-50, em chapa de aço inoxidável 304



Fonte: O autor

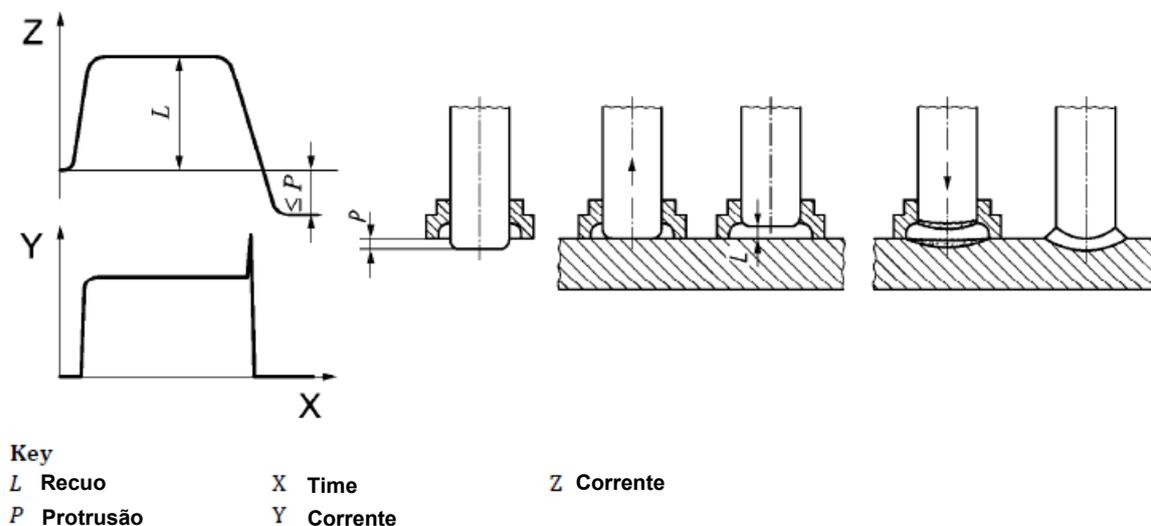
5.8 CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DO PINO

O estudo e a caracterização do movimento do pino são relevantes sob o ponto de vista prático da soldagem de pinos. Controlar o movimento durante a soldagem é fundamental para garantir o adequado resultado da solda.

Um dos principais aspectos a serem considerados é o controle da penetração, pois o movimento do pino tem um impacto direto na profundidade de penetração alcançada. Um movimento cuidadosamente controlado permite que o pino atinja a profundidade desejada, evitando uma penetração excessiva ou insuficiente desde que respeitados o equilíbrio da energia imposta. Além disso, o movimento do pino também afeta a formação do colar de solda, que é a região de material solidificado ao redor do pino. O estudo do movimento do pino também desempenha um papel importante na minimização de defeitos. Um movimento irregular ou descontrolado pode resultar em descontinuidades na solda, como porosidade ou falta de fusão. Assim, ao compreender e caracterizar o movimento do pino (Figura 109), é possível identificar e corrigir problemas potenciais, garantindo soldas livres de defeitos.

A norma ISO 14555 exemplifica defeitos de solda que podem ser evitados com ajustes realizados no movimento do pino como velocidade de descida (mergulho) e amortecimento. Defeitos como *cold plunge*, colares extremamente reduzidos ou soldas com diâmetros menores que o pino, podem ser oriundos de uma movimentação inadequada do pino até a peça.

Figura 109 – Caracterização do movimento do pino representado na norma ISO 14555



Fonte: O autor

Neste processo de soldagem a arco, diversas tecnologias são empregadas para mover o pino de soldagem de forma controlada. Entre as principais tecnologias utilizadas, destacam-se a movimentação puramente uma contração de uma mola específica, por eletroímã, motores lineares e motores de passo.

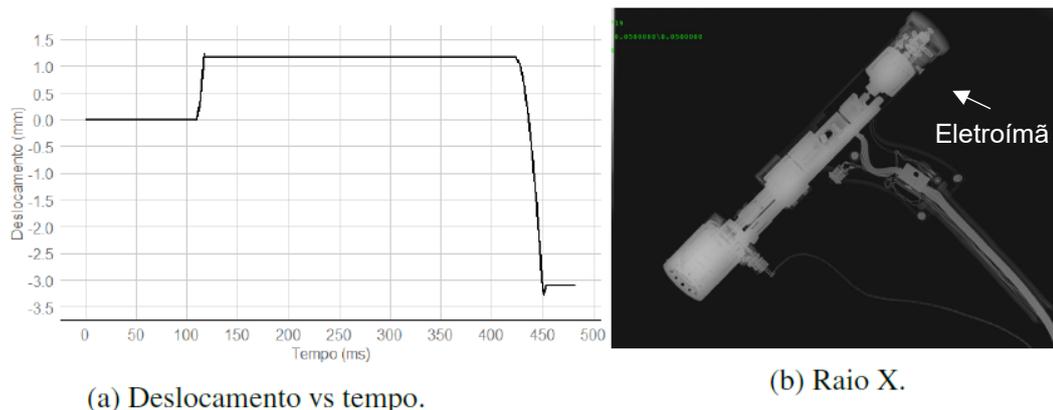
Nesta etapa do trabalho, foram coletados dados de movimento dos principais mecanismos de pistolas comerciais disponíveis no âmbito da pesquisa com parâmetros de soldagem recomendados por fabricantes. Buscou-se caracterizar e classificar as etapas do movimento e dissertar sobre o tema. As análises dos dados de movimento foram realizadas por processos de soldagem com diferentes pistolas comerciais de SW, utilizando sensores de deslocamento linear para registrar as curvas de deslocamento do pino. A análise desses dados busca compreender as etapas da dinâmica durante o processo de soldagem, assim como a influência desses parâmetros no comportamento elétrico. Conforme visto em itens anteriores do presente trabalho, os parâmetros como tempo e distância de deslocamento, influenciam diretamente no resultado da solda.

