



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

TIAGO DE SIQUEIRA LIMA MARCHIONE

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE SUPORTE À PARAMETRIZAÇÃO
DO PROCESSO STUD WELDING EM APLICAÇÕES COM RESTRIÇÃO TÉRMICA
NA INDÚSTRIA NAVAL**

Florianópolis
2024

TIAGO DE SIQUEIRA LIMA MARCHIONE

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE SUPORTE À PARAMETRIZAÇÃO
DO PROCESSO STUD WELDING EM APLICAÇÕES COM RESTRIÇÃO TÉRMICA
NA INDÚSTRIA NAVAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

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

Florianópolis

2024

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

Marchione, Tiago de Siqueira Lima
DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE SUPORTE À
PARAMETRIZAÇÃO DO PROCESSO STUD WELDING EM APLICAÇÕES COM
RESTRIÇÃO TÉRMICA NA INDÚSTRIA NAVAL / Tiago de Siqueira
Lima Marchione ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e
Silva, 2024.
126 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem de pinos. 3.
Construção Naval. 4. Energia de soldagem. 5. Comportamento
térmico. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves e. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

TIAGO DE SIQUEIRA LIMA MARCHIONE

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE SUPORTE À PARAMETRIZAÇÃO DO
PROCESSO STUD WELDING EM APLICAÇÕES COM RESTRIÇÃO TÉRMICA NA
INDÚSTRIA NAVAL**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 4 de abril de 2024,
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

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

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

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Giovanni Dalpiaz, Dr. Eng.
PETROBRAS/CENPES

Eng. Ricardo Reppold Marinho, M. Sc.
PETROBRAS/CENPES

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

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

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

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, Márcio e Beth, que abdicaram de muitas coisas para me proporcionar a melhor educação possível, à minha esposa e companheira de vida Patrícia e ao meu filho Miguel, que são meu porto seguro, e ao meu padrinho, tio Felipe (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida e por guiar e iluminar meu caminho, abençoando cada momento.

À minha amada esposa e companheira Patrícia, pelo suporte inabalável, apoio irrestrito e compreensão nos momentos de indisponibilidade para que eu pudesse chegar ao final desta singradura. Este trabalho é uma celebração do nosso laço e das conquistas que alcançamos juntos.

Ao meu filho Miguel, que independente das minhas ausências impostas pelo desenvolvimento deste trabalho, demonstra diariamente a importância do amor através de pequenos gestos e sempre acompanhado do seu sorriso caloroso, que foram o combustível que alimentou minha determinação, mesmo nos momentos de maior cansaço e frustração. Não tenho palavras suficientes para expressar a profundidade da minha gratidão por ser seu pai.

Aos meus pais, Márcio e Beth, pela base sólida, amor incondicional, educação e ensinamentos que me deram durante toda a trajetória da minha vida. Sem isso, não seria possível subir mais esse degrau acadêmico. Minha gratidão eterna por tudo que fizeram e fazem por mim. Essa conquista também é de vocês.

Aos meus irmãos, Natália e Gabriel, pelo companheirismo e convivência ao longo de todos esses anos. As memórias compartilhadas de nossas aventuras e brincadeiras durante a nossa infância ajudaram a moldar quem sou hoje.

À Marinha do Brasil, pela oportunidade do aprimoramento profissional, que possibilitará uma melhor colaboração no desenvolvimento de projetos e programas, contribuindo para o aprestamento dos seus meios e a independência tecnológica do Brasil.

Aos Capitão de Fragata Alan de Freitas, Comandante da Escola de Aprendizes-Marinheiros de Santa Catarina, Capitão de Fragata André Luiz Vilela de Assis, seu antecessor, Capitão de Corveta Leandro Nogueira Mainart, Imediato da Escola de Aprendizes-Marinheiros de Santa Catarina, e Capitão de Corveta Jeancarlo Nunes Araujo, seu antecessor, pelo apoio irrestrito a mim e à minha família durante esses 2 anos na cidade de Florianópolis. Estendo esses agradecimentos a valiosa tripulação da Escola de Aprendizes-Marinheiros de Santa Catarina. As facilidades providas para a Família Naval foram primordiais para o sucesso dessa missão.

Ao Instituto de Soldagem e Mecatrônica (LABSOLDA), e toda sua equipe interdisciplinar de pesquisadores, engenheiros, técnicos e estagiários, pelo suporte ao longo de todo o trabalho e por manter operante a infraestrutura de equipamentos do laboratório.

À PETROBRAS pelo fornecimento de recursos para o projeto “Processo *Stud Welding* para fixação de componentes na área naval”, que permitiram aumentar a infraestrutura do LABSOLDA na aquisição de equipamentos e insumos do processo *Stud Welding*.

Ao meu professor orientador, Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pelas orientações e atenção dispensadas, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos e pelas experiências compartilhadas, que contribuíram sobremaneira para a realização deste trabalho. Espero ter correspondido a todas as expectativas que me foram geradas e ter contribuído de alguma forma com o desenvolvimento da pesquisa no LABSOLDA, e conseqüentemente, para o Brasil.

Ao grande amigo Álisson Fernandes da Rosa, pela coorientação, pelas longas conversas e debates sobre o processo *Stud Welding*, e pela amizade e cordialidade.

Aos companheiros de bancada do processo *Stud Welding*, Duván Sánchez Quintana, Leonardo Matos Brasil e Lucas Maraschin, pelo apoio nos diversos experimentos e análise de resultados.

Aos grandes amigos do LABSOLDA, Cláudio Marques Schaeffer e Vitor Massao Nishi Ueta, pelo convívio, experiências e conversas sobre soldagem, e sobretudo, pela amizade.

Aos demais colegas e companheiros de trabalho do LABSOLDA, Daniel Galeazzi, Ivan Olszanski Pigozzo, Alex Sandro Pereira, Cleber Guedes, Rafael Jônatan Horn, Cássio Baumann, Vitor Igor da Cunha Silva, Rodrigo Nogueira, Kauê Riffel, Giulia Ciacci Zanella, Pamela de Matos, Alberto Bonamico Viviani, Junior Bonetti Zanini, Fernando Costenaro, Cleber Marques, Mariana de Andrade e Marcelo Pompermaier Okuyama, pela camaradagem, experiências e conversas sobre soldagem.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, em especial Prof. Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Prof. Dr. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Prof. Dr. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto e Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky.

Aos amigos da Vila Naval da EAMSC, Mauro Soares Fernandes Júnior, Erik Santana Milesi e Luiz Antônio Fiorani de Araújo, extensivos às suas digníssimas famílias, pelo conagraçamento, churrascos e resenhas durante esses 2 anos em Florianópolis.

À Dona Lourdes Teresinha Alves dos Santos, pela manutenção da limpeza das instalações do LABSOLDA em condições impecáveis, que propiciou um ambiente adequado para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que ajudaram de alguma forma, direta ou indiretamente, durante toda a trajetória da minha vida que permitiu minha chegada até esta fase.

RESUMO

O processo *Stud Welding* (SW) foi criado há cerca de um século para aplicações na indústria de construção naval. Desde então, vem se desenvolvendo na busca incessante pelo melhoramento da produtividade na fixação de elementos mecânicos por soldagem. A correta parametrização do processo SW é de extrema relevância para o resultado da solda, sendo um elemento determinante para impedir o surgimento de defeitos e discontinuidades. Nos tempos hodiernos, é empregado em diversos setores da indústria, com destaque para os setores de construção naval e *offshore*, de construção civil e automotivo. No âmbito da indústria de construção naval e *offshore*, pelas suas peculiaridades, principalmente no que tange à segurança da embarcação, é de vital importância o conhecimento dos aspectos térmicos impostos pelo arco elétrico durante a soldagem, justificado pelo risco de danos ao material do verso da chapa, desde degradação de revestimentos até o risco de explosão. Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo efetuar o levantamento do comportamento térmico no verso da chapa durante a soldagem de pinos, de modo a possibilitar a criação de uma ferramenta de consulta, por meio de gráficos, a fim de se obter, de forma rápida e prática, a temperatura máxima atingida no verso da chapa, para condições estabelecidas de aplicação. Desta forma, o estudo desenvolveu-se através da soldagem de pinos em duas variantes do processo SW: por arco retraído e por descarga capacitiva. Pinos de aço carbono de diferentes diâmetros, geometrias de base e pontas de ignição foram soldados, na posição plana de soldagem, em chapas de aço ASTM A36 de diversas espessuras. Os sinais elétricos (tensão e corrente), de deslocamento do pino e de temperatura foram medidos e registrados por meio de um Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR. Foi constatado que quase a totalidade da energia de soldagem durante o processo SW por arco retraído acontece na região denominada de arco principal. Os pinos soldados com emprego da técnica assistida por campo magnético apresentaram energia de soldagem menor, e conseqüentemente, metal de solda, temperatura máxima e tempo de resfriamento no verso da chapa menores. Já o processo SW por descarga capacitiva apresentou resultados ainda mais baixos de temperatura máxima e tempo de resfriamento no verso da chapa. Foi possível obter informações sobre o comportamento térmico dinâmico no verso da chapa. Adicionalmente, também foi possível relacionar, para cada espessura de chapa, a energia de soldagem e a temperatura máxima atingida no verso da chapa. De fato, são apresentadas discussões sobre o cálculo de energia de soldagem e eficiência do processo, considerando as particularidades do processo SW em relação a outros processos de soldagem a arco elétrico. Além disso, testes com chapas de grandes dimensões de comprimento e largura apresentaram uma temperatura um pouco menor no verso da chapa, indicando que as informações apresentadas nesse estudo sobre o comportamento térmico no verso da chapa possuem um fator de segurança sobre o comportamento térmico em aplicações em campo com o processo SW.

Palavras-chave: Soldagem de pinos; Construção naval; Energia de soldagem; Comportamento térmico.

ABSTRACT

The Stud Welding (SW) process was created around a century ago for applications in the shipbuilding industry. Since then, it has been developed in the incessant search to improve productivity in the fastening of mechanical elements by welding. The correct parameterization of the SW process is extremely important for the result of the weld and is a determining factor in preventing the appearance of defects and discontinuities. Nowadays, it is used in various sectors of industry, particularly in the shipbuilding, offshore, civil construction and automotive sectors. In the shipbuilding and offshore industry, due to its peculiarities, especially about vessel safety, it is vitally important to know the thermal aspects imposed by the electric arc during welding, justified by the risk of damage to the material on the back of the plate, from degradation of coatings to the risk of explosion. In this context, the aim of this study is to survey the thermal behavior of the back side of the plate during stud welding, so that a consultation tool can be created, using graphs, to quickly and practically obtain the maximum temperature reached on the back side of the plate, for established application conditions. In this way, the study was carried out by welding studs in two variants of the SW process: drawn-arc and capacitor discharge. Carbon steel studs of different diameters, base geometries and ignition tips were welded in the flat welding position to ASTM A36 steel plates of various thicknesses. The electrical signals (voltage and current), pin displacement and temperature were measured and recorded using a Welding Supervision and Traceability System. It was found that almost all the welding energy during the drawn-arc SW process happens in the region known as the main arc. The studs welded using the magnetic field assisted technique had reduced energy input, and consequently lower weld metal, maximum temperature, and cooling time on the back side of the plate. The capacitor discharge SW process showed even lower results in terms of maximum temperature and cooling time on the back side of the plate. It was possible to obtain information on the dynamic thermal behavior of the back side of the plate. In addition, it was also possible to relate, for each plate thickness, the welding energy and the maximum temperature reached on the back of the plate. In fact, discussions on the calculation of welding energy and process efficiency are presented, considering the particularities of the SW process in relation to other electric arc welding processes. Furthermore, tests with large plate lengths and widths showed a lower temperature on the back of the plate, indicating that the information presented in this study on the thermal behavior of the back of the plate has a safety factor for thermal behavior in field applications with the SW process.

Keywords: Stud welding; Shipbuilding; Welding energy; Thermal behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do processo SW por arco retraído.....	27
Figura 2 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do processo SW por descarga capacitiva com contato inicial.....	29
Figura 3 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do processo SW por descarga capacitiva com <i>gap</i> inicial.....	30
Figura 4 – Representação do parâmetro Protrusão conforme o tipo de ponta do pino: (a) cônica e (b) esfera de alumínio.....	32
Figura 5 – Representação da regulagem do parâmetro protrusão na pistola de soldagem.....	32
Figura 6 – Representação do parâmetro Recuo conforme o tipo de ponta do pino:	33
Figura 7 – Representação da protrusão através do flange do pino	35
Figura 8 – Ajuste da pressão da mola: (a) Pistola SOYER/PS-3K (processo DC com contato inicial) e (b) Pistola SOYER/PS-3 (processo DC com <i>gap</i> inicial) ..	36
Figura 9 – Representação do recuo do pino.....	36
Figura 10 – Representação do recuo do pino: (a) recuo máximo, (b) recuo médio e (c) recuo mínimo.....	37
Figura 11 – Parâmetros recomendados de corrente de soldagem e tempo de soldagem em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído....	38
Figura 12 – Parâmetros recomendados de protrusão em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído.....	39
Figura 13 – Parâmetros recomendados de recuo em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído.....	40
Figura 14 – Parâmetros de soldagem recomendados em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído.....	41
Figura 15 – Recomendação de parâmetros de soldagem de pinos para o processo SW por arco retraído.....	42
Figura 16 – Bancada de soldagem: (a) Fontes de soldagem, (b) Pistolas de soldagem, (c) Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR	45
Figura 17 – Esquema da disposição do termopar para aquisição dos ciclos térmicos.....	47

Figura 18 – Diferentes geometrias de ponta dos pinos: (a) ponta de esfera de alumínio, (b) ponta cônica, (c) ponta fina e (d) ponta tip	48
Figura 19 – Régua Potenciométrica instalada na pistola de soldagem SOYER/PH-4L: (a) Régua Potenciométrica, (b) dispositivo para fixação da parte estática da régua potenciométrica e (c) dispositivo para fixação da parte móvel da régua potenciométrica	50
Figura 20 – Representação das etapas do processo SW por arco retraído .	52
Figura 21 – Regiões durante o comando de corrente da fonte no processo SW por arco retraído	53
Figura 22 – Representação das etapas do processo SW por descarga capacitiva com contato inicial	56
Figura 23 – Representação das etapas do processo SW por descarga capacitiva com <i>gap</i> inicial	57
Figura 24 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa para o ensaio 39	65
Figura 25 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa dos 49 ensaios	66
Figura 26 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 6,4 mm de espessura	67
Figura 27 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 7,9 mm de espessura	67
Figura 28 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 9,5 mm de espessura	68
Figura 29 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 12,7 mm de espessura	68
Figura 30 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 15,9 mm de espessura	69

Figura 31 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 19,0 mm de espessura	69
Figura 32 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 25,4 mm de espessura	70
Figura 33 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 20 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio em chapas de aço ASTM A36 de diferentes espessuras	71
Figura 34 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio em chapas de aço ASTM A36 de diferentes espessuras	71
Figura 35 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 10 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras	72
Figura 36 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 16 mm de diâmetro e ponta fina em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras	72
Figura 37 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 12 mm de diâmetro e ponta fina em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras	73
Figura 38 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 10 mm de diâmetro e ponta fina em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras	73
Figura 39 - Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 10 mm de diâmetro e ponta cônica em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras	74
Figura 40 – Gráfico de Temperatura máxima atingida no verso da chapa por espessura da chapa	76