Como resultados obtidos foram identificados e caracterizados dois principais grupos de mecanismos empregados por empresas no desenvolvimento de pistolas para soldagem de pinos para arco retraído, com e sem controle. Esses grupos incluem: mecanismo acionado por eletroímã e mola, com e sem amortecimento, e mecanismo acionado por um motor. O eletroímã com mola pode ser considerado a

tecnologia mais tradicional e simples para mover o pino na soldagem de pinos. Diversos fabricantes utilizam esse mecanismo para movimentar o pino na soldagem por arco retraído. Basicamente este sistema é composto por um eletroímã com retorno por mola e é um dispositivo que utiliza um campo magnético temporário para realizar tarefas específicas, como abrir ou fechar uma porta, liberar um mecanismo de travamento, entre outros. Neste caso, este mecanismo é utilizado para realizar o recuo do pino, a uma distância predeterminada, limitado por um batente superior mecânico no interior da pistola, regulado a partir de algumas voltas em um manípulo de ajuste de recuo (ver F). O sistema é composto por uma bobina um núcleo de ferro e uma mola de retorno. Quando uma corrente elétrica é enviada através da bobina, ela cria um campo magnético ao redor do núcleo de ferro. Esse campo magnético é forte o suficiente para atrair ou empurrar o pino ou o mecanismo que está solidário ao eixo. Enquanto a corrente elétrica continua a fluir pela bobina, o campo magnético é mantido ativo, mantendo o pino na posição desejada (valor de recuo regulado). Quando a corrente elétrica é interrompida, o campo magnético é desativado. A mola de retorno entra em ação, empurrando o pino de volta à posição inicial de encontro à peça. Devido à fusão parcial da ponta do pino, a limitação física inicial se perde e o pino consegue avançar além da posição inicial. Este avanço representa o valor de penetração ou contribui para a formação do colar de solda (ver Figura 109).

Embora seja uma solução eficaz, não existe controle eletrônico em nenhuma das etapas do movimento do pino, sendo totalmente dependente da característica da mola. O comportamento padrão do deslocamento do pino com este tipo de mecanismo pode ser observado na Figura 110a. Neste caso, o valor da protrusão regulado foi de 3 mm e de, aproximadamente, 1 mm de recuo. A velocidade de descida do pino é um parâmetro importante na soldagem de pinos. Conforme as normas técnicas de *Stud Welding* e a literatura especializada, o pino de soldagem deve experimentar velocidades médias de 200 mm/s. Este parâmetro foi medido em todos os testes realizados com os dois modelos de mecanismos de movimento do pino, sendo levantada a informação de velocidade média e seu desvio padrão. No teste da Figura 110 o pino atinge a velocidade média de descida de 189 mm/s, com um desvio padrão de 26 mm/s. Esta velocidade está condizente com o recomendado, porém, para pinos acima de 14 mm de diâmetro essa velocidade deve ser sempre menor que 200 mm/s (ISO, 2014).

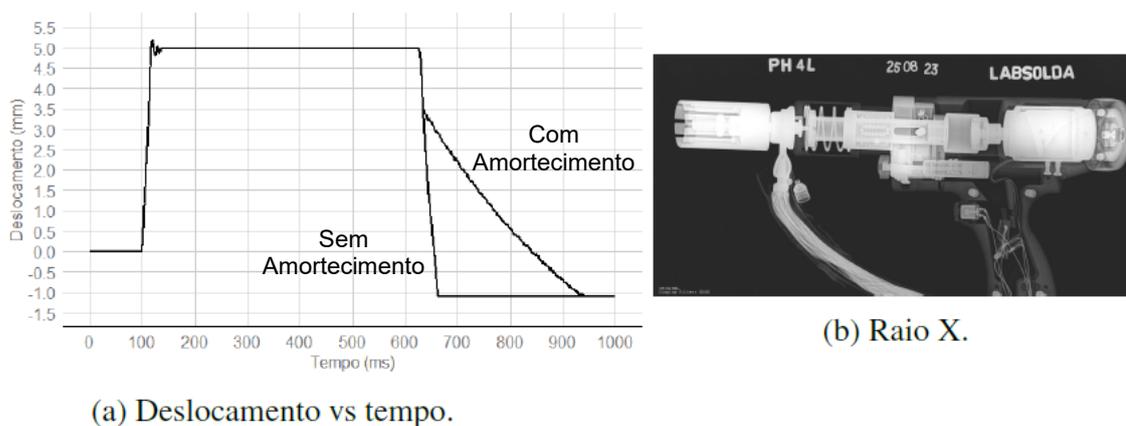
Figura 110 – Representação da tecnologia com eletroímã e mola para movimentação do pino



Fonte: O autor

Para pinos de elevado diâmetro, utiliza-se a combinação de solenóide e mola com um sistema mecânico de amortecimento. Neste caso, acontece a introdução de um amortecedor na segunda etapa do movimento de descida, permitindo o controle da velocidade. Nessa configuração, a mola proporciona um movimento mais suave e controlado do pino, enquanto o amortecimento reduz as oscilações e vibrações após o contato com a superfície de soldagem. Essa tecnologia é especialmente importante para evitar respingos excessivos e garantir a formação adequada do colar. A velocidade média medida ficou entre 170 mm/s (velocidade inicial) e 19 mm/s durante a fase de amortecimento até tocar a peça.

Figura 111 - Representação da tecnologia com eletroímã e mola para movimentação do pino com amortecimento



Fonte: O autor

O amortecimento da descida do pino de elevado diâmetro por Arco Retraído é fundamental para evitar a possível formação de defeitos. Além dos problemas mencionados anteriormente, a falta de amortecimento adequado na descida do pino de elevado diâmetro também pode resultar em respingos excessivos e vazamento de material líquido pelas bordas do anel cerâmico. Essas questões estão intimamente relacionadas ao conceito de "Quantidade de Movimento". A quantidade de movimento, também conhecida como momento linear, é uma grandeza física vetorial que descreve o movimento de um objeto. É definida como o produto da massa do objeto pela sua velocidade. A fórmula para calcular a quantidade de movimento (\vec{Q}) é:

$$\vec{Q} = m\vec{v} \quad (15)$$

em que:

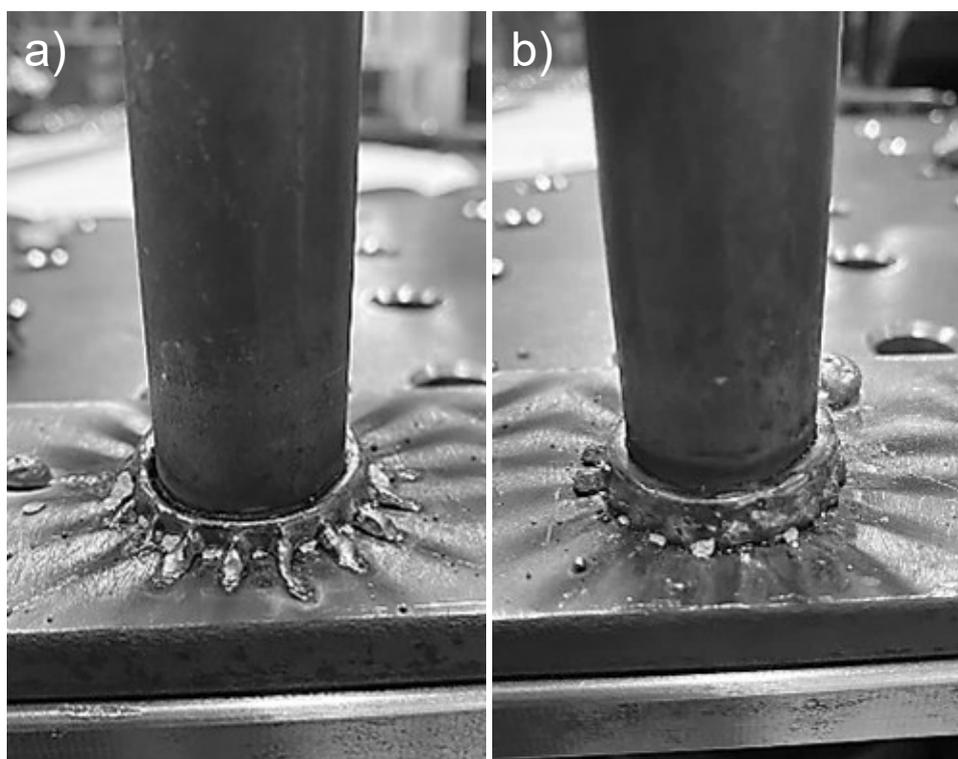
- \vec{Q} : é a quantidade de movimento (kg·m/s) ,
- m : é a massa do objeto (kg),
- \vec{v} : é a velocidade do objeto (m/s).

Essa fórmula mostra que a quantidade de movimento é diretamente proporcional tanto à massa do objeto quanto à sua velocidade. Quando aplicada de forma simplificada à soldagem de pinos, é possível entender como o amortecimento adequado afeta a quantidade de movimento do pino de solda e do material fundido.

Quando o pino desce sem o devido amortecimento, ele tende a colidir com a superfície da peça de forma brusca e com maior velocidade. Essa colisão repentina resulta em uma variação rápida da quantidade de movimento do pino, levando ao surgimento de forças de reação significativas. Essas forças de reação causam respingos excessivos, já que a energia cinética do pino é transferida para as gotículas de material fundido, que são ejetadas violentamente. Esses respingos podem comprometer a qualidade da solda, causando porosidade, inclusões e descontinuidades indesejadas, pois o material que deveria estar efetivamente na região da solda é perdido por respingos. Além disso, a falta de amortecimento adequado dependendo dos parâmetros utilizados, sobretudo, a protrusão se for excessiva, também pode levar ao extravasamento de material líquido pelas bordas ou

até mesmo pela abertura superior do anel cerâmico utilizado. O anel cerâmico tem a função de conter o material fundido e fornecer uma guia para o pino de solda. No entanto, quando o pino desce com muita velocidade e sem amortecimento, pode ocorrer uma pressão excessiva sobre a poça de fusão, resultando em vazamentos. Uma comparação para um pino de 19 mm de aço carbono pode ser observada na Figura 112.

Figura 112 - Comparação do resultado típico de formação do colar a) sem amortecimento b) com amortecimento



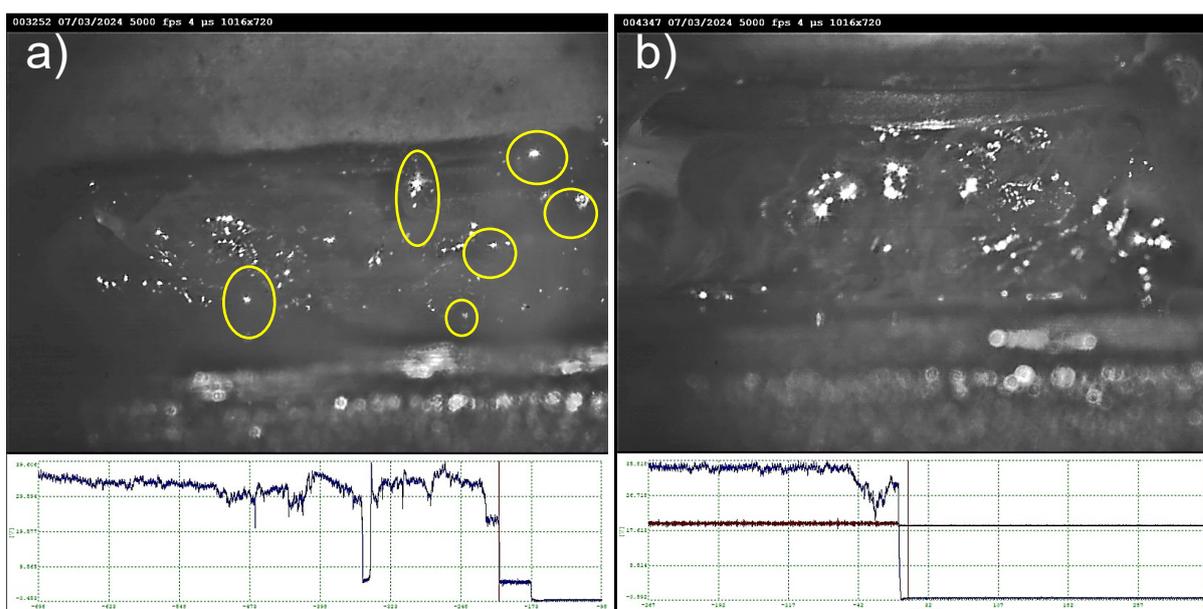
Fonte: O autor

Apesar de cada colar formado apresentar resultados distintos, como a altura maior para o caso do amortecido, nesse experimento a ZF e ZTA não apresentam diferenças significativas em sua forma. No entanto, durante a soldagem da amostra sem amortecimento foi possível observar respingos durante o procedimento causados principalmente pelo contato acelerado do pino na poça de fusão. A figura retirada da filmagem em alta velocidade para cada caso, tenta representar os respingos circulares provocados pelo impacto do pino na poça de fusão.