Figura 41 – Linhas de tendência para cada tipo de ponta e diâmetro do pino para o gráfico de Temperatura máxima atingida no verso da chapa por espessura da chapa	77
Figura 42 – Gráfico de Temperatura máxima atingida no verso da chapa X Energia total de soldagem, com linhas de tendência por espessura de chapa	78
Figura 43 – Dimensões das chapas: (a) chapa de 3.000 mm x 1.500 mm x 7,9 mm e (b) chapa de 1.000 x 76,2 x 7,9 mm	81
Figura 44 - Curva do comportamento térmico no verso da chapa de um pino de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio soldado com o processo SW por arco retraído e parâmetros de soldagem do estudo realizado por Rosa <i>et al.</i> (2022) em chapa de aço carbono ASTM A36 de grandes dimensões e 7,9 mm de espessura	82
Figura 45 – Ciclo térmico para soldagem de pinos M10 com processo DC com contato inicial em chapas de diferentes espessuras	83
Figura 46 – Ciclo térmico da soldagem com diferentes variantes do processo SW de pinos de 10 mm de diâmetro em chapas de 6,4 mm de espessura	84
Figura 47 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 20 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio usando o processo SW por arco retraído com anel cerâmico.....	93
Figura 48 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio usando o processo SW por arco retraído com anel cerâmico.....	94
Figura 49 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 10 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio usando o processo SW por arco retraído com anel cerâmico.....	94
Figura 50 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 10 mm de diâmetro e ponta cônica usando o processo SW por arco retraído com proteção gasosa.....	96
Figura 51 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 16 mm de diâmetro e ponta fina usando o processo SW por arco retraído emprego da técnica assistida por campo magnético e gás de proteção	97
Figura 52 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 12 mm de diâmetro e ponta fina usando o processo SW por	

arco retraído emprego da técnica assistida por campo magnético e gás de proteção	97
Figura 53 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 10 mm de diâmetro e ponta fina usando o processo SW por arco retraído emprego da técnica assistida por campo magnético e gás de proteção	98
Figura 54 – 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	99
Figura 55 – Macrografia dos pinos soldados com diferentes variações do processo SW por arco retraído: (a) pino M20 com ponta de esfera de alumínio, (b) pino M16 com ponta de esfera de alumínio, (c) pino M10 com ponta de esfera de alumínio, (d) pino M12 com ponta cônica, (e) pino M16 com ponta fina, (f) pino M12 com ponta fina, (g) pino M10 com ponta fina	100
Figura 56 – Influência da variação do parâmetro protrusão na soldagem de pinos com o processo SW por arco retraído: (a) protrusão baixa (ensaio 2), (b) protrusão recomendada (ensaio 1) e (c) protrusão alta (ensaio 3).....	102
Figura 57 – Influência da variação do parâmetro recuo na soldagem de pinos com o processo SW por arco retraído: (a) recuo baixo (ensaio 4), (b) recuo recomendado (ensaio 1) e (c) recuo alto (ensaio 5).....	104
Figura 58 - Resultado dos ensaios para qualificação de procedimento: (a) teste de dobramento ensaio nº 3, (b) teste de dobramento ensaio nº 6, (c) teste de torque ensaio nº 3 e (d) teste de torque ensaio nº 6.	107
Figura 59 – Macrografia do pino M6 soldado com os parâmetros de cada ensaio: (a) ensaio 1, (b) ensaio 2, (c) ensaio 3, (d) ensaio 4, (e) ensaio 5, (f) ensaio 6, (g) ensaio 7, (h) ensaio 8, (i) ensaio 9, (j) ensaio 10, (k) ensaio 11 e (l) ensaio 12	108
Figura 60 – Micrografia de um pino soldado com os parâmetros do ensaio 5:(a) ZAC do pino, (b) Zona Fundida e (c) ZAC da chapa base	109
Figura 61 – <i>Set-up</i> da filmagem de alta velocidade: (a) Câmera IDT/Y4S2, (b) Lente Macro Canon EF 180 mm L USM e (c) iluminação laser CAVITAR/Cavilux HF.	110
Figura 62 – Quadros da filmagem de alta velocidade (41.666 quadros por segundo) do processo DC com contato inicial: (a) antes da abertura do arco, (b)	

instante da abertura do arco elétrico, (c) durante o arco aberto e (d) após a extinção do arco elétrico.....	111
Figura 63 - Quadros da filmagem de alta velocidade (25.000 quadros por segundo) do processo DC com <i>gap</i> inicial: (a) pino na posição de elevação devido à atuação do solenoide, (b) instante antes da abertura do arco, (c) instante da abertura do arco elétrico e (d) após a extinção do arco elétrico	112
Figura 64 – Pinos M8 soldados na chapa de 12,7 mm de espessura com o processo DC com contato inicial após os testes de dobramento e de torque	116
Figura 65 – Pinos M8 soldados na chapa de 63,5 mm de espessura após os testes de dobramento e de torque.....	117
Figura 66 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 1).....	119
Figura 67 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 2).....	120
Figura 68 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 3).....	121
Figura 69 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 4).....	122
Figura 70 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 5).....	123
Figura 71 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 6).....	124
Figura 72 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 7).....	125
Figura 73 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 8).....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais especificações das fontes de soldagem.....	46
Tabela 2 – Especificação da composição química das chapas	48
Tabela 3 – Faixas de medição das principais variáveis do Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR.....	51
Tabela 4 – Principais parâmetros de soldagem utilizados na caracterização de diferentes variações do processo SW por arco retraído.....	59
Tabela 5 – Matriz de ensaios.....	59
Tabela 6 – Energia de soldagem e temperatura máxima no verso da chapa	61
Tabela 7 – Temperatura e tempo de resfriamento do verso da chapa	74
Tabela 8 – Equações das linhas de tendência e R-quadrado	77
Tabela 9 – Equações das linhas de tendência e R-quadrado	78
Tabela 10 – Parâmetros recomendados para a soldagem com o processo SW por arco retraído de um pino de 16 mm de diâmetro com ponta de esfera de alumínio	79
Tabela 11 – Parâmetros de soldagem utilizados no estudo de Rosa <i>et al.</i> (2022).....	80
Tabela 12 – Resultados de temperatura máxima atingida no verso da chapa no presente estudo e no estudo realizado por Rosa <i>et al.</i> (2022).....	80
Tabela 13 – Principais parâmetros de soldagem utilizados.....	83
Tabela 14 – Principais parâmetros de soldagem utilizados na caracterização de diferentes variações do processo SW por arco retraído.....	93
Tabela 15 – Matriz de ensaios com os parâmetros de soldagem utilizados	101
Tabela 16 – Matriz de ensaios com os parâmetros de soldagem utilizados	106
Tabela 17 - Resultados dos testes de qualificação dos procedimentos de soldagem.....	107
Tabela 18 – Resultados das medições realizadas com as filmagens de alta velocidade	113
Tabela 19 – Principais parâmetros de soldagem utilizados.....	115

Tabela 20 – Resultados dos testes de dobramento e de torque dos pinos M8 soldados na chapa de 12,7 mm 116

Tabela 21 – Resultados dos testes de dobramento e de torque dos pinos M8 soldados na chapa de 63,5 mm 118

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVO GERAL	21
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	O PROCESSO STUD WELDING.....	23
2.2	HISTÓRICO	24
2.3	VARIAÇÕES DO PROCESSO SW	26
2.3.1	Processo SW por Arco Retraído	27
2.3.2	Processo SW por Descarga Capacitiva	28
2.3.2.1	<i>Com Contato Inicial</i>	29
2.3.2.2	<i>Com Gap Inicial</i>	29
2.4	PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	30
2.4.1	Processo SW por Arco Retraído	30
2.4.1.1	<i>Corrente de Soldagem</i>	30
2.4.1.2	<i>Tempo de Soldagem</i>	31
2.4.1.3	<i>Pré-corrente de Soldagem</i>	31
2.4.1.4	<i>Tempo de Pré-corrente</i>	31
2.4.1.5	<i>Protrusão do pino</i>	32
2.4.1.6	<i>Recuo do pino</i>	33
2.4.1.7	<i>Outros parâmetros</i>	33
2.4.2	Processo SW por Descarga Capacitiva	34
2.4.2.1	<i>Tensão de Carga</i>	34
2.4.2.2	<i>Protrusão do pino</i>	35
2.4.2.3	<i>Pressão da mola e Recuo do pino</i>	35
2.4.2.4	<i>Velocidade de descida (ou mergulho) do pino</i>	37
2.5	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO PROCESSO SW POR ARCO RETRAÍDO.....	37
2.6	ENERGIA DE SOLDAGEM.....	42
3	METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	ESTUDOS PRELIMINARES	49
4.1.1	Sistema de Monitoração do Processo SW	49

4.1.2	Caracterização do Processo SW por Arco Retraído	51
4.1.3	Caracterização do Processo SW por Descarga Capacitiva.....	54
4.2	LEVANTAMENTO TÉRMICO NO VERSO DA CHAPA PARA PINOS SOLDADOS COM O PROCESSO SW	58
4.2.1	Processo SW por Arco Retraído.....	58
4.2.2	Processo SW por Descarga Capacitiva	82
5	CONCLUSÃO	86
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO SW POR ARCO RETRAÍDO.....	92
	APÊNDICE B – INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM PROTRUSÃO E RECUO NA SOLDAGEM COM O PROCESSO SW POR ARCO RETRAÍDO.....	101
	APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO SW POR DESCARGA CAPACITIVA.....	106
	APÊNDICE D – ESTUDO DE EXEQUIBILIDADE DO PROCESSO SW POR DESCARGA CAPACITIVA EM CHAPAS ESPESSAS	115
	APÊNDICE E – EXEMPLO PRÁTICO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA	119

1 INTRODUÇÃO

A soldagem com a utilização do arco voltaico como fonte de energia teve origem no início do século XX. Como qualquer tecnologia, a soldagem passou por diversas evoluções e descobertas, tendo-se tornado seus conceitos, classificações e definições mais complexos. Inicialmente utilizada para unir duas peças metálicas pré-formadas, hoje pode-se verificar outras aplicações, como revestimentos metálicos, ou para a fabricação de peças utilizando a própria tecnologia, conhecida por manufatura aditiva (Dutra, 2023).

No aspecto das evoluções de conceitos e definições, pode-se afirmar que hoje a soldagem é um processo de união de peças metálicas para diferentes finalidades, no qual as forças de união estabelecidas entre os materiais a serem unidos são de natureza similar àquelas existentes no interior dos mesmos, formando uma única estrutura. Desde a utilização do arco voltaico como fonte de energia, diversos processos de soldagem foram criados e desenvolvidos, como Arco Submerso, MIG/MAG, TIG, Eletrodo Revestido, Plasma, *Stud Welding* etc.

Dentre os diversos processos de soldagem a arco voltaico, o processo *Stud Welding* (SW), que será abordado neste estudo, foi desenvolvido há cerca de um século para aplicações na indústria de construção naval, em que foi utilizado para a fixação de *decks* de madeira sobre uma superfície metálica (Pires, 2005). Desde então, vem se desenvolvendo e sendo empregado em diversos outros setores da indústria. As melhorias construtivas nas fontes de soldagem permitiram um maior controle do processo, reduzindo a susceptibilidade a variações indesejadas por ocasião da soldagem.

Mesmo com as recentes melhorias, o processo é pouco difundido, principalmente quando trazido para o contexto nacional, onde poucas empresas o utilizam, normalmente em aplicações muito específicas e em grande volume, e mesmo assim, sem profundo conhecimento sobre as peculiaridades intrínsecas ao processo. Conseqüentemente, o processo é promissor para que novas pesquisas e técnicas possibilitem a utilização dele como solução alternativa em outras áreas ou setores ainda não explorados, buscando aumentar a produtividade e a qualidade do produto final.

Existe uma demanda na indústria de construção naval e offshore para fixação de componentes mecânicos por processos de soldagem que possuam uma redução

da energia de soldagem imposta pelo processo, ou capazes de reduzir, justificada pelo risco de danos, desde uma simples degradação até o risco de explosão, que um elevado aporte térmico poderia ocasionar aos materiais presentes no verso da estrutura metálica em que o componente será soldado, como por exemplo um revestimento de tinta ou um isolante térmico ou acústico, ou até mesmo um tanque de hidrocarboneto, sendo este último mais crítico por ser altamente volátil e com possibilidade de inflamabilidade. Outro fator extremamente relevante na indústria naval é a dificuldade de acesso aos diversos compartimentos de uma embarcação, tanto na fase de construção quanto durante a manutenção. O processo SW, devido aos seus curtos tempos de arco aberto, possibilita a efetiva redução da energia e da temperatura atingida. Inovações tecnológicas têm potencial para maximizar essa redução, sendo este o foco do presente trabalho.

Nesse contexto, este estudo se propõe a analisar o ciclo térmico no verso da chapa durante a soldagem de pinos pelo processo SW em diversas condições – diferentes diâmetros de pinos, diferentes espessuras de chapas e diferentes parâmetros de soldagem. bem como desenvolver conceitos sobre a caracterização desse processo através de aplicações práticas.

Ainda, é preciso ressaltar que a literatura sobre o processo SW é escassa, não havendo esse tipo de informação disponível sobre ciclos térmicos em soldagens com referido processo de soldagem, justificando o presente estudo, além da caracterização do processo de maneira geral. Preveem-se também contribuições para a tecnologia de aplicação e de instrumentação do processo SW.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral a confecção de uma ferramenta de consulta, por meio de gráficos, como subsídio à aplicação do processo SW. Será gerado, atreladamente, conhecimento sobre o comportamento térmico no verso da chapa bem como a influência dos parâmetros de soldagem desse processo sobre este aspecto. Desta forma, esta ferramenta poderá subsidiar a escolha do diâmetro do pino e dará suporte à parametrização do processo SW em aplicações com restrição térmica na Indústria Naval.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a consecução do objeto geral deste trabalho, são considerados os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar e criar conhecimento sobre as características gerais do processo SW e suas variantes;
- b) Avaliar e criar conhecimento sobre a influência dos parâmetros de soldagem, e conseqüentemente, da energia de soldagem imposta, causam sobre os ciclos térmicos no verso da chapa base;
- c) Verificar a parcela de contribuição do arco principal de soldagem em relação à energia total de soldagem;
- d) Obter a curva do ciclo térmico no verso da chapa para diferentes condições de soldagem (variante do processo SW, diâmetro do pino, ponta de ignição do pino, espessura da chapa base);
- e) Obter a temperatura máxima e tempo de resfriamento para diferentes condições de soldagem; e
- f) Contribuir para concepção e implementação de técnicas de monitoração do processo SW.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O PROCESSO STUD WELDING

O processo *Stud Welding* (SW) é um processo de soldagem por fusão com a finalidade de unir peças metálicas em forma de pino (ou semelhantes) com outras peças metálicas, utilizando o arco elétrico para promover a fusão entre as partes, no qual o próprio pino é usado como eletrodo.

Basicamente, um pino é encaixado em uma pistola, que é posicionada pelo operador sobre a chapa. Ao acionar o gatilho da pistola, o pino é retraído (ou não, a depender da variante do processo), a fonte de soldagem impõe uma corrente, ocorrendo a abertura do arco elétrico entre a superfície da base do pino e a superfície da chapa, criando uma poça fundida em ambas as superfícies. Após um determinado tempo, o pino é empurrado contra a peça, as poças de fusão do pino e da peça se misturam, se tornando uma única poça de fusão, ocorrendo em seguida a solidificação dela, soldando-se o pino na peça.

Características intrínsecas ao processo SW são o curto tempo de soldagem e a elevada corrente de soldagem. As principais variantes desse processo de soldagem são por arco retraído e por descarga capacitiva. Segundo Trillmich & Welz (2016), no processo SW por arco retraído, pode-se soldar pinos com diâmetros de até 25 mm, utilizando fontes de soldagem que impõem correntes de até 3.000 A, durante um tempo de até 2.000 ms; e no processo SW por descarga capacitiva, pode-se soldar pinos com diâmetro de até 10mm, utilizando uma fonte de soldagem com um banco de capacitores, que descarregam sua energia com pico de corrente de até 10.000 A, em um tempo de soldagem de até 5 ms.

A vantagem mais evidente no processo SW em relação a outros processos de soldagem, como Eletrodo Revestido, TIG e MIG/MAG, quando utilizados para soldar componentes metálicos em forma de pino, é a produtividade alcançada. Nesta perspectiva, Chambers (2001) afirma que o processo SW se destaca pela sua alta produtividade, uma vez que simplificou a montagem, reduziu o tempo e os custos operacionais na construção naval.

2.2 HISTÓRICO

O processo SW foi desenvolvido na primeira metade do século XX, e sobre a titularidade do inventor do processo, é possível afirmar que ainda existe uma certa dubiedade sobre tal definição. Historicamente, duas vertentes principais dividem a paternidade desse processo de soldagem, além de uma terceira menos difundida.

Sob o ponto de vista cronológico, é correto afirmar que Harold Martin, um engenheiro britânico, nos idos de 1915, desenvolveu um dispositivo compreendido por duas partes principais, na qual a primeira é um mecanismo de movimentação do pino, compreendido por um suporte de pinos, um solenoide e um aparelho de retenção mecânica ou elétrica, e a segunda como sendo um aparato de controle que permite a sequência de operações do dispositivo. Tal dispositivo fora patenteado em 1922 (Steele et *al.*, 1922).