Embora o amortecimento seja uma ferramenta adicional eficaz para reduzir respingos, a desaceleração do movimento de uma velocidade máxima para uma velocidade relativamente menor (conforme ilustrado na Figura 111) pode, em alguns

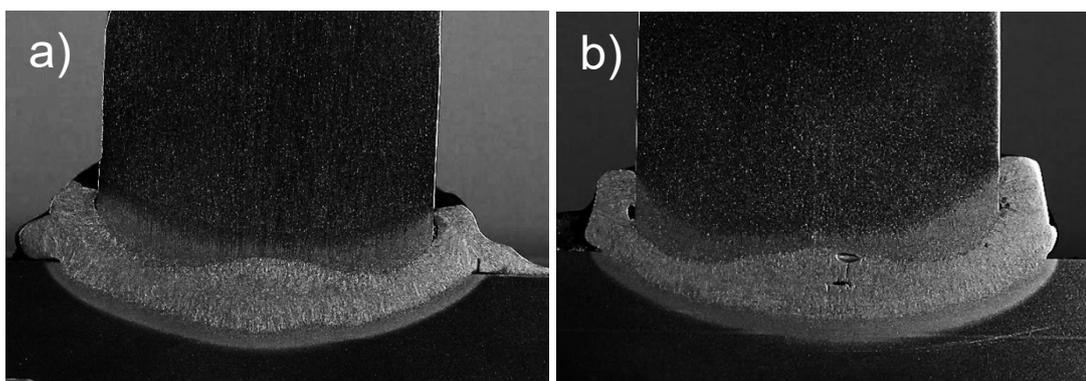
casos, gerar instabilidades no processo. Na Figura 113, o oscilograma localizado abaixo da imagem do pino evidencia um ligeiro decréscimo no sinal de tensão antes da finalização do processo. Esse fenômeno ocorre porque a poça de fusão do pino é projetada contra a peça, e ao desacelerar o pino, o metal fundido permanece em movimento. Nesse momento, o comprimento do arco é suficientemente curto para que o metal fundido do pino entre em contato com a poça de fusão da peça, e somente após esse contato o pino começa a experimentar o amortecimento de forma efetiva. Esse contato prematuro pode causar curtos-circuitos iniciais e, a partir daí, desestabilizar o arco. Contudo, nessa fase do processo de soldagem, o procedimento já está quase concluído, não afetando significativamente o resultado final.

Figura 113 – Comparação do movimento do pino a) sem amortecimento, evidenciando os respingos gerados e b) com amortecimento



Fonte: O autor

Figura 114 - Comparação das macrografias a) sem amortecimento e b) com amortecimento do pino

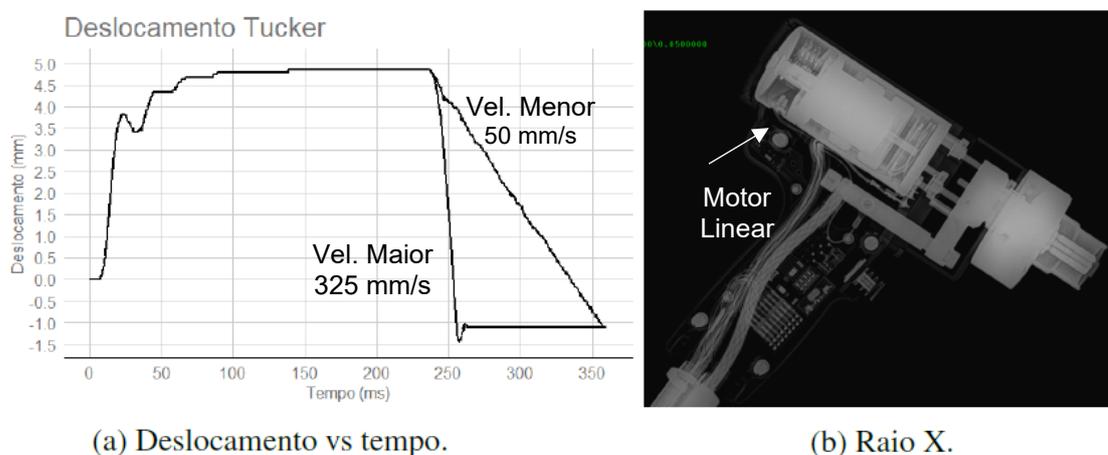


Fonte: O autor

Diminuir a velocidade de mergulho abaixo dos níveis recomendados requer um entendimento preciso do sincronismo da corrente elétrica com o movimento do pino. O pino deve penetrar antes da extinção do arco; caso contrário, a falta de fusão será inevitável. Indicativos característicos incluem fraturas com ângulos de flexão quase inexistentes e áreas de metal brilhante na borda externa do pino no padrão de fratura. Isso ocorre devido à oxidação que começa nas bordas após a dissipação do vapor metálico protetor (TRILLMICH; WELZ, 2016).

O controle digital dos mecanismos de motor linear oferece uma vantagem significativa em termos de controle, sendo configurados digitalmente no painel de controle da fonte de soldagem. Neste caso, duas etapas fundamentais são controladas: O valor de recuo quanto a dinâmica da descida do pino pode ser configurada digitalmente, permitindo um controle preciso da velocidade média. No presente experimento foram medidas velocidade médias que variaram de 50 mm/s a 325 mm/s.

Figura 115 - Representação da tecnologia motor movimentação do pino



Fonte: O autor

Foram realizados testes usando uma pistola de soldagem com motor linear, que permite um controle preciso do movimento do pino durante o processo de soldagem. Neste tipo de equipamento, os valores de recuo e penetração são regulados diretamente na fonte de soldagem e controlados pelo motor. No caso da pistola motorizada o valor de protrusão é fixo em 1,5 mm, visto que o motor é responsável por atingir o valor de penetração regulado. Assim as variáveis de protrusão e penetração não apresentam correlação entre si. As medições foram

realizadas por meio de um transdutor de posição (régua pontenciométrica) acoplado ao eixo transmissor de movimento da pistola.

O gráfico da Figura 116 mostra o deslocamento real do pino em comparação com o deslocamento programado pelo motor linear. Foi testada toda a faixa de regulagem de recuo da fonte, entre 1 e 7 mm, conforme as legendas do gráfico, para verificar o desempenho deste tipo de acionamento e posteriormente compará-lo com acionamentos mecânicos. É possível verificar nas medições um comportamento interessante onde a pistola não atinge os valores máximos regulados de 6 e 7 mm. Como o recuo está intimamente relacionado ao comprimento do arco, tais comportamentos têm impacto direto na potência do processo.



Fonte: O autor

As partes do gráfico onde o deslocamento se torna negativo indicam que o pino ultrapassou a sua posição inicial (pino sobre-peça), buscando atingir o valor de penetração programado. Assim, o motor continua a empurrar o pino para um valor de penetração pré-definido de 1 mm, além da posição “pino sobre-peça”, ou seja, o limite inferior do bocal (ou da superfície da peça) ou até encontrar alguma resistência física no seu curso. Nesse caso, é importante salientar que nem sempre a solda apresentará um valor efetivo de penetração de 1 mm, conforme programado, mas esse valor será

refletido na diminuição de comprimento do pino, pois parte do pino fundido se transforma em colar de solda.

Além disso, as curvas de movimento apresentam alguns pontos de instabilidade no início do movimento e no final. A hipótese inicial é que tais oscilações, conhecidas como "*overshoot*" e "*ringing*", podem, de fato, estar relacionadas com o controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) do motor linear. Quando um pino é acionado por um motor linear sob controle PID, o sistema pode inicialmente "sobrepassar" o ponto de ajuste desejado. Isso é chamado de "*overshoot*". O *overshoot* inicial é comum em sistemas de controle quando o controlador proporcional está ajustado para uma resposta rápida, o que pode fazer com que o atuador se mova rapidamente, mas passe do ponto desejado antes de se estabilizar. Após o *overshoot* inicial, o sistema tenta corrigir o erro e pode entrar em um estado de oscilação ao redor do ponto de ajuste desejado, conhecido como "*ringing*". Essas oscilações finais são o resultado do esforço do controlador para estabilizar o sistema na posição desejada. Se o controlador PID não estiver bem ajustado, o sistema pode oscilar várias vezes antes de se estabilizar.

6. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo apresentar uma investigação inicial sobre diversos aspectos técnicos do *Stud Welding*, abordando tópicos que ainda carecem de clareza na literatura técnica. A presente pesquisa revela aspectos fundamentais sobre a complexidade e os desafios do processo de Soldagem por Pinos (*Stud Welding*), especialmente ao comparar tecnologias de controle de corrente, métodos de proteção e geometrias de pinos.

A análise e caracterização das tecnologias de controle de corrente demonstrou que as fontes transistorizadas, com tecnologia inversora, oferecem maior estabilidade e controle de corrente em comparação às fontes tiristorizadas, garantindo melhor qualidade de solda e consistência no processo. Observou-se também que a tensão de soldagem aumenta com o recuo do pino, principalmente com o uso do anel cerâmico, ressaltando a importância do ajuste adequado desses parâmetros. A relação inversa entre corrente e tempo de arco para manutenção de uma energia constante foi validada, identificando-se uma janela operacional otimizada para soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro, onde o controle preciso desses parâmetros é essencial para a integridade da solda.

A influência da geometria das pontas dos pinos foi significativa: pinos com uma ponta de ignição, seja esférica, cônica fina demonstraram desempenho superior em relação ao pino sem nenhuma ponta de ignição.

A ponta de esfera de alumínio foi tomada como referência para os demais testes e sua parametrização buscou facilitar a ignição do arco e formar colares de solda uniformes. Nesse sentido, a ponta cônica exigiu mais energia devido ao maior volume de material a ser fundido. A ponta plana mostrou-se inadequada, gerando instabilidade e curtos-circuitos que comprometem a qualidade da solda.

Com relação aos testes com diferentes meios de proteção, gás e anel cerâmico, o argônio puro mostrou ser ideal para uma solda estável e com menores variações no sinal da tensão, enquanto o CO₂, embora promova maior penetração, apresentou maior instabilidade. O uso do anel cerâmico, em substituição ao gás, mostrou-se uma opção eficaz em condições que demandam proteção física da poça de fusão. Nesse sentido conclui-se que a escolha do meio de proteção no processo *Stud Welding* influencia diretamente a estabilidade do arco, a distribuição de calor e a qualidade da solda. O uso de anel cerâmico e gases de proteção representa abordagens distintas

para controlar a atmosfera ao redor do arco. Uma das diferenças mais notáveis entre esses métodos está na tensão do arco: o anel cerâmico tende a resultar em valores de tensão mais elevados quando comparado à proteção gasosa, para a mesma corrente e valor de recuo.

A técnica de soldagem assistida por campo magnético demonstrou ser promissora para um controle térmico refinado e, com isso, reduzir distorções em chapas finas. No entanto, a rotação do arco gerada pelo campo magnético em altas correntes trouxe desafios de estabilidade que exigem uma parametrização cuidadosa. Verificou-se que a força gerada pelo campo magnético na bobina do bocal, projeta metal fundido para fora da área da solda, o que pode comprometer um tamanho adequado da zona fundida. Por outro lado, mostrou-se também a possibilidade de soldar com o processo tradicional (anel cerâmico) com os mesmos parâmetros da aplicação de campo magnético no bocal. No entanto, observou-se uma maior probabilidade de defeito no colar de solda quando o campo magnético não é utilizado.

A análise dos sistemas de movimentação indicou que, embora os sistemas motorizados ofereçam flexibilidade, eles demandam ajustes rigorosos dos parâmetros PID para controle adequado do comprimento do arco. Em contrapartida, os sistemas eletromecânicos apresentaram maior estabilidade, sendo mais confiáveis em certas aplicações. As curvas de movimento do pino representadas nos gráficos, demonstraram maior estabilidade para os sistemas eletromecânicos com eletroímã e mola, pois não variaram sua posição em relação ao parâmetro regulado. Por outro lado, o sistema motorizado apresentou maior defasagem sobre o valor de recuo regulado, além de apresentar oscilações acentuadas no controle PID. Assim, esse comportamento pode afetar o valor da potência média do processo.