Por outro lado, a segunda vertente é de que Edward Nelson seja o inventor do processo SW. Nelson trabalhou durante os anos anteriores e durante a 2ª Guerra Mundial como construtor naval no estaleiro Mare Island Naval Shipyard, pertencente à Marinha dos Estados Unidos (Stanley, 2019). Os primeiros registros de pinos sendo fixados por este processo remontam à segunda metade da década de 1930. Ainda segundo Stanley (2019), sua aplicação se baseava na adequada fixação e instalação desses *decks* de madeira em submarinos, navios e porta-aviões. Essa fixação era feita, até então, utilizando-se parafusos passantes, o que exigia a montagem de andaimes para permitir a instalação de porcas nos parafusos, prendendo assim a madeira à estrutura de aço.

Adicionalmente, era comum as porcas serem soldadas para evitar que folgassem e se soltassem com a vibração dos navios. O processo SW eliminou a necessidade de furação, rosqueamento e de acesso com andaimes por baixo dos *decks* de madeira, reduzindo drasticamente o tempo envolvido na instalação dos *decks*.

De suma importância durante a construção e reparos de navios, estima-se que a implementação do processo SW pela Marinha dos Estados Unidos durante a 2ª Guerra Mundial economizou cerca de 50 milhões de homens-horas na instalação de *decks* de madeira em submarinos, navios e porta-aviões (Stanley, 2019). Outro aspecto de relevante preocupação na indústria naval é com relação à estanqueidade das embarcações. Com a utilização do processo SW para criação de componentes

de fixação na estrutura dos navios, esta preocupação é eliminada, uma vez que não há mais a necessidade da etapa de furação. Diferentemente de Harold Martin, Edward Nelson conseguiu implementar a utilização do processo SW em escala industrial.

Como citado anteriormente, há ainda uma terceira hipótese da titularidade do inventor do processo SW, porém não é tão abordada na literatura. Trata-se de Andrew Foot-Stephens, que realizou seus testes em 1940 nos Estados Unidos (Kapler *et al.*, 2019).

Dentre as três vertentes apresentadas, cronologicamente é correto considerar que Harold Martin seja o inventor do processo, como pode ser comprovada pela patente nº US1410421A (Steele *et al.*, 1922), publicada em 1922, enquanto Edward Nelson teve sua patente nº US2191494A (Nelson, 1940), publicada somente em 1940.

Desde a sua invenção, o processo vem ganhando diversas aplicações em diferentes áreas. Como já mencionado, inicialmente o processo SW foi desenvolvido e implementado na indústria de construção naval. Segundo Kapler *et al.* (2019), o processo SW vem sendo utilizado na construção civil desde a década de 1960. De acordo com Trillmich & Welz (2016), o processo foi iniciado na indústria automotiva nos idos de 1963. Ramasamy (2002) apresenta estudo para aplicações de soldagem de pinos na indústria automotiva.

De acordo com Eyres & Bruce (2012), o processo de soldagem de pinos é amplamente usado, atualmente, para fixar suportes de tubos em hangares, bandejas para instalações elétricas, isolamento e fixações de madeira, bem como para soldar outros tipos de acessórios como ganchos e anéis. Segundo Trillmich & Welz (2016), nos tempos hodiernos, o processo SW vem sendo aplicado, além das áreas já citadas, em diversos outros setores da indústria, dentre os quais destacam-se: engenharia elétrica (produção de aparelhos eletrodomésticos e instalações elétricas), construção de usinas de energia e fornos, construção de boilers e tanques, proteção antidesgaste com soldagem de pinos de material duro (máquinas de construção, máquinas agrícolas, equipamentos de extração e processamento de matéria-prima).

Segundo Hsu & Mumaw (2011), o processo pode se tornar sensível à variação de parâmetros secundários devido ao baixo tempo de soldagem e às elevadas correntes aplicadas. Nos últimos anos é possível observar diversas melhorias construtivas nas fontes de soldagem, que permitem o maior controle do processo, reduzindo sua susceptibilidade a variações indesejadas. Essas melhorias ocorreram principalmente na malha de controle de corrente da fonte de soldagem e no design

geral da pistola, permitindo um movimento mais preciso do pino e sincronizado com a fonte durante a soldagem (Ramasamy et al., 2002).

2.3 VARIAÇÕES DO PROCESSO SW

Tendo em vista a tecnologia empregada na geração do arco elétrico, podem-se destacar diferentes variantes do processo SW. A literatura e normas técnicas dividem o processo SW em duas grandes famílias:

a) Processo SW por arco retraído:

- Processo SW por arco retraído com anel cerâmico ou gás de proteção;
- Processo SW por arco retraído de ciclo curto; e
- Processo SW por arco retraído com descarga capacitiva.

b) Processo SW por descarga capacitiva (ou com ponta de ignição):

- Processo SW por descarga capacitiva com contato inicial; e
- Processo SW por descarga capacitiva com *gap* inicial.

A diferença entre as duas primeiras variações do processo SW por arco retraído se dá basicamente pelo tempo de soldagem. Enquanto o processo SW por arco retraído com anel cerâmico ou gás de proteção apresentam tempo de soldagem maior que 100 ms, o processo SW por arco retraído de ciclo curto, como o próprio nome já diz, apresenta um tempo inferior, entre 10 e 100 ms. Devido a essa diferenciação no tempo de soldagem, o processo SW por arco retraído com anel cerâmico ou gás de proteção permite a soldagem de pinos de diâmetros maiores, de até 25 mm, enquanto que o processo SW por arco retraído de ciclo curto permite a soldagem de pinos de até 12 mm de diâmetro. Além disso, tendo em vista o curto tempo de soldagem, o processo SW por arco retraído de ciclo curto, normalmente, não necessita de proteção da poça de fusão. No que tange à arquitetura eletrônica embarcada na fonte de soldagem, para essas duas variantes, a energia fornecida é comandada por uma fonte de soldagem retificadora ou inversora.

Já no processo SW por arco retraído com descarga capacitiva, a energia é fornecida por um banco de capacitores, com um tempo de soldagem de 3 a 10 ms. Devido ao curto tempo de soldagem, não há necessidade de proteção da poça de fusão, e é utilizada para soldagem de pinos de até 8 mm de diâmetro.

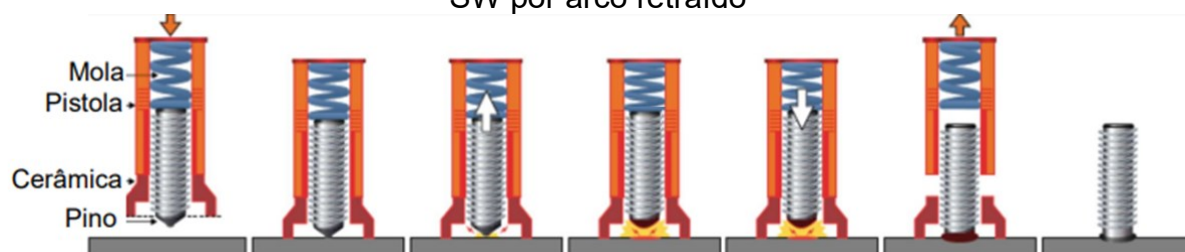
O processo SW por descarga capacitiva (ou com ponta de ignição) é um processo extremamente rápido, com tempo de soldagem de até 3 ms, sem utilização de proteção da poça de fusão, para soldagem de pinos até 8 mm de diâmetro. No que tange à arquitetura eletrônica da fonte de soldagem, assim como no processo SW por arco retraído com descarga capacitiva, a energia é fornecida por um banco de capacitores.

Esse estudo irá abordar apenas a variante com anel cerâmico ou gás de proteção do processo SW por arco retraído, e ambas as variantes do processo SW por descarga capacitiva. Serão apresentados maiores detalhes e características destes processos ao longo deste capítulo e dos próximos.

2.3.1 Processo SW por Arco Retraído

Na modalidade por arco retraído (Figura 1), a pistola de soldagem com o pino é posicionada na chapa base e ao ser acionado o gatilho da pistola pelo operador, a fonte impõe uma corrente baixa, denominada de pré-corrente. Logo após, o pino é retraído e o arco piloto é estabelecido. Em seguida, a fonte estabelece a corrente principal, ocorrendo a fusão parcial do pino e da chapa base. Após o tempo de arco aberto pré-selecionado na fonte, o pino é empurrado pela mola (ou por um motor linear) contra a chapa base, ocorrendo a soldagem do pino. Este tipo de processo requer algum tipo de proteção, como utilização de gás de proteção ou um anel cerâmico.

Figura 1 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do processo SW por arco retraído



Fonte: elaborado pelo autor

2.3.2 Processo SW por Descarga Capacitiva

Por outro lado, o processo de soldagem de pinos por descarga capacitiva (DC) não requer proteção, dada a brevidade do processo, em que o tempo de arco aberto tem uma duração inferior a 3 ms, além de atingir patamares de corrente da ordem de 10.000 A (Trillmich & Welz, 2016). O princípio de operação deste processo também é por arco elétrico, e a diferença para o processo por arco retraído está no fato de que este arco é formado por uma corrente de descarga de um banco de capacitores, carregado com uma tensão selecionada previamente, ao contrário do arco retraído, que requer uma fonte de corrente contínua (Nishikawa, 2003).

De acordo com Oh *et al.* (2007), tendo em vista que a energia utilizada para gerar o arco elétrico vem da energia armazenada no banco de capacitores, a qualidade da solda é geralmente mais baixa porque vazios se formam na solda e a dureza da solda é alta devido à elevada taxa de resfriamento, o que limita as aplicações da soldagem de pinos com o processo SW por descarga capacitiva.

A principal vantagem do processo de soldagem de pinos com descarga capacitiva, como já mencionado, é o tempo muito curto de execução. Em contrapartida, funde menos material, ocasionando a formação de uma zona fundida menor. Nesta variante, a tensão de carga do banco de capacitores torna-se um parâmetro de soldagem, uma vez que está diretamente ligada à energia de soldagem que será descarregada pelo banco e entregue à soldagem. Nesse sentido, Harada *et al.* (2016) mostra que para tensões menores de carga do banco de capacitores, a carga de ruptura por tração é menor e a fratura ocorre na solda, e para tensões maiores de carga do banco de capacitores, a carga de ruptura por tração é maior e a fratura não ocorre mais na região da solda, mas na chapa base, aumentando a confiabilidade deste processo.

Também devido ao baixo tempo de soldagem, uma outra característica observada é que, quando comparado com o processo SW por arco retraído, a energia de soldagem envolvida é menor, e conseqüentemente, o aquecimento da chapa também é reduzido, levando a uma zona afetada pelo calor (ZAC) menor (Zhang *et al.*, 2022).

Segundo Trillmich & Welz (2016), devido ao curto tempo de soldagem, os pinos para essa variante do processo SW possuem um flange com um diâmetro de 1 a 2 mm maior que o diâmetro do pino, de modo que amplie a área da soldagem, para

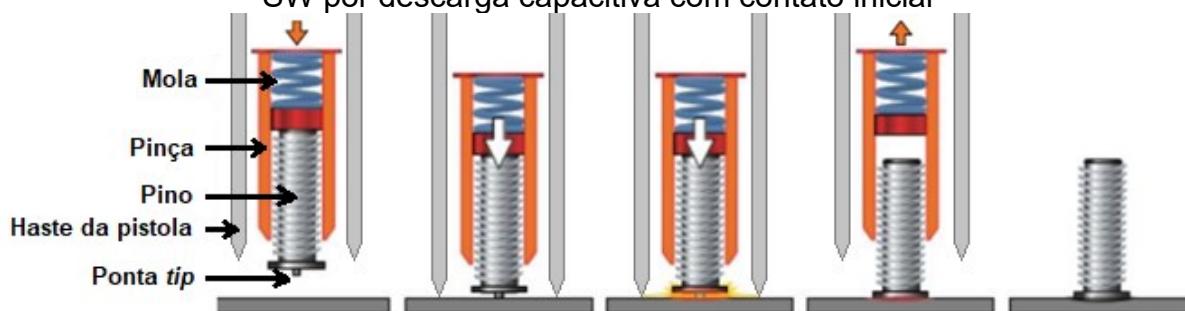
que, mesmo se houver falta de fusão de 30 a 40% da área total, a resistência do pino seja alcançada. Uma outra característica do processo SW por descarga capacitiva é que não requer proteção da poça de fusão (Magda *et al.*, 2018).

O processo de soldagem de pinos DC possui duas variantes: com contato inicial e com *gap* inicial. A diferença se dá basicamente na elevação, ou não, do pino antes da abertura do arco elétrico.

2.3.2.1 Com Contato Inicial

No processo DC com contato inicial (Figura 2), ao ser acionado o gatilho da pistola, a fonte de soldagem descarrega a energia armazenada no banco de capacitores da fonte de soldagem, uma vez que o pino já se encontra, estático, em contato com a peça por meio da ponta *tip*, e então o arco é aberto. Neste momento, a ponta *tip* do pino é fundida instantaneamente, gerando uma pequena distância entre o pino e a peça. Esse espaço permite que a mola da pistola, que está contraída, atue e dispare o pino em direção à peça. Neste processo, o pino inicia esta trajetória estático, ou seja, com velocidade igual a zero.

Figura 2 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do processo SW por descarga capacitiva com contato inicial



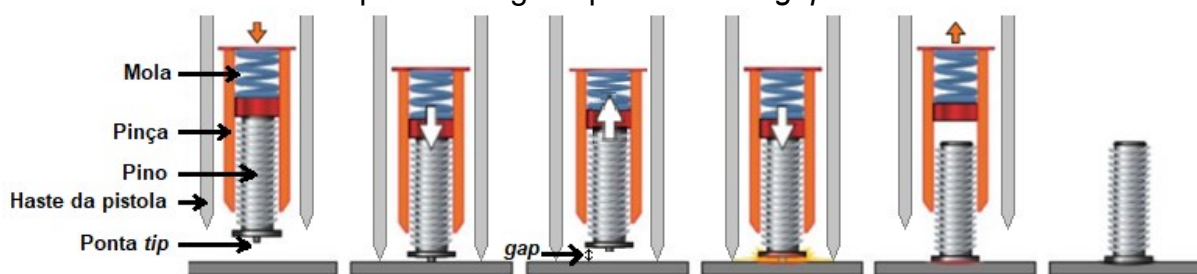
Fonte: elaborado pelo autor

2.3.2.2 Com Gap Inicial

Já no processo DC com *gap* inicial (Figura 3), diferentemente daquela com contato inicial, existe um solenoide que atua ao ser acionado o gatilho, que suspende o pino, contraindo assim a mola da pistola. Assim que o solenoide para de atuar, a mola, que se encontra contraída, é liberada e empurra o pino contra a peça. A energia armazenada no banco de capacitores da fonte de soldagem é descarregada no

instante em que a ponta *tip* do pino encosta na peça. Neste exato momento, o arco é aberto, sendo a ponta *tip* fundida instantaneamente, e se tem início a formação da poça de fusão no pino. Diferentemente do processo com contato inicial, em que o pino inicia com velocidade igual a zero quando o arco é aberto, no processo com *gap* inicial, não há um freio mecânico do pino na abertura do arco, continuando o seu deslocamento em direção à peça.

Figura 3 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do processo SW por descarga capacitiva com *gap* inicial



Fonte: elaborado pelo autor

2.4 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

A correta parametrização do processo SW é de extrema relevância para o resultado da solda, sendo um elemento determinante para impedir o surgimento de descontinuidades e defeitos no cordão de solda, que na maioria das vezes surge pela negligência durante a regulação dos parâmetros, seja na fonte de soldagem ou na pistola de soldagem. Os principais parâmetros de soldagem serão apresentados a seguir.

2.4.1 Processo SW por Arco Retraído

2.4.1.1 Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem no processo SW por arco retraído é regulada na fonte, que irá comandar durante o tempo de arco principal o valor da corrente selecionada. De acordo com a norma ISO 14555:2014(E) (2014), o valor da corrente da soldagem (I), em amperes (A), é definido de acordo com o diâmetro do pino (d), em milímetros (mm), através das Equações 1 e 2:

$$I = 80 \times d \quad \text{para } d \leq 16 \quad (1)$$

$$I = 90 \times d \quad \text{para } d > 16 \quad (2)$$

2.4.1.2 *Tempo de Soldagem*

O tempo de soldagem no processo SW por arco retraído também é regulado na fonte, e representa o tempo em que a fonte irá impor a corrente para estabelecer o arco principal. De acordo com a norma ISO 14555:2014(E) (2014), o valor do tempo de soldagem (t_s), em milissegundos (ms), é definido de acordo com o diâmetro do pino (d), em milímetros (mm), através das Equações 3 e 4:

$$t_s = 0,02 \times d \quad \text{para } d \leq 12 \quad (3)$$

$$t_s = 0,04 \times d \quad \text{para } d > 12 \quad (4)$$

2.4.1.3 *Pré-corrente de Soldagem*

A pré-corrente de soldagem no processo SW por arco retraído representa uma corrente imposta pela fonte para abertura de um arco piloto antes de ser comandada a corrente principal. Normalmente o valor dessa pré-corrente já vem programada pelo fabricante da fonte de soldagem, na faixa de 80 a 120 A, a depender da fonte de soldagem, não sendo possível a escolha pelo operador. Essa pré-corrente normalmente é imposta pela fonte pouco antes do início do recuo do pino, ocasionando a abertura de um arco piloto quando o pino inicia seu recuo.

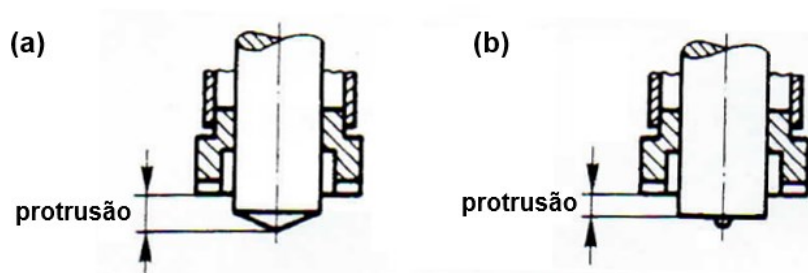
2.4.1.4 *Tempo de Pré-corrente*

O tempo de pré-corrente no processo SW por arco retraído também pode ser regulado na fonte de soldagem, e representa o tempo em que a fonte irá impor a pré-corrente de soldagem durante o arco piloto. Ao término desse tempo, a fonte inicia a imposição da corrente principal.

2.4.1.5 Protrusão do pino

A protrusão do pino no processo SW por arco retraído é regulado na pistola, e representa a distância entre a extremidade do pino e a extremidade do anel cerâmico (para caso em que se usa anel cerâmico) ou a distância entre a extremidade do pino e a extremidade do bocal da pistola (para os casos em que não se usa anel cerâmico).

Figura 4 – Representação do parâmetro Protrusão conforme o tipo de ponta do pino: (a) cônica e (b) esfera de alumínio



Fonte: Trillmich & Welz (2016)

Cabe ressaltar que na literatura, dependendo do tipo da ponta de ignição do pino, é diferente o ponto de medição da extremidade do pino que será adotado como referência. Para pinos com ponta cônica, o ponto de referência é a própria ponta do pino, conforme é apresentado na Figura 4a. Já para pinos com ponta de esfera de alumínio, a esfera é desconsiderada, e a medição é realizada a partir da face do pino, conforme é apresentado na Figura 4b.

A regulagem da protrusão do pino é feita manualmente através do deslocamento de um conjunto de hastes, conforme é apresentado na Figura 5. A seta azul representa a movimentação do conjunto das hastes.

Figura 5 – Representação da regulagem do parâmetro protrusão na pistola de soldagem

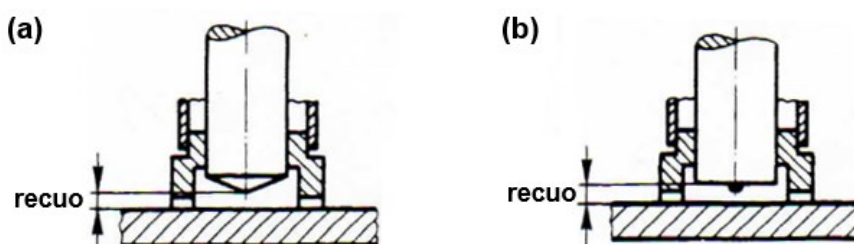


Fonte: elaborado pelo autor

2.4.1.6 *Recuo do pino*

O recuo do pino no processo SW por arco retraído também é regulado na pistola de soldagem, e representa a distância em que o pino é recuado por meio de um dispositivo de movimentação da pistola. Essa distância é medida entre a chapa base e a extremidade do pino quando este atinge a posição máxima de retração. Do mesmo modo como ocorre no parâmetro da protrusão, a literatura diferencia o ponto da extremidade do pino a ser adotado como referência. Para pinos com ponta cônica, a medição é feita pela própria ponta do pino, conforme é apresentado na Figura 6a. Já para pinos com ponta de esfera de alumínio, a esfera é desconsiderada, e a medição é realizada a partir da face do pino, conforme é apresentado na Figura 6b.

Figura 6 – Representação do parâmetro Recuo conforme o tipo de ponta do pino: (a) cônica e (b) esfera de alumínio



Fonte: Trillmich & Welz (2016)

2.4.1.7 *Outros parâmetros*

Assim como em outros processos de soldagem, o processo SW também pode utilizar proteção gasosa. Nesse caso, gás de proteção passa a ser também um parâmetro de soldagem, bem como a vazão desse gás. Ainda, é possível escolher na fonte de soldagem o tempo de pré-gás, que representa o tempo em que a fonte e a pistola permitem a passagem de gás antes de iniciar a soldagem, com o intuito de expulsar o ar atmosférico da região onde ocorrerá a soldagem, preenchendo-a com o gás de proteção, de modo a proteção da poça de fusão, tanto no pino como na chapa base, traga benefícios como a estabilidade do arco e efeitos nas propriedades metalúrgicas.

Ao longo dos anos, o processo SW por arco retraído, como qualquer tecnologia, se desenvolveu, não só no tipo de arquitetura embarcada na fonte de

soldagem, como na pistola de soldagem. Nesse sentido, pistolas de soldagem foram aprimoradas, permitindo dotá-las com diferentes tipos de mecanismos de movimentação do pino. Adicionalmente, estudos possibilitaram o desenvolvimento de tecnologias avançadas para controle e estabilização do arco elétrico durante a soldagem através do emprego de um campo magnético no bocal da pistola.

Dependendo do mecanismo de movimentação de pino equipado na pistola, a velocidade de descida (ou mergulho) do pino pode ser um parâmetro de soldagem. Alguns fabricantes possuem pistolas em que a movimentação do pino é feita através de um motor linear, controlando o deslocamento e a velocidade de descida do pino. Nessas pistolas com motor linear, a penetração do pino é mais um parâmetro existente, representado pela distância que o pino vai penetrar na chapa base.

Nas pistolas de soldagem com mecanismo de movimentação do pino através de mola e solenoide pode haver algum amortecedor que controle indiretamente a velocidade de mergulho do pino em direção à chapa base.

No que tange à tecnologia assistida por campo magnético no bocal da pistola, uma corrente elétrica de baixa intensidade, inferior a 1,5 A, passa por uma bobina posicionada no bocal da pistola, fazendo gerar um campo magnético, que interage com as forças eletromagnéticas inerentes ao arco elétrico do circuito de soldagem, promovendo o fluxo rotacional da poça de fusão, iniciando no centro do pino em direção às bordas (Cramer *et al.*, 2014). Para soldagem de pinos que usa essa tecnologia assistida por campo magnético, essa corrente elétrica de baixa intensidade que alimenta a bobina torna-se um parâmetro de soldagem. Os pinos utilizados com o emprego dessa tecnologia possuem uma geometria diferente, com uma ponta fina.

2.4.2 Processo SW por Descarga Capacitiva

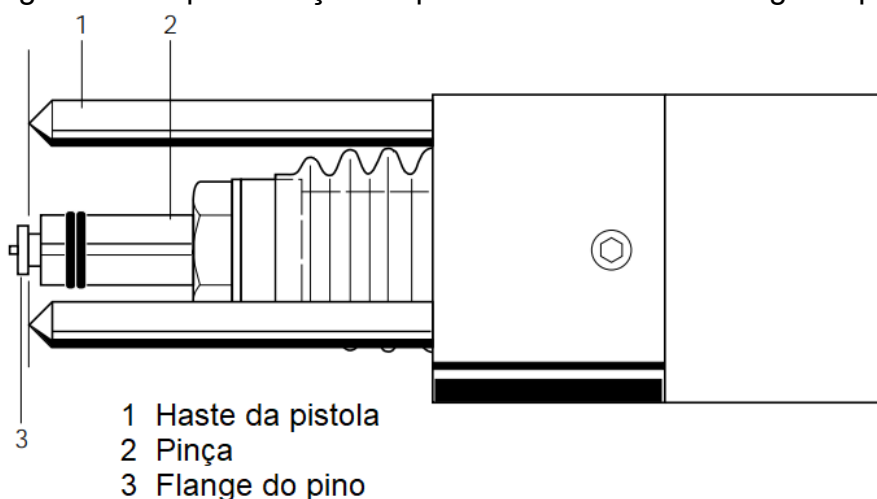
2.4.2.1 Tensão de Carga

A tensão de carga é selecionada na fonte de soldagem e representa a tensão com a qual será efetuado o carregamento do banco de capacitores.

2.4.2.2 Protrusão do pino

Assim como no processo SW por Arco Retraído, a protrusão do pino no processo SW por descarga capacitiva representa a distância entre a extremidade do pino e a extremidade do bocal da pistola. Nesse processo o pino possui um flange, que de acordo com a norma ISO 14555:2014(E) (2014), tem a função de aumentar a área da solda, e assim, melhorar a resistência mecânica da união. Normalmente o flange é utilizado como o valor da protrusão, posicionando a face do superior do flange no mesmo plano da extremidade das hastes da pistola, como é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Representação da protrusão através do flange do pino

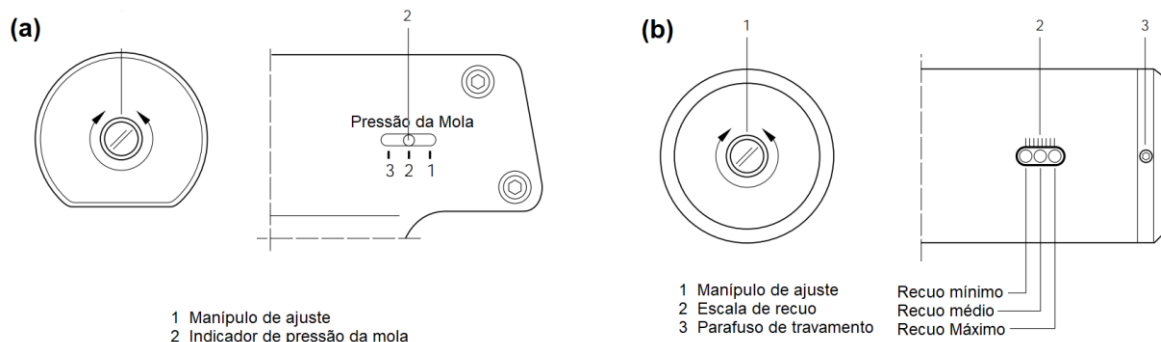


Fonte: Soyer (1995)

2.4.2.3 Pressão da mola e Recuo do pino

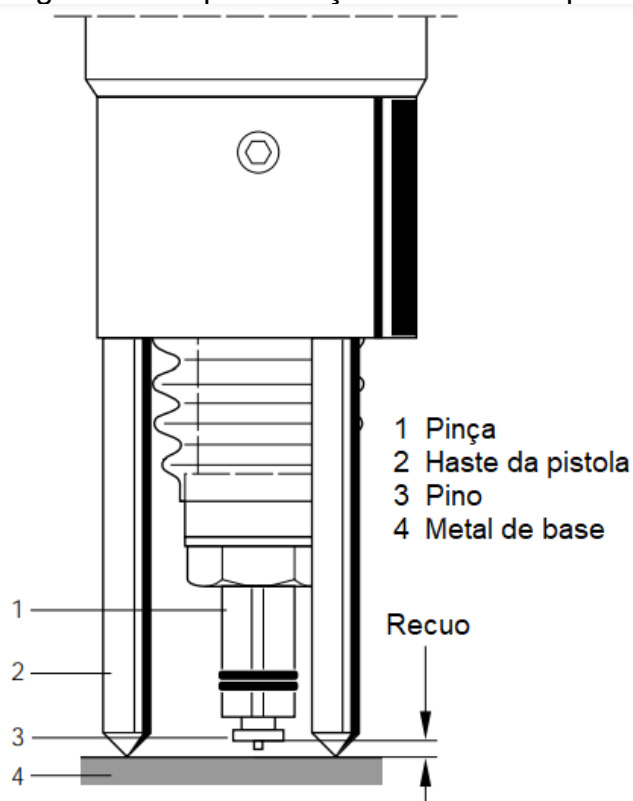
A pressão da mola é ajustada na pistola de soldagem, mediante o giro de um manípulo de ajuste, que movimenta o batente superior no interior da pistola. A Figura 8a apresenta como é feito o ajuste da pressão da mola na pistola para o processo DC com contato inicial, que pode ser selecionada como: pressão baixa (1), pressão média (2) e pressão alta (3). Já para o processo DC com *gap* inicial, como ocorre o recuo do pino, esses mesmos ajustes significam um recuo máximo, médio e mínimo, respectivamente, como é possível observar na Figura 8b. Já a Figura 9 mostra a representação do recuo do pino.

Figura 8 – Ajuste da pressão da mola: (a) Pistola SOYER/PS-3K (processo DC com contato inicial) e (b) Pistola SOYER/PS-3 (processo DC com *gap* inicial)



Fonte: Soyer (1995)

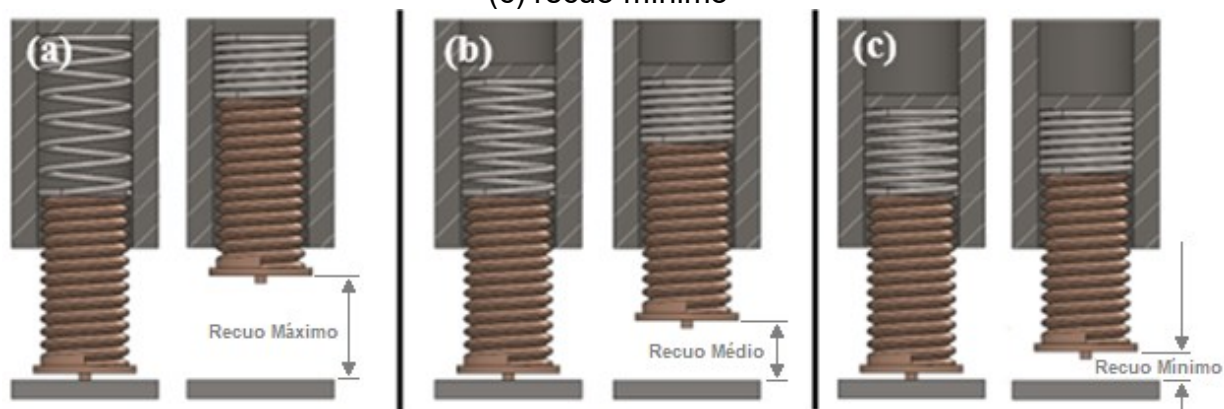
Figura 9 – Representação do recuo do pino



Fonte: Soyer (1995)

O ajuste do manípulo promove a movimentação do batente superior da mola. A Figura 10 ilustra a diferença do valor do recuo dos pinos para cada uma das diferentes posições na escala do manípulo através do ajuste através dele, permitindo assim, recuo máximo (Figura 10a), recuo médio (Figura 10b) e recuo mínimo (Figura 10c).

Figura 10 – Representação do recuo do pino: (a) recuo máximo, (b) recuo médio e (c) recuo mínimo



Fonte: elaborado pelo autor

2.4.2.4 Velocidade de descida (ou mergulho) do pino

A velocidade de mergulho do pino é, em geral, determinada por uma mola e pela massa das peças móveis da pistola, e possui valores normais entre 0,5 e 1,5 m/s (ISO 14555:2014(E), 2014). Em algumas pistolas, como as que possuem um sistema de movimentação de pinos por motor linear, esse parâmetro pode ser regulado diretamente. Por outro lado, nas pistolas que o sistema de movimentação de pinos não é feito por um motor linear, esse parâmetro pode ser regulado indiretamente através do ajuste da pressão da mola. A velocidade de mergulho do pino, juntamente com o comprimento da ponta *tip* determinam indiretamente o tempo de arco aberto.