Embora tenham sido alcançados avanços significativos na compreensão das variáveis do processo, como controle de corrente, geometria das pontas, proteção do arco e sistemas de movimentação, é importante reconhecer que se trata de uma pesquisa exploratória. Há muitos aspectos do SW que demandam investigações adicionais com metodologias variadas para ampliar e consolidar os resultados obtidos. Assim, espera-se que este trabalho sirva como um ponto de partida para estudos futuros, incentivando a realização de pesquisas que possam corroborar e expandir os achados aqui discutidos, contribuindo de forma mais robusta para o desenvolvimento e a aplicação segura e eficiente do *Stud Welding* em diferentes setores industriais.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e das contribuições desta tese, algumas sugestões de estudos futuros que podem aprofundar ou expandir o conhecimento sobre o processo *Stud Welding* incluem:

Desenvolvimento de novos métodos não destrutivos de inspeção

- Pesquisar novas técnicas de inspeção não destrutiva para avaliar a integridade das juntas soldadas, utilizando tecnologias como ultrassom avançado, tomografia ou sensores de infravermelho, pode aumentar a confiabilidade das soldas sem a necessidade de testes destrutivos.

Integração de sensores e monitoramento em tempo real

- Estudos podem explorar o uso de sensores avançados como sensores de som e imagem para monitorar o processo de soldagem em tempo real, permitindo a identificação de possíveis falhas pós soldagem. Isso pode reduzir a necessidade de intervenções durante o processo de soldagem e retrabalho.

Análise detalhada de pinos com geometrias inovadoras

- O estudo focou em pinos convencionais, mas pesquisas futuras podem investigar geometrias diferenciadas, como pinos ocos ou com novos *designs* de ponta. Isso pode ajudar a otimizar a distribuição do arco e melhorar a fusão da solda, especialmente em aplicações específicas.

Influência de outras misturas de gases de proteção

- Embora o gás de proteção tenha sido explorado, um estudo mais aprofundado sobre a utilização de novas misturas de gases, pode revelar impactos significativos na qualidade da solda.

Mitigação do Sopro Magnético em Aplicações Específicas

- O fenômeno do sopro magnético é identificado como um problema. Trabalhos futuros podem explorar soluções mais avançadas, como o uso de campos magnéticos controlados, para minimizar esse efeito, especialmente para pinos com grandes diâmetros.

Desenvolvimentos para soldagem de pinos subaquática

- Expansão dos estudos para aplicações de *Stud Welding* subaquático, principalmente na indústria *offshore*, investigando os desafios específicos relacionados ao controle de parâmetros de soldagem nesse ambiente e no desenvolvimento de equipamento de soldagem dedicado.

Avaliação da solda realizada por SW sob o aspecto de fadiga

- Um estudo sobre a durabilidade das soldas em condições reais de uso ou submetido à testes de fadiga, umidade e exposição a ambientes corrosivos, pode fornecer dados importantes para a aplicação naval e *offshore*.

REFERÊNCIAS

1. 03/0039, E. European Technical Approval ETA-03 / 0039. 2013.
2. ADONYI, Y. **Studs Thru Deck Welding, Coated Steels - Final Report**. 2006.
3. BACH, F. W. et al. Drawn-arc stud welding for underwater applications. **Welding and Cutting**, v. 3, n. 4, 2004.
4. BARGANI, M. G.; GHAINI, F. M.; MAZROI, A. The Effect of an Al Tip in Arc Stud Welding on the Properties of the Welded Joint. **Welding Journal**, v. 95, n. May, p. 157–162, 2016.
5. BRÄTZ, O. et al. Optimierung des Tragverhaltens unter Wasser gefügter Bolzenschweißverbindungen großer Dimensionen für Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen Optimisation of the load-bearing behaviour of large dimensional underwater drawn arc stud. **Schweißen und Schneiden**, v. 71, n. 220178, p. 278–284, 2019.
6. BRÄTZ, O.; HENKEL, K. M. Diffusible hydrogen concentration in draw arc stud weldments under harsh conditions. **Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference**, v. 2020- Octob, p. 3024–3029, 2020.
7. BRÄTZ, O.; HENKEL, K. M. Investigations on the microstructure of drawn arc stud welds on structural steels by quantitative metallography. **Welding in the World**, v. 67, n. 1, p. 195–208, 2023.
8. CARY, H. B. **Modern Welding Company**. 6th Editio ed. 2005.
9. CEMPÍREK, Š. **Robotické svařování svorníků metodou SRM**. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2021.
10. CHAMBERS, H. A. Principles and practices of stud welding. **PCI Journal**, v. 46, n. 5, p. 46–58, 2001.
11. CHANDIMA RATNAYAKE, R. M.; BREVIK, V. A. Experimental investigation of underwater stud friction stir welding parameters. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 29, n. 10, p. 1219–1225, 2014.
12. CHI, Q. Realization of slow stud plunge in arc stud welding. **TRANSACTIONS-CHINA WELDING INSTITUTION**, v. 26, n. 5, 2005.
13. CHI, Q.; ZHANG, J.; ZHANG, Y. **Study on the autocontrol of stud plunge depth in stepping arc stud welding** *Journal of Applied Sciences*, 2006.

14. CHO, H.-H.; SHIN, Y.; YI, H. STUD Welding on High Hardness Armor Steel of KWV. **Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology**, v. 19, n. 5, p. 567–573, 2016.
15. CRAMER, H. et al. SRM stud welding – a new arc stud welding variant. **Welding and Cutting**, v. 13, n. 05, p. 24–29, 2014.
16. CRAMER, H.; BÖHME, D.; JENICEK, A. Causes of hydrogen embrittlement in the case of drawn-arc stud welding. **Weld Mat Test**, v. 20, n. 2, p. 21–24, 2011.
17. CRECCA, J. D.; BISSELL, A. G. **Subaqueous end-welding device** United States, 1943.
18. DUTRA, J. C. **Ciência e Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. 1ª ed. Florianópolis: 2023.
19. DVS. **Merkblatt DVS 0902: Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung**. 2000a.
20. DVS. **Merkblatt DVS 0904: Hinweise für die Praxis – Lichtbogenbolzenschweißen**, 2000b.
21. EMI, S. et al. Study on the Connect Structure Between Footing Concrete and Steel Sheet Pipe Pile Wall by the Deformed Bar Stud Welding (in Japanese). **Transactions of the Japan Society of Civil Engineers**, v. 409, 1989.
22. FETHKE, N. B. et al. Reduction of Biomechanical and Welding Fume Exposures in Stud Welding. **Annals of Occupational Hygiene**, v. 60, n. 3, p. 387–401, 2016.
23. FETHKE, N. B.; GANT, L. C.; GERR, F. Comparison of biomechanical loading during use of conventional stud welding equipment and an alternate system. **Applied Ergonomics**, v. 42, n. 5, p. 725–734, 2011.
24. GALVANIZA. **Galvanização por Imersão a Quente**. Disponível em: <<https://www.galvanisa.com.br/noticia/37/galvanizacao-por-imersao-a-quente#:~:text=A taxa de corrosão do,se em média 80 µm.>>. Acesso em: 18 jan. 2024.
25. **Google Patents**. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US1410421A/en>>. Acesso em: 1 jun. 2023.
26. **Grainger**. Disponível em: <<https://www.grainger.com/>>. Acesso em: 31 maio. 2023.
27. HAMASAKI, M.; TATEIWA, F. Underwater Stud Welding. **Transactions of the Japan Welding Society**, v. 10, n. 1, p. 67–71, 1979.

28. HAN, Q. et al. Static behavior of stud shear connectors in elastic concrete-steel composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 113, p. 115–126, 2015.
29. HARTZ-BEHREND, K. et al. Stud arc welding in a magnetic field-investigation of the influences on the arc motion. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 550, n. 1, 2014.
30. HBS BOLZENSCHWEISSEN GMBH. **MARC - Schweißen**, 2023.
31. **Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH - Produktschulung Bolzenschweissen**, 2006.
32. HILBIG. **Electrical installation**. Disponível em: <<https://www.hilbig-gmbh.de/>>. Acesso em: 22 mar. 2024a.
33. HILBIG. **Ceiling- Wall-and Floor Fastening**. Disponível em: <<https://www.hilbig-gmbh.de/>>. Acesso em: 22 mar. 2024b.
34. HILBIG. **Deck plate fairing in ship construction**. Disponível em: <<https://www.hilbig-gmbh.de/>>. Acesso em: 21 mar. 2024c.
35. ISO 13918. **INTERNATIONAL STANDARD - Welding — Studs and ceramic ferrules for arc stud welding**, 2008.
36. ISO 14555. **INTERNATIONAL STANDARD - Welding — Arc stud welding of metallic materials**, 2014.
37. JÄHRING, A. Zum Tragverhalten von Kopfbolzendübeln in hochfestem Beton. 2009.
38. JENICEK, A. et al. Reproduzierbare Schweißqualität durch Bolzenschweißen mit Hubzündung und magnetisch bewegtem Lichtbogen . **DVS Congress 2013**, p. 1–4, 2013.
39. JENICEK, A.; CRAMER, H. Status and future prospects of special welding processes - Part 2_ Stud welding. **Welding and Cutting**, v. 2, p. 105–111, 2003.
40. JENICEK, A.; REITER, T. **Neue Technik beim Lichtbogenbolzenschweißen im Anlagenbau**. München: 2023.
41. KACHINSKIY, V. S. et al. Magnetically impelled ARC butt welding of hollow and solid parts. **Welding in the World**, v. 46, n. 7–8, p. 49–56, 2002.
42. KAPLER, M.; NOWACKI, J.; SAJEK, A. The Development of Arc Stud Welding. **Biuletyn Instytutu Spawalnictwa**, v. 2019, n. 4, p. 27–38, 2019.
43. KENNEDY, D. J. L. Stud Welding At Low Temperatures. **Canadian journal of**

- civil engineering, v. 7, n. 3, p. 442–455, 1980.
44. KLARIC, S. et al. The Influence of the Stud Arc Welding Process. **Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology**, v. 23, p. 79, 2009.
45. KLARIĆ, Š.; ROSANDIĆ, Ž.; MILINOVIĆ, A. Examination of welding parameters' influence on stud arc welding process. **Pollack Periodica**, v. 6, n. 3, p. 45–52, 2011.
46. KOBAYASHI, GO. Comparative Study on Effect of Powder Actuated Nail and Stud Welding on Steel Member. **15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)**, 2012.
47. KÖCO, K. & C. G. Composite Construction with Stud Welding Technology. p. 0–9, 2010.
48. KUHLMANN, U. et al. **Design of Steel-to-Concrete Joints. Design Manual I**. 2014.
49. KUHLMANN, U. et al. Anwendung in der Praxis von Anschlüssen zwischen Stahl und Beton Handbuch II. 2014b.
50. LEE, J. S. et al. Stud welding for fixation of cryogenic insulation of membrane tanks in LNG ship building. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 19, n. SUPPL. 1, p. s271–s275, 2009.
51. LLORENTE, A. New concept for the ground connection in Scania ' s trucks and buses New concept for the ground connection in Scania ' s trucks and buses Master Thesis Project Andrés Llorente. 2014.
52. MACSERVICE. **Steel Deck – Solução para lajes em estruturas metálicas**. Disponível em: <<http://maqserviceequipamentos.com.br/steel-deck-solucao-para-lajes-em-estruturas-metalicas/>>. Acesso em: 24 jan. 2024.
53. MARCHIONE, T. S. L. **Desenvolvimento de Ferramenta de Suporte à Parametrização do Processo Stud Welding em Aplicações com Restrição Térmica na Indústria Naval**. [Dissertação de Mestrado] Universidade Federal de Santa Catarina, 2024.
54. MARTIN, H.; MC CARTHY, ANDREW EDWARD STEELE, J. L. **DK30044C - Fremgangsmaade og Apparat til elektrisk Svejsning**. Denmark, 1922.
55. MARTIN, H.; MCARTHY, A. E.; STEELE, J. L. **US1410421A - Eletric Welding**. United States, 1922.
56. MARTIN, H.; MCCARTHY, A. E.; STEELE, J. L. **FR521889A - Improvement in**