2.5 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO PROCESSO SW POR ARCO RETRAÍDO

A parametrização correta do processo SW por arco retraído é de suma importância para a boa qualidade da solda, sendo um elemento primordial para prevenir o surgimento de discontinuidades ou defeitos da solda. A parametrização não passa apenas pela escolha de valores na fonte de soldagem, mas também pela correta regulagem da pistola de soldagem. Dessa forma, exige do operador um certo conhecimento sobre o processo, de modo que possa corrigir algum defeito indesejável pela simples alteração de um parâmetro, ou um conjunto deles.

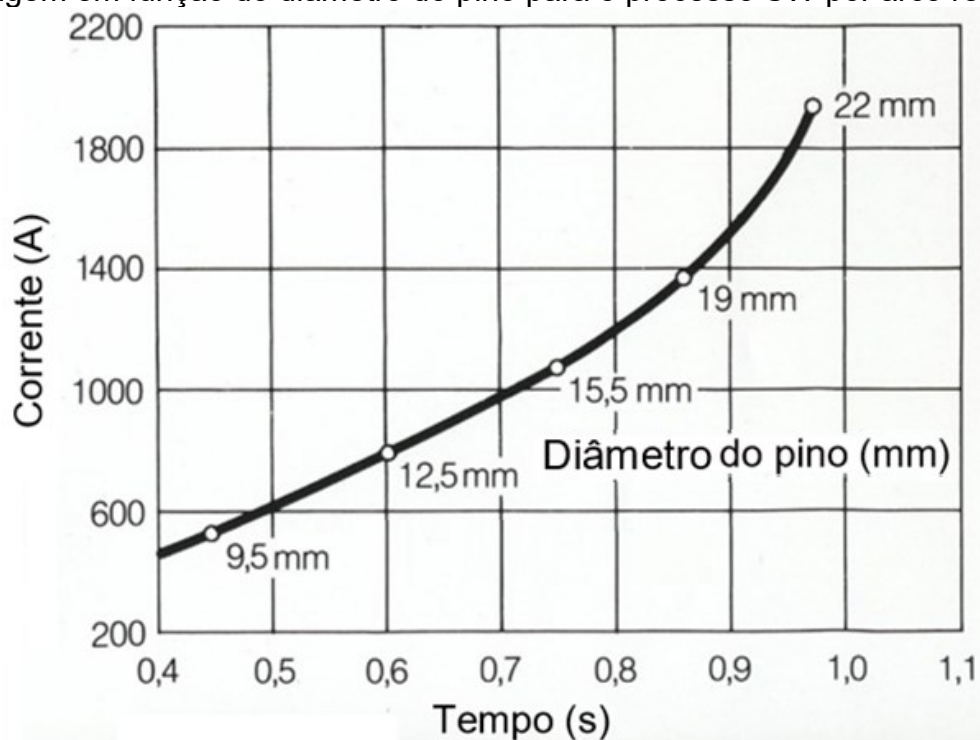
Pode-se citar como defeitos indesejáveis no processo SW: mordeduras, falta de fusão, excesso de fusão, excesso de colar), escorrimento do colar (principalmente

em soldas fora da posição plana de soldagem), respingos. Além destes, devido ao elevado valor das correntes de soldagem, que é intrínseco ao processo, existe a possibilidade de acontecer o desvio do arco elétrico por efeito de sopro magnético.

Desta forma, a literatura e os fabricantes recomendam alguns parâmetros de soldagem com base nas características do pino e da modalidade do processo SW, e normalmente, os parâmetros são apresentados em função do diâmetro do pino.

A corrente de soldagem e o tempo de soldagem estão atrelados diretamente à energia introduzida durante o processo de soldagem. A Figura 11 apresenta um gráfico para a corrente de soldagem e tempo de soldagem sugeridos em função do diâmetro do pino, para o processo SW por arco retraído.

Figura 11 – Parâmetros recomendados de corrente de soldagem e tempo de soldagem em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído



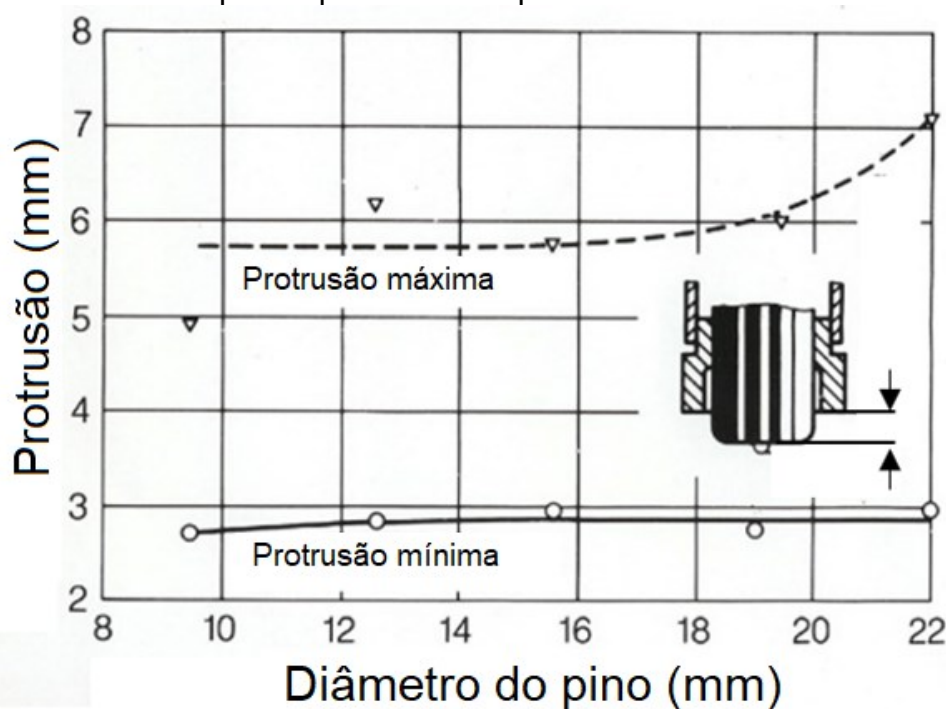
Fonte: Soyer (2006)

É possível extrair do gráfico apresentado na Figura 11, por exemplo, que para soldar um pino de 10 mm de diâmetro (M10), é sugerido utilizar, aproximadamente, uma corrente de soldagem de 600 A e um tempo de soldagem de 500 ms. Já para um pino de 20 mm de diâmetro (M20), é recomendado, aproximadamente, uma corrente de soldagem de 1.500 A e um tempo de soldagem de 900 ms. Além das variáveis

corrente e tempo, a protrusão e o recuo do pino são outros dois parâmetros que influenciam sobremaneira na soldagem de pinos.

A protrusão possui uma relação intrínseca com a penetração do pino na solda, pois este tende a retornar à sua posição inicial que foi regulada. Como a ponta do pino encontra-se fundida, devido a energia de soldagem introduzida pela combinação dos parâmetros de soldagem escolhidos, ao retornar à sua posição inicial, as poças de fusão do pino e da chapa base se misturam, formando o denominado colar de solda. A Figura 12 apresenta um gráfico com os limites mínimo e máximo de valores de protrusão sugeridos em função do diâmetro do pino, para o processo SW por arco retraído, com valores mínimos e máximos.

Figura 12 – Parâmetros recomendados de protrusão em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído



Fonte: Soyer (2006)

Uma protrusão excessiva pode implicar em um impacto significativo na peça, podendo acarretar respingos e/ou em um colar excessivo. Por outro lado, quando é realizada a soldagem com uma protrusão muito baixa, a soldagem do pino tende a apresentar discontinuidades ou defeitos indesejáveis, como um colar de solda com dimensões reduzidas ou até mesmo falta de fusão.

O recuo do pino tem uma relação indireta com a energia introduzida durante o processo de soldagem de pinos, uma vez que ele influencia no valor da tensão. No

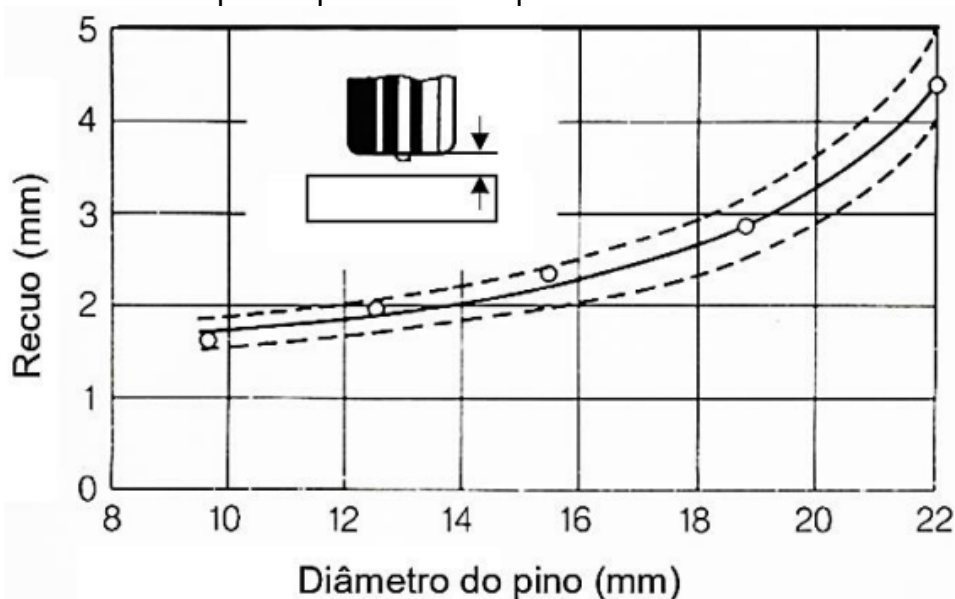
processo SW por arco retraído, a corrente de soldagem é mantida constante pela fonte de soldagem, ficando a tensão livre para variar de acordo com diversos fatores, dentre os quais pode-se citar: características do material do pino e da chapa base, temperatura dos materiais, comprimento do arco, gás de proteção, valor da corrente, estado de oxidação dos materiais (pino e chapa base) e impurezas.

Nesse sentido, o comprimento do arco está diretamente ligado ao recuo do pino. Quanto maior o recuo do pino maior será o comprimento do arco, e conseqüentemente, maior será a tensão, e assim, maior será a energia de soldagem.

A norma ISO 14555:2014(E) (2014) estabelece que a tensão do arco é determinada principalmente pelo recuo do pino e pela corrente de soldagem, e que os valores normais variam entre 20 e 40 V. Ainda de acordo com a referida norma, impurezas da superfície, como óleo ou graxa, aumentam a tensão do arco em comparação com o estado normal, enquanto os gases inertes a reduzem. Segundo Trillmich & Welz (2016), para valores recomendados de parâmetros de soldagem, a tensão do arco se mantém em valores em torno de 30 V, e que para aplicação com gás de proteção contendo uma alta proporção de argônio, a tensão do arco se mantém em valores aproximados de 27 V, o que significa uma redução de 10% da tensão do arco.

A Figura 13 apresenta um gráfico com os valores recomendados de recuo do pino, em função do seu diâmetro, para o processo SW por arco retraído.

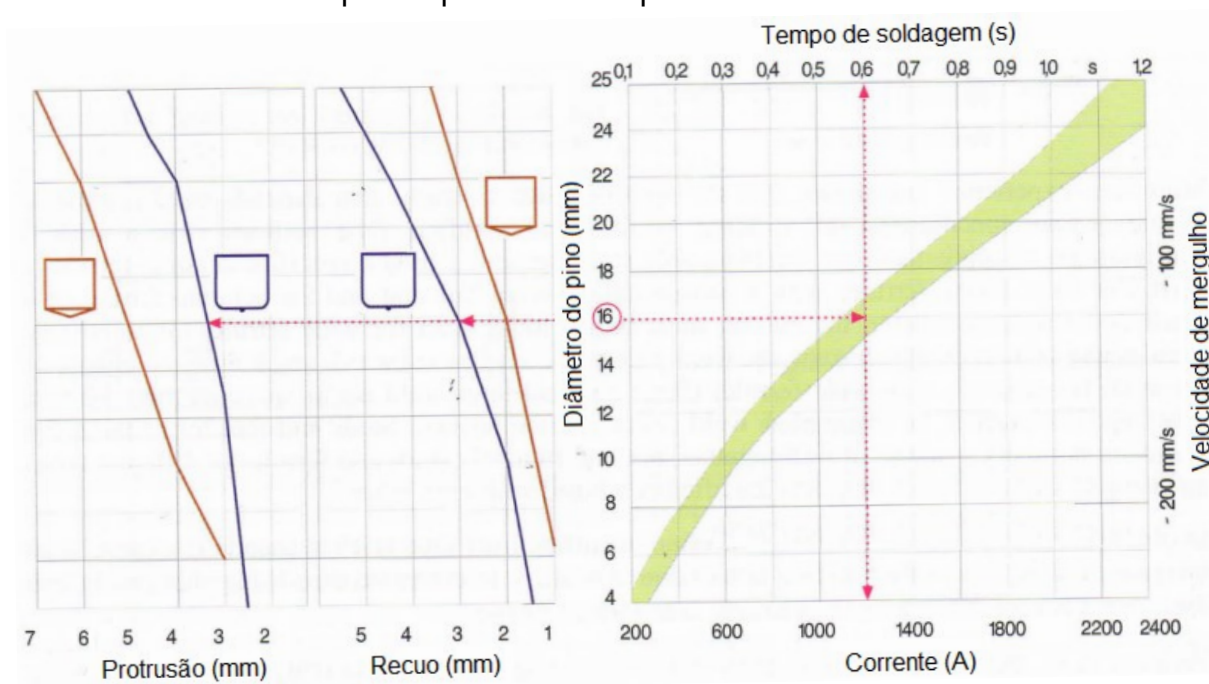
Figura 13 – Parâmetros recomendados de recuo em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído



Fonte: Soyer (2006)

Trillmich & Welz (2016) apresenta um único gráfico (Figura 14) contendo os valores recomendados para os seguintes parâmetros de soldagem: corrente de soldagem, tempo de soldagem, prostrusão e recuo do pino. Assim como apresentado nos diagramas anteriores com os valores recomendados de parâmetros, o parâmetro de entrada no gráfico é o diâmetro do pino. No gráfico é possível verificar o exemplo de obtenção dos parâmetros de soldagem com o processo SW por arco retraído para um pino de 16 mm de diâmetro com uma ponta de esfera de alumínio: corrente de soldagem de 1.200 A, tempo de soldagem de 0,6 s, recuo de 3 mm e prostrusão de aproximadamente 3,3 mm. É possível observar que esses valores são diferentes dos parâmetros recomendados por Soyer (2006) para um pino de mesmo diâmetro: corrente de soldagem de 1.150A e tempo de soldagem de 0,78 (Figura 11), prostrusão entre 3 e 6 mm (Figura 12) e recuo entre 2 e 2,5 mm (Figura 13).

Figura 14 – Parâmetros de soldagem recomendados em função do diâmetro do pino para o processo SW por arco retraído

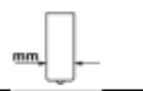













Fonte: Trillmich & Welz (2016)

A Figura 14 também apresenta outra questão que influencia a parametrização da prostrusão e do recuo, que é a característica da ponta de ignição do pino. Para pinos com ponta cônica, a prostrusão é maior quando comparado para um pino de mesmo diâmetro, mas com ponta de esfera de alumínio. Já para o recuo, os pinos de ponta cônica requerem um valor menor, quando comparado com o recuo de um pino de

mesmo diâmetro com ponta de esfera de alumínio. Essa mesma característica na diferenciação dos parâmetros de soldagem de acordo com o tipo de ponta do pino também pode ser observada nas recomendações da fabricante SOYER, conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Recomendação de parâmetros de soldagem de pinos para o processo SW por arco retraído

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

Fonte: Soyer (2013)

2.6 ENERGIA DE SOLDAGEM

Energia de soldagem já é um conceito bastante difundido na literatura de soldagem a arco elétrico, podendo ser definida como a energia introduzida ou adicionada a um material (chapa base) por unidade de comprimento linear do cordão de solda. Usualmente, a energia de soldagem (E) é apresentada na unidade J/mm e calculada pela Equação 5:

$$E = \frac{\eta \times U \times I}{v} \quad (5)$$

Onde η – eficiência térmica do processo

U – tensão, em volts (V)

I – corrente elétrica, em amperes (A)

v – velocidade linear de soldagem, em mm/s

Um aspecto relevante a se considerar é que a energia de soldagem depende muito do processo de soldagem, uma vez que cada processo tem sua faixa usual de η , bem como das faixas de U e I , também intrínsecas a cada processo. Outro fator

não menos importante que influencia na energia de soldagem é a técnica utilizada com relação à determinação de v . (Zeemann, 2003).

Por outro lado, apesar do processo SW ser um processo a arco voltaico, a energia de soldagem imposta pelo processo SW não pode ser calculada pela equação usualmente conhecida na literatura de soldagem. Tal fato se justifica pelo processo SW ocorrer numa pequena área fixa da chapa base, ou seja, não há o deslocamento do eletrodo (pino) em direção paralela à superfície da chapa base, e conseqüentemente, não existe uma velocidade linear de soldagem.

Nesse contexto, Trillmich & Welz (2016) apresentam que a energia de soldagem (E) para o processo SW deve ser calculada através da Equação 6, cuja unidade é em J:

$$E = U \times I \times t \quad (6)$$

Onde U – tensão, em volts (V)

I – corrente elétrica, em amperes (A)

t – tempo de soldagem, em segundos (s)

Outrossim, ainda segundo Trillmich & Welz (2016), apenas uma parte dessa energia é utilizada para fundir a ponta do pino e a superfície da chapa base, sendo a outra parte da energia dissipada por condução térmica na chapa base e no pino, além de perdas devido à evaporação, radiação e respingos. Nesse sentido, levando-se em consideração a parte da energia que é perdida, o presente estudo propõe que a energia de soldagem (E) para o processo SW seja calculada através da Equação 7, cuja unidade é em J:

$$E = \eta \times U \times I \times t \quad (7)$$

Onde η – eficiência térmica do processo

U – tensão, em volts (V)

I – corrente elétrica, em amperes (A)

t – tempo de soldagem, em segundos (s)

Adicionalmente, é preciso ressaltar que o processo SW ainda é pouco estudado, quando comparado com outros processos como MIG/MAG, TIG, Eletrodo

Revestido e Arco Submerso, não tendo ainda apresentado na literatura um valor, ou uma faixa, de eficiência térmica do processo.

A respeito dos valores da potência elétrica de soldagem, que é classicamente definida como o produto da tensão pela corrente, existem diferentes métodos de cálculo desse parâmetro. Nessa conjuntura, Scotti *et al.* (2007) apresentam um estudo sobre os diferentes métodos de cálculo de potência utilizados pelos usuários de soldagem e concluem que os mais indicados a serem utilizados são o da Potência Instantânea e o da Potência Instantânea RMS, tendo em vista que estes métodos podem ser aplicados mesmo que as variáveis tensão e corrente sejam dependentes.

Assim sendo, neste trabalho será adotado a Potência Instantânea (P_{inst}), que pode ser calculada através da Equação 8, cuja unidade é em W:

$$P_{inst} = \frac{(\sum_{i=1}^n U_i \times I_i)}{n} \quad (8)$$

Onde U_i – tensão instantânea, em volts (V)
 I_i – corrente elétrica instantânea, em amperes (A)
 n – número de amostras da aquisição

Desta forma, substituindo a Equação 8 na Equação 7, a energia de soldagem (E) para o processo SW será calculada a partir da Equação 9:

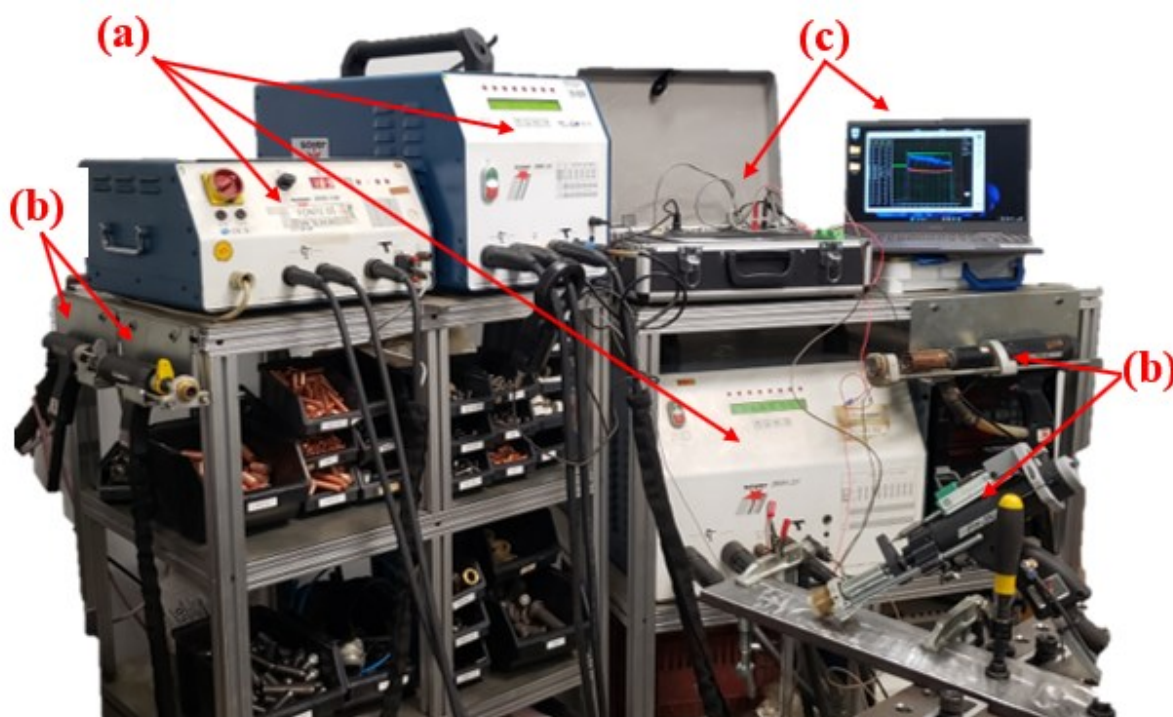
$$E = \eta \times \frac{(\sum_{i=1}^n U_i \times I_i)}{n} \times t \quad (9)$$

Onde η – eficiência térmica do processo
 U_i – tensão instantânea, em volts (V)
 I_i – corrente elétrica instantânea, em amperes (A)
 n – número de amostras da aquisição
 t – tempo de soldagem, em segundos (s)

3 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os experimentos de soldagem conduzidos no presente estudo são relacionados ao processo SW nas duas variantes apresentadas: por arco retraído e por descarga capacitiva. Deste modo, a bancada de ensaios dispõe de diferentes fontes e pistolas de soldagem do referido processo, em que serão soldados pinos de diferentes diâmetros em diferentes espessuras de chapas. A configuração da bancada de soldagem é apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Bancada de soldagem: (a) Fontes de soldagem, (b) Pistolas de soldagem, (c) Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR



Fonte: elaborado pelo autor

Para o processo SW por arco retraído, a bancada de ensaios está equipada com as os modelos de fonte de soldagem BMK-16i e BMK-22i, ambas da fabricante SOYER. Já para o processo SW por descarga capacitiva, a bancada está equipada com a fonte de soldagem modelo BMS-10N, também da fabricante SOYER. As principais especificações das fontes de soldagem utilizadas nos experimentos estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais especificações das fontes de soldagem

Característica	SOYER/BMK16i	SOYER/BMH-22i	SOYER/BMS-10N
Processo de Soldagem	Soldagem de Pinos por arco retraído	Soldagem de Pinos por arco retraído	Soldagem de Pinos por descarga capacitiva com <i>gap</i> inicial e com contato inicial
Faixa de operação do diâmetro dos pinos	M3 a M16 ou Ø 2 - 13 mm	M8 a M24 ou Ø 8 – 22 mm	M3 a M8 ou Ø 2 - 8 mm
Material do Pino	Aço, aço inoxidável e aço resistente ao calor	Aço, aço inoxidável e aço resistente ao calor	Aço, aço inoxidável, alumínio e latão
Corrente de soldagem (A)	100 a 1.000	300 a 2.000	-
Tempo de soldagem (ms)	3 a 1.000	3 a 1.000	1 a 3
Capacidade de Carga (µF)	-	-	88.000
Tensão de Carga (V)	-	-	50 a 200
Fonte de Energia	Tecnologia de Inversores	Tecnologia de Inversores	Banco de Capacitores
Frequência de soldagem de pinos (pinos/min)	Até 30 (dependendo do diâmetro do pino)	Até 50 (dependendo do diâmetro do pino)	Até 20 (dependendo do diâmetro do pino)

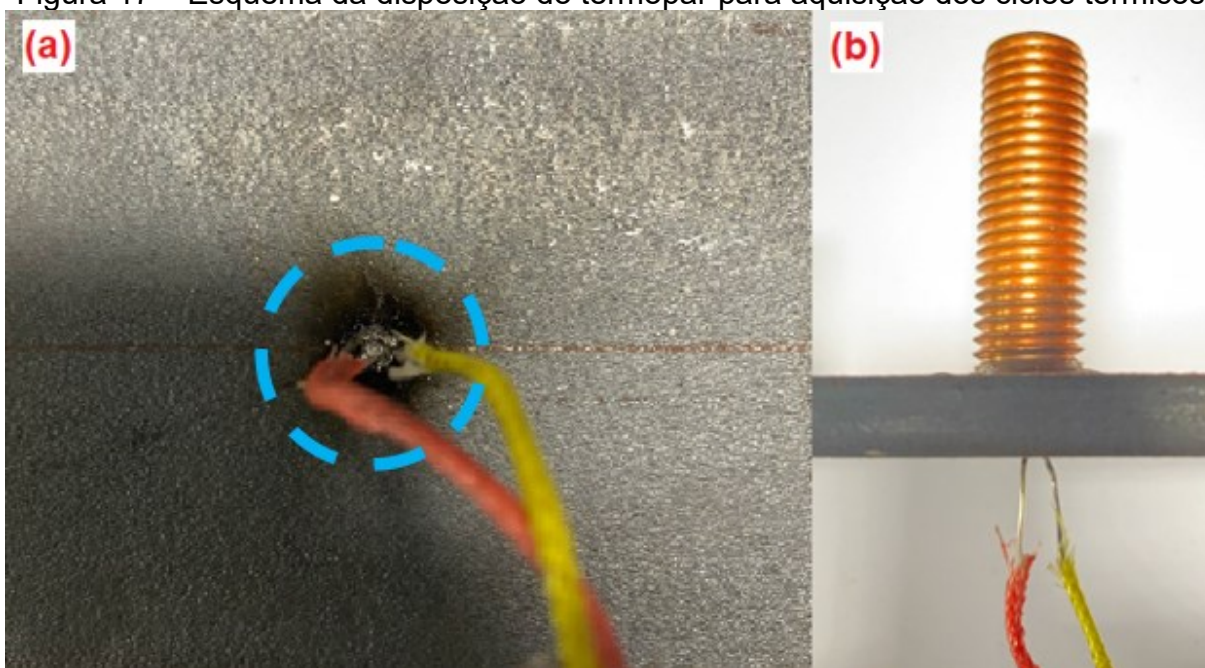
Fonte: SOYER (2013), SOYER (2006) e SOYER (1995)

As pistolas de soldagem disponíveis na bancada de ensaios são também da fabricante SOYER, dos modelos PH-4L PH-3N e PH-3N SRM para o processo SW por arco retraído, e dos modelos PS-3 e PS-3K para o processo SW por descarga capacitiva.

Os sinais elétricos de tensão e corrente, de deslocamento do pino e de temperatura foram medidos e registrados por meio de um Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR, que permite a aquisição das principais grandezas envolvidas no processo de soldagem de pinos, tais como: corrente, tensão, deslocamento do pino, vazão de gás, além da aquisição de temperatura por meio de termopares. O referido sistema não esteve disponível durante todo o período deste trabalho, e desta forma, alguns experimentos tiveram os sinais elétricos e de deslocamento de pino medidos por meio de um sistema de aquisição portátil de monitoração e dados de soldagem – SAP e as temperaturas por meio de um sistema

de aquisição de temperatura por termopar – SAT. Todos os equipamentos de sistema de aquisição de sinais são fabricados pela IMC – Engenharia de Soldagem. As medições de temperaturas no verso das chapas foram realizadas utilizando termopares tipo K. O esquema da disposição do termopar no verso da chapa para aquisição dos ciclos térmicos está apresentado na Figura 17, em que a linha tracejada azul (Figura 17a) representa a região da seção transversal do pino a ser soldado, e o termopar foi soldado no centro dessa região.

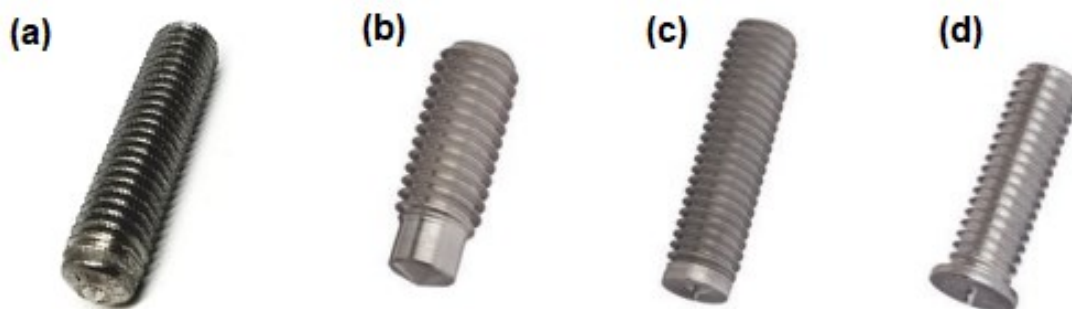
Figura 17 – Esquema da disposição do termopar para aquisição dos ciclos térmicos



Filmagens de alta velocidade também foram captadas através da câmera IDT Motion Pro Y4S2 equipada com uma lente Macro Canon EF 180 mm L USM e com iluminação laser CAVITAR/Cavilux HF. Para a macrografia das soldas, foi utilizada uma câmera Canon/60D com uma lente Macro Canon EF 180 mm L USM. Para a micrografia, foi utilizado um microscópio óptico CARL ZEISS Axiolab 5.

Foram utilizados pinos de aço carbono em todos os experimentos. Para o processo SW por arco retraído, foram utilizados pinos com diferentes geometrias de pontas, conforme estão apresentados nas Figuras 18a, 18b e 18c. Já para o processo SW por descarga capacitiva, foram utilizados pinos com flange com uma ponta *tip*, como é apresentado na Figura 18d.

Figura 18 – Diferentes geometrias de ponta dos pinos: (a) ponta de esfera de alumínio, (b) ponta cônica, (c) ponta fina e (d) ponta tip



Fonte: StudWeldingStore (2024) e Soyer (2022)

Como chapa base, foram utilizadas chapas de aço carbono ASTM A36. A Tabela 2 apresenta a especificação da composição química das chapas utilizadas nos experimentos.

Tabela 2 – Especificação da composição química das chapas

C (%)	Cu (%)	Cr (%)	Mn (%)	Mo (%)	Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	V (%)
0,18	0,17	0,16	0,68	0,02	0,07	0,011	0,016	0,20	0,003

Fonte: Gerdau (2021)

Para os experimentos de soldagem de pinos com proteção gasosa, foi empregado o gás de mistura 85% Argônio + 15%CO₂ e vazão de gás de 10 l/min.

Não obstante, a metodologia aplicada e os equipamentos e materiais utilizados em cada experimento estão detalhados de forma mais aprofundada e esmiuçada no respectivo experimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDOS PRELIMINARES

De modo a obter e criar conhecimento sobre as características gerais do processo SW, e suas variantes, experimentos preliminares foram realizados. Esses estudos colaboram para o entendimento do processo, bem como das características intrínsecas ao mesmo. Para tal, ao longo do desenvolvimento deste estudo, foi realizado o aprimoramento do sistema de monitoração de soldagem de modo que atendesse a demanda das peculiaridades intrínsecas ao processo SW.

4.1.1 Sistema de Monitoração do Processo SW

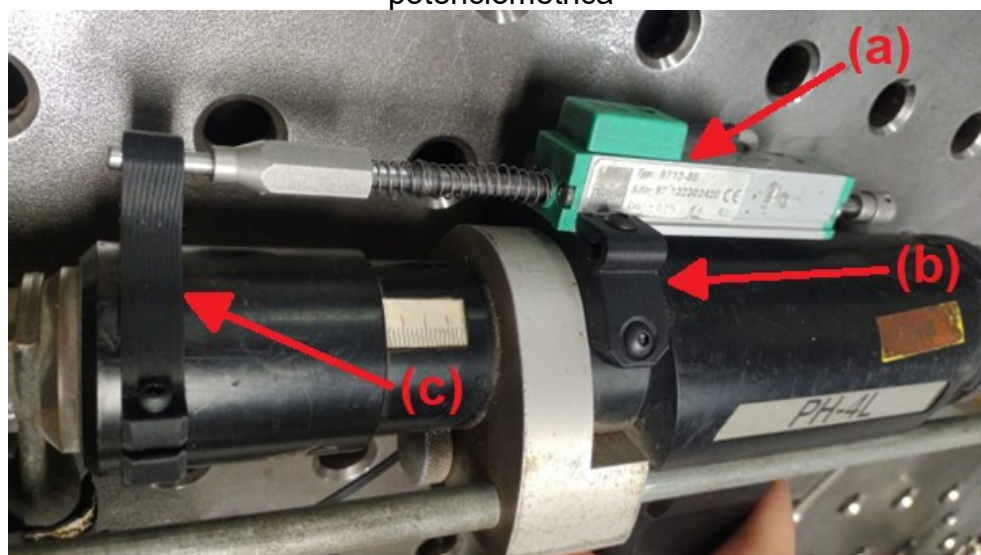
Durante a evolução desse estudo, foi necessário o desenvolvimento de um sistema portátil de monitoramento customizado para soldagem de pinos, justificado pelas características intrínsecas ao processo SW, como corrente elevada e tempo curto. Outro aspecto importante para entendimento dos fenômenos envolvidos no processo SW é o monitoramento do deslocamento do pino.

Nesse sentido, o Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR disponível para o processo SW, para o qual o autor deste trabalho ajudou no desenvolvimento, permite a aquisição das principais grandezas envolvidas no processo de soldagem, como corrente, tensão, vazão de gás de processo, e ainda, permite a aquisição e registro de temperatura através de quatro canais de sensores termopares, permitindo o acompanhamento dos ciclos térmicos, antes, durante e depois da soldagem.

A medição do deslocamento do pino, utilizada exclusivamente para o processo SW, é realizada através de uma régua potenciométrica, a qual é fixada junto ao corpo da pistola de soldagem, e a parte móvel é presa a uma parte da pistola que movimenta junto com o pino. A régua potenciométrica funciona como um divisor de tensão, em que para cada posição do eixo móvel da régua corresponde a uma tensão. O modelo de régua potenciométrica utilizada possui um curso de 50 mm, e o valor de tensão de saída é proporcional ao movimento do eixo da régua, sendo de 5 V para quando está totalmente estendido e de 0,2 V para quando está totalmente retraído. Desta forma, o sinal analógico de tensão de saída é lido pelo o 3SR, que converte

esse sinal no valor de deslocamento correspondente. A Figura 19 apresenta a régua potenciométrica instalada em uma pistola de soldagem.

Figura 19 – Régua Potenciométrica instalada na pistola de soldagem SOYER/PH-4L: (a) Régua Potenciométrica, (b) dispositivo para fixação da parte estática da régua potenciométrica e (c) dispositivo para fixação da parte móvel da régua potenciométrica



Fonte: elaborado pelo autor

Outra peculiaridade do processo SW é a respeito das elevadas correntes intrínsecas ao processo, sendo um requisito dispor de um sensor Hall que consiga efetuar medição de até 10.000 A, que é o valor máximo estimado de corrente para o processo SW por descarga capacitiva. Desta forma, o 3SR foi equipado com 2 canais de corrente, um calibrado para um sensor Hall de até 12.000 A e outro calibrado para um sensor Hall de até 2.000 A.

Tendo em vista que a fonte de soldagem disponível para soldagem de pinos com o processo SW por descarga capacitiva permite utilizar uma tensão de carga do banco de capacitores até 200 V, o 3SR possui entrada de tensão nominal até 200 V.

Ainda, o 3SR também permite registrar os dados de soldagem com taxa de amostragem de 5.000 leituras por segundo para cada variável, o que se mostra uma taxa de amostragem adequada para supervisionar um processo que acontece em um tempo muito curto, normalmente menor que um segundo.

A Tabela 3 apresenta faixas de medição das principais variáveis do Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade - 3SR, desenvolvido exclusivamente para atender as peculiaridades e requisitos atinentes ao processo SW.

Tabela 3 – Faixas de medição das principais variáveis do Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR

Variável	Faixa de Medição
Corrente (A)	-12.000 a 12.000 ou -2.000 a 2.000
Tensão (V)	-200 a 200
Deslocamento do pino (mm)	0 a 50
Temperatura (°C)	0 a 1.360 (termopar tipo K)

Fonte: elaborado pelo autor

4.1.2 Caracterização do Processo SW por Arco Retraído

O Apêndice A apresenta um estudo sobre a caracterização do processo SW por arco retraído, em que foram soldados pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição através de 3 variantes desse processo:

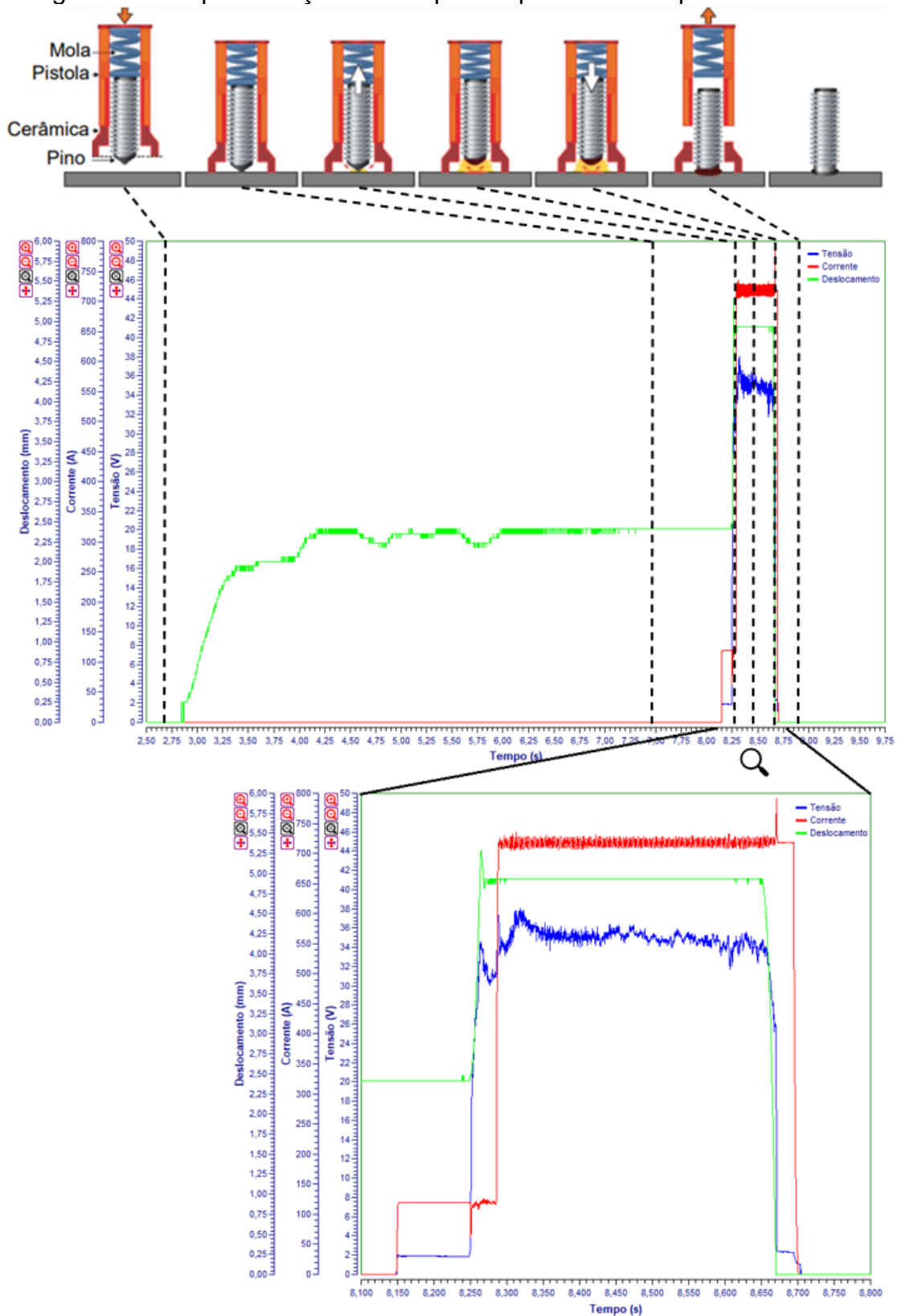
- a) soldagem de pinos com ponta de esfera de alumínio e utilização de anel cerâmico, sem gás de proteção;
- b) soldagem de pinos com ponta cônica e utilização de gás de proteção; e
- c) soldagem de pinos com ponta fina com emprego da técnica assistida por campo magnético.

Por meio da avaliação dos oscilogramas de soldagem obtidos com as aquisições dos sinais elétricos de tensão e corrente, bem como do deslocamento do pino, o estudo apresenta hipóteses para explicar o comportamento distinto da tensão em cada um dos ensaios realizados. Outro fator analisado nesse estudo foi a diferenciação entre as macrografias das soldas para cada variante desse processo e diâmetro de pino.

Para melhor ilustrar as etapas do processo SW por arco retraído, foi utilizado um dos oscilogramas apresentados no Apêndice A para efetuar uma complementação da representação esquemática do princípio de funcionamento do processo SW por arco retraído apresentada na Figura 1. Sendo assim, a Figura 20 ilustra com mais detalhes as etapas do processo SW por arco retraído, através da aquisição de sinais elétricos de tensão e corrente e da aquisição de movimentação do pino da soldagem

de um pino de 10 mm de diâmetro com ponta de esfera de alumínio e proteção de anel cerâmico.

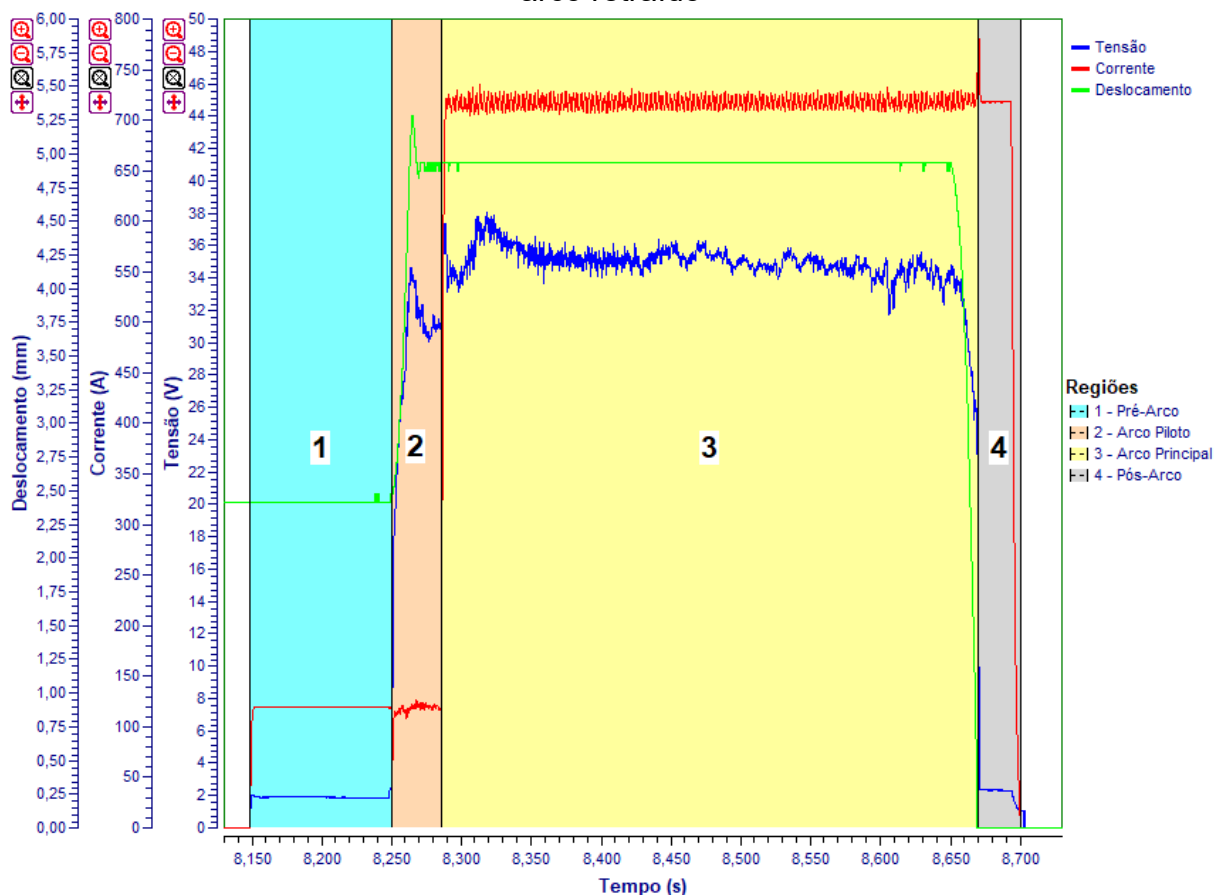
Figura 20 – Representação das etapas do processo SW por arco retraído



Fonte: elaborado pelo autor

Ainda, para melhor caracterização do processo SW por arco retraído, o período em que a fonte de soldagem comanda corrente pode ser dividido em 4 regiões: pré-arco, arco piloto, arco principal e pós-arco. Essas regiões estão apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Regiões durante o comando de corrente da fonte no processo SW por arco retraído



O pré-arco (região 1) representa o período em que a fonte comanda a pré-corrente e não existe um arco voltaico estabelecido. A partir do momento em que o sistema de movimentação do pino inicia o recuo do pino, uma tensão surge para continuar transferindo os elétrons entre a chapa base e o pino através da pré-corrente imposta pela fonte de soldagem, ocorrendo então a abertura de um arco elétrico de baixa intensidade, chamado de arco piloto (região 2), iniciando a fusão da ponta do pino. Após findar o tempo de pré-corrente programado, a fonte inicia o comando da corrente principal, e neste momento, se tem a abertura do arco principal (região 3), auxiliado pela ionização conseguida com o arco piloto estabelecido anteriormente.

Quando o tempo de soldagem programado é completado, o sistema de movimentação do pino é liberado e o pino inicia seu movimento em direção à chapa base. Durante o deslocamento, ocorre o curto-circuito entre as poças de fusão do pino e da chapa base, acarretando a extinção do arco principal, e dando início ao pós-arco (região 4), que perdura até cessar o comando da corrente principal pela fonte de soldagem.

Apesar do pós-arco perdurar um tempo curto, seu objetivo ainda não está pacificado. Uma hipótese é de que sirva para conseguir benefícios metalúrgicos, com a redução da taxa de resfriamento, já que o pino ainda está sofrendo aquecimento por efeito Joule. Outra hipótese é para garantir que a solidificação da poça de fusão inicie somente após o pino ter concluído seu movimento, evitando assim que a solidificação ocorra prematuramente.

Já o Apêndice B apresenta um experimento para verificar na prática a influência dos parâmetros de soldagem protrusão e recuo do pino utilizando-se o processo SW por arco retraído. O parâmetro recuo tem influência na energia de soldagem, através do valor de tensão. Assim, o experimento prático mostra que a soldagem do pino com um recuo muito baixo promove um arco com comprimento curto, acarretando um valor de tensão baixo, e conseqüentemente, a energia de soldagem será baixa e insuficiente para a soldagem do pino, apresentando um colar incompleto, com descontinuidades e defeitos. Já a soldagem do pino com um recuo excessivo ocorre o oposto, com um comprimento do arco maior e, conseqüentemente, uma tensão do arco maior, aumentando, desta forma, a energia introduzida pelo processo, apresentando um colar exagerado que ultrapassa o limite imposto pelo anel cerâmico.

4.1.3 Caracterização do Processo SW por Descarga Capacitiva

O Apêndice C apresenta um estudo sobre a caracterização do processo SW por descarga capacitiva. Neste estudo, foram soldados pinos M6 com as variantes com *gap* inicial e com contato inicial, com diferentes parâmetros de soldagem de tensão de carga, pressão da mola e recuo do pino. Em cada ensaio, a soldagem foi realizada 20 vezes e os pinos foram submetidos a testes de qualificação do procedimento de soldagem conforme preconizado na norma técnica AWS D1.1/D1.1M:2020 (2020). Os resultados apresentados mostram que os pinos soldados com o processo SW por descarga capacitiva com contato inicial tiveram

resultados satisfatórios, sendo todos os procedimentos aprovados, independente da pressão da mola e da tensão de carga do banco de capacitores, enquanto os pinos soldados com o processo SW por descarga capacitiva com gap inicial só teve aprovação em apenas um dos 6 procedimentos testados.

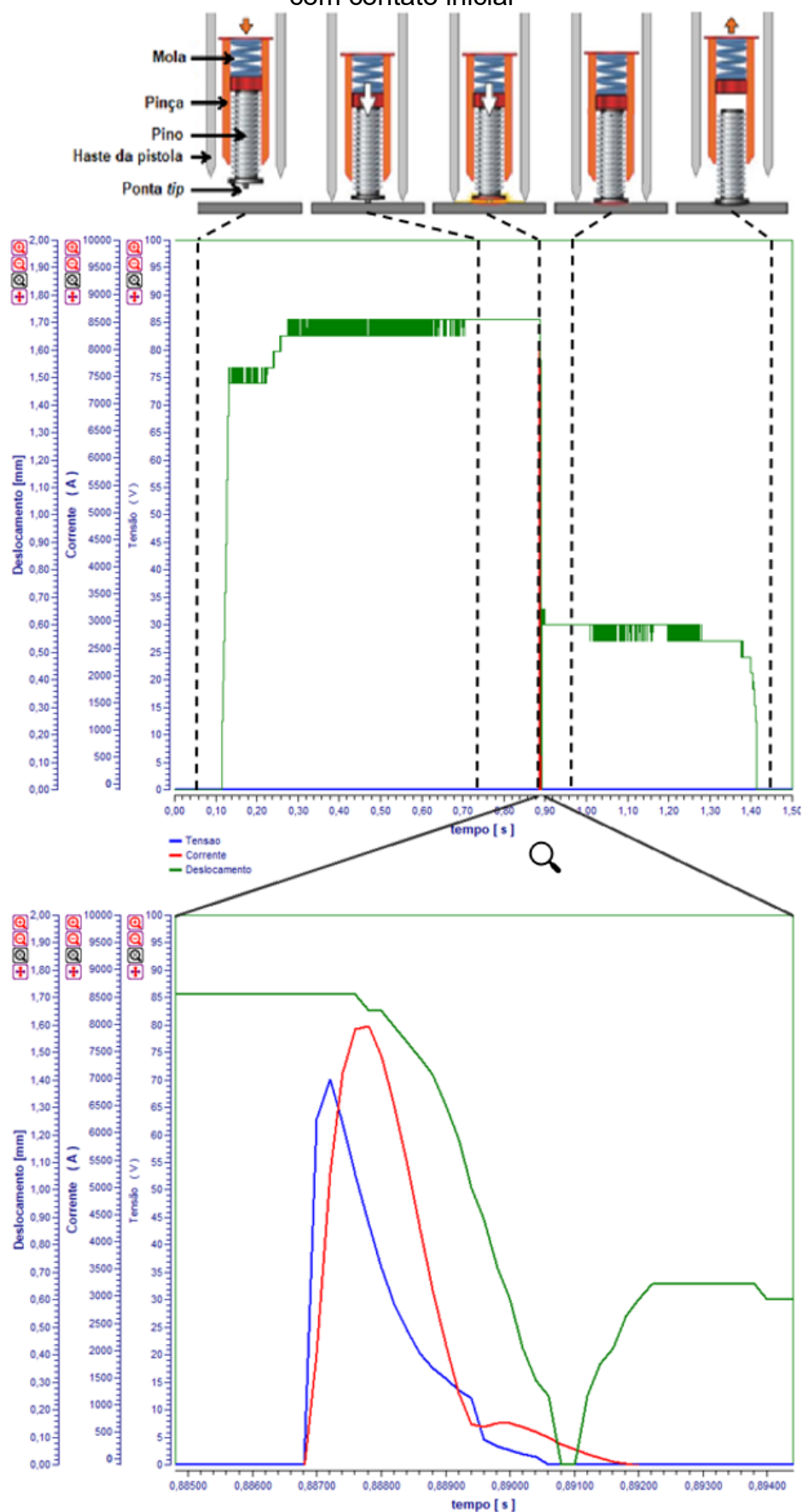
Adicionalmente, as macrografias realizadas revelaram uma camada muito pequena de zona fundida e a existência de algumas descontinuidades, com falta de fusão, justificada pelo baixo tempo de arco aberto. A micrografia de um pino confirmou essa reduzida zona fundida, com espessura na ordem de 50 μm .

Para melhor ilustrar as etapas do processo SW por descarga capacitiva, foram utilizados oscilogramas de soldagem dos ensaios do Apêndice C para efetuar uma complementação das representações esquemáticas apresentadas nas Figuras 2 e 3. Sendo assim, a Figura 22 ilustra com mais detalhes as etapas do processo SW por descarga capacitiva com contato inicial, através do oscilograma de soldagem do ensaio 2. Já a Figura 23 ilustra com mais detalhes as etapas do processo SW por descarga capacitiva com gap inicial, através do oscilograma de soldagem do ensaio 8.

Nas filmagens de alta velocidade, foi possível verificar que no processo SW por descarga capacitiva com *gap* inicial o arco elétrico é aberto no momento que a *tip* encosta na chapa base, e desta forma, fecha-se o contato e o banco de capacitores descarrega a energia armazenada.

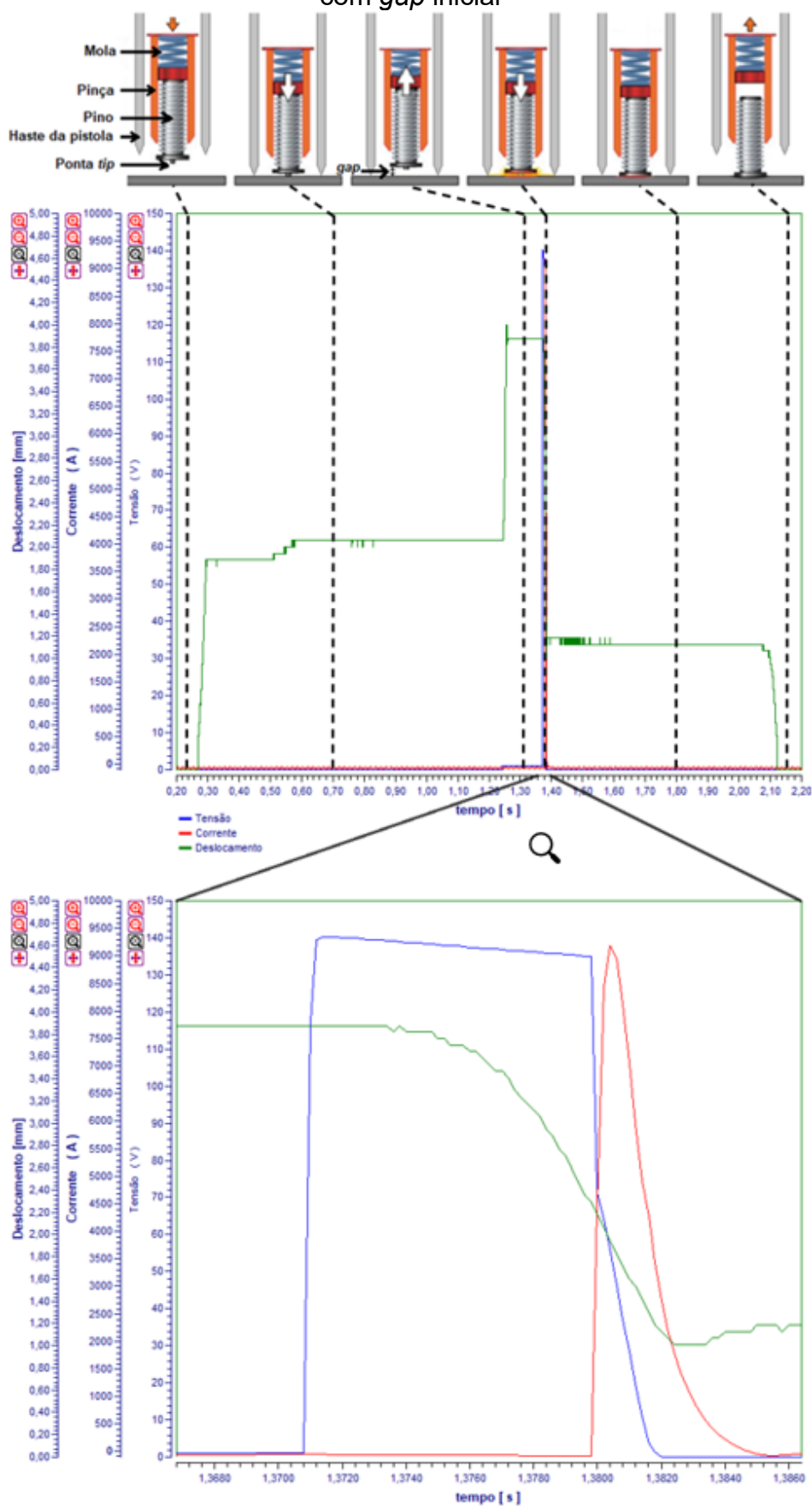
Já o apêndice D apresenta um estudo quanto à viabilidade e exequibilidade da soldagem de pinos em chapas de maior espessura utilizando o processo SW por descarga capacitiva, tendo em vista que a literatura não menciona uma espessura máxima para a chapa base e aplicações com esse processo de soldagem são encontradas apenas em chapas finas. Cary (1995) se limita a mencionar que o processo SW por descarga capacitiva pode ser usado para soldar pinos em chapas finas, sem mencionar quais seriam os limites máximo e mínimo de espessura em função do diâmetro do pino. Desta forma, os resultados apresentados de aprovação na qualificação, conforme preconizado em norma técnica, são promissores e sugerem que a utilização deste processo de soldagem é viável e exequível mesmo para chapas de maior espessura.

Figura 22 – Representação das etapas do processo SW por descarga capacitiva com contato inicial



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 23 – Representação das etapas do processo SW por descarga capacitiva com *gap* inicial



Fonte: elaborado pelo autor

4.2 LEVANTAMENTO TÉRMICO NO VERSO DA CHAPA PARA PINOS SOLDADOS COM O PROCESSO SW

Neste capítulo serão realizados experimentos para o levantamento térmico da soldagem de pinos roscados com o processo SW. Para tal, serão soldados pinos de diferentes diâmetros em diferentes espessuras de chapa, de modo a obter o ciclo térmico no verso da chapa, para verificação da temperatura máxima atingida, bem como o perfil de resfriamento, e confecção de uma ferramenta de consulta da temperatura máxima atingida no verso da chapa, objetivo principal desse estudo, em função da tecnologia empregada na soldagem do pino, do diâmetro do pino e espessura da chapa.

4.2.1 Processo SW por Arco Retraído

De modo a obter o levantamento das curvas térmicas da soldagem de pinos por arco retraído, foram realizados experimentos com pinos roscados de 10 mm, 16 mm e 20 mm de diâmetro com ponta de esfera de alumínio (M10, M16 e M20, respectivamente), pinos roscados de 12 mm de diâmetro (M12) com ponta cônica e pinos roscados de 10 mm, 12 mm e 16 mm de diâmetro com ponta fina (M10, M12 e M16, respectivamente). Como chapa base, foram utilizadas chapas de aço ASTM A36 com 6,4 mm, 7,9 mm, 9,5 mm, 12,7 mm, 15,9 mm, 19,0 mm e 25,4 mm de espessura.

É preciso ressaltar que os pinos com ponta cônica, apesar de terem roscas com diâmetro de 12 mm (M12), possuem redução de diâmetro para 10 mm. Sendo assim, os parâmetros utilizados para a soldagem deles são para pinos com 10 mm de diâmetro, uma vez que é essa parte do pino, com diâmetro menor, que é fundida para a soldagem dele na chapa base. Já os pinos com ponta de esfera de alumínio e com ponta fina não possuem essa redução.

Os pinos com ponta de esfera de alumínio foram soldados com anel cerâmico e sem proteção gasosa. Já os pinos com ponta cônica foram soldados utilizando proteção gasosa. Os pinos com ponta fina foram soldados com emprego da técnica assistida por campo magnético, com proteção gasosa.

A fonte de soldagem utilizada foi uma SOYER/BMH-22i, equipada com uma pistola de soldagem SOYER/PH-4L para a soldagem dos pinos com ponta de esfera

de alumínio e com ponta cônica, e uma pistola de soldagem SOYER/PH-3N SRM para os pinos com ponta fina.

Foram conduzidas aquisições de sinais elétricos de tensão e corrente, além do deslocamento do pino e da temperatura no verso da chapa, que foram medidos e registrados através de um Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR.

Os principais parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais parâmetros de soldagem utilizados na caracterização de diferentes variações do processo SW por arco retraído

Parâmetro de Soldagem	Esfera de Alumínio			Cônica		Fina	
	10 mm	16 mm	20 mm	10 mm	10 mm	12 mm	16 mm
Corrente de soldagem (A)	700	1.300	1.700	800	800	800	1.100
Tempo de soldagem (ms)	350	650	850	350	100	180	400
Protrusão (mm)	2,8	3,4	3,6	4,0	1,2	1,2	1,2
Recuo (mm)	2,0	3,0	3,7	1,3	2,0	2,0	2,5
Proteção da poça	Anel cerâmico	Anel cerâmico	Anel cerâmico	85%Ar + 15%CO ₂	85%Ar + 15%CO ₂	85%Ar + 15%CO ₂	85%Ar + 15%CO ₂
Vazão (l/min)	-	-	-	10	10	10	10
Tempo de Pré-gás (s)	-	-	-	1	1	1	1
Tempo de pré-corrente (ms)	40	40	40	40	40	40	40
Corrente SRM (A)	-	-	-	-	0,25	0,25	0,20

Fonte: elaborado pelo autor

Sendo assim, a matriz de ensaios para os experimentos está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz de ensaios

(continua)

Ensaio	Ponta de Ignição	Diâmetro do Pino (mm)	Espessura da Chapa (mm)
1	Esfera de Alumínio	10	6,4
2	Esfera de Alumínio	10	7,9
3	Esfera de Alumínio	10	9,5
4	Esfera de Alumínio	10	12,7
5	Esfera de Alumínio	10	15,9
6	Esfera de Alumínio	10	19,0
7	Esfera de Alumínio	10	25,4
8	Esfera de Alumínio	16	6,4
9	Esfera de Alumínio	16	7,9
10	Esfera de Alumínio	16	9,5
11	Esfera de Alumínio	16	12,7

Tabela 5 – Matriz de ensaios

(conclusão)

Ensaio	Ponta de Ignição	Diâmetro do Pino (mm)	Espessura da Chapa (mm)
12	Esfera de Alumínio	16	15,9
13	Esfera de Alumínio	16	19,0
14	Esfera de Alumínio	16	25,4
15	Esfera de Alumínio	20	6,4
16	Esfera de Alumínio	20	7,9
17	Esfera de Alumínio	20	9,5
18	Esfera de Alumínio	20	12,7
19	Esfera de Alumínio	20	15,9
20	Esfera de Alumínio	20	19,0
21	Esfera de Alumínio	20	25,4
22	Cônica	10	6,4
23	Cônica	10	7,9
24	Cônica	10	9,5
25	Cônica	10	12,7
26	Cônica	10	15,9
27	Cônica	10	19,0
28	Cônica	10	25,4
29	Fina	10	6,4
30	Fina	10	7,9
31	Fina	10	9,5
32	Fina	10	12,7
33	Fina	10	15,9
34	Fina	10	19,0
35	Fina	10	25,4
36	Fina	12	6,4
37	Fina	12	7,9
38	Fina	12	9,5
39	Fina	12	12,7
40	Fina	12	15,9
41	Fina	12	19,0
42	Fina	12	25,4
43	Fina	16	6,4
44	Fina	16	7,9
45	Fina	16	9,5
46	Fina	16	12,7
47	Fina	16	15,9
48	Fina	16	19,0
49	Fina	16	25,4

Fonte: elaborado pelo autor

Cada ensaio foi repetido três vezes, sendo realizado a soldagem de um total de 147 pinos. De acordo com a Equação 9, foi calculada para cada pino soldado, a