- electric welding.** France, 1921.
57. MASUBUCHI, K.; KUTSUNA, M. **UNDERWATER STUD WELDING GUN**, 1975.
58. MASUBUCHI, K.; OZAKI, H.; CHIBA, J. I. Underwater Stud Welding. **OCEANS: The Ocean Challenge 1978**, p. 125–129, 1978.
59. METFORM. **Steel Deck - Produtos**. Disponível em: <<https://metform.com.br/>>. Acesso em: 18 jan. 2024.
60. NORTHLAND FASTENING, S. **The Strangest Buildings Made Possible with Stud Welding**. Disponível em: <<https://norfas.com/strangest-buildings-made-possible-with-stud-welding/>>. Acesso em: 17 jan. 2024.
61. OLIVEIRA, M. A. DE. **Desenvolvimentos no processo híbrido Plasma-Mig para operações de soldagem e brasagem**. [Tese de Doutorado] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
62. PENG, M. et al. Evaluation of the microstructural and mechanical properties of ductile cast iron and alloy steel dissimilar materials welded by magnetically impelled arc butt. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 4623–4635, 2021.
63. PRUTI JR., H. L. **Utility of the M.I.T Underwater Stud Welding Gun**. Massachusetts Institute of Technology, 1984.
64. REITER, T.; DIBIASI, L. **Verfahren und System zum Verschweißen eines kegelartige Stirnfläche aufweisenden Bolzens mit einem Träger**. Deutschland, 2006.
65. SAMARDŽIĆ, I.; KLARIĆ, Š.; SIEWERT, T. Analysis of welding parameter distribution in stud arc welding. **Welding in the World**, v. 51, n. SPEC. ISS., p. 791–800, 2007.
66. SAMARDŽIĆ, I.; KOLUMBIĆ, Z.; KLARIĆ, Š. Welding parameter monitoring during stud arc welding. **Pollack Periodica**, v. 4, n. 1, p. 29–39, 2009.
67. SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento Melhor Desempenho**. 2nd. ed. São Paulo: 2008.
68. SEILKOPF, J.; NORBERT, W. Bolzenlöten ist eine vollwertige Alternative. **Industrieanzeiger**, v. 43, p. 41–42, 2001.
69. SILICON. **Refractory Anchor Studs**. Disponível em: <<https://www.stanleyengineeredfastening.com/en-US/catalog-global/nelson-stud-welding/refractory-anchors>>. Acesso em: 22 fev. 2024.
70. SLOCUM, A. H.; ZIEGLER, A. G. An automated shear stud welding system.

- Robotics**, v. 6, n. 4, p. 367–382, 1990.
71. SMITH, C.; WILLIAMS, W. Automatic Stud Welder for Surface and Underwater Applications. p. 283–287, 1986.
72. SOYER. **Soyer GmbH- Produkte.** Disponível em: <<https://soyer.de/produkt/ph-5l/>>. Acesso em: 7 fev. 2024.
73. SOYER GMBH. **Produktschulung Bolzenschweissen (Deutsch)**, 2006.
74. STANLEY. **Nelson® stud welding products can be found all over the world.** Disponível em: <<https://www.stanleyengineeredfastening.com/brands/nelson>>. Acesso em: 17 jan. 2024a.
75. STANLEY. **TUCKER Grounding.** Disponível em: <<https://www.stanleyengineeredfastening.com/-/media/Web/SEF/Resources/Docs/Tucker/automotive-grounding-for-electrification-flyer-EN.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2024b.
76. STEELE, J. L.; MARTIN, H.; MCCARTHY, A. E. **GB183161A - Improvements in and relating to electric arc welding applicable for welding studs, tubes and the like to or into metal plates, bodies, and the like** United Kingdom, 1922.
77. STEELE, J. L.; MARTIN, H.; MCCARTHY, A. E. **GB196322A - Improvements in and relating to electric arc welding applicable for welding studs, tubes or the like to or into metal plates, bodies and the like.** United Kingdom, 1923.
78. STEELE, J. L.; MARTIN, H.; MCCARTHY, A. E. **US1523666A - Electric-arc welding.** United States, 1925.
79. STEELE, J. L.; MARTIN, H.; MCCARTHY, A. E. **GB183787A - Improvements in and relating to electric arc welding applicable for welding studs, tubes and the like to or into metal plates, bodies and the like.** United Kingdom, 1922.
80. **Stud Master.** Disponível em: <<https://studmaster.co.in/stud-welding-studs/>>.
81. TRILLMICH, R. New perspectives in stud welding quality management Ever. **Welding and Cutting**, v. 20, n. 04, p. 315–320, 2021.
82. TRILLMICH, R. Advantages with careful planning – Shear connector welding through galvanized profiled sheet. **Welding and Cutting**, v. 22, n. 2, p. 38–42, 2023.
83. TRILLMICH, R.; WELZ, W. **Stud welding Principles and application.** 2016.
84. TWI, T. W. I. **What is MIAB Welding?** Disponível em: <<https://www.twi->

- global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-miab-welding>. Acesso em: 26 jun. 2023.
85. UFSC. **Portal Virtuahab - Laje Steel Deck**. Disponível em: <<https://portalvirtuhab.paginas.ufsc.br/laje-steel-deck/>>. Acesso em: 24 jan. 2024.
86. VENDAN, S. A. et al. Magnetically Impelled Arc Butt Welding of alloy steel tubes in boilers - Establishment of parameter window. **Mechatronics**, v. 21, n. 1, p. 30–37, 2011.
87. XUE, W. et al. Static Behavior and Theoretical Model of Stud Shear Connectors. **Journal of Bridge Engineering**, v. 13, n. 6, p. 623–634, 2008.
88. ZHAN, Y. et al. Theoretical Study on the Influence of Welding Collar on the Shear Behavior of Stud Shear Connectors. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 25, n. 4, p. 1353–1368, 2021.
89. ZHANG, D. et al. Effects of welding flux on welding quality during arc stud welding process. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 35, n. 23, p. 2684–2695, 2021.
90. ZHANG, D. et al. Forming and weld grain growth behavior of arc stud welding driven by rotating magnetic field. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 82, n. July, p. 138–151, 2022.
91. ZHANG, D. et al. Weld morphology and grain growth characteristics of driven moving arc hollow stud welding. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 9096–9110, 2023.
92. ZHOU, J. et al. Torsional behavior of steel reinforced concrete beam with welded studs: Experimental investigation. **Journal of Building Engineering**, v. 48, n. November 2021, p. 103879, 2022.
93. ZIEGLER, A. G. **The design and fabrication of an automated shear stud welding system**. Massachusetts Institute of Technology, 1988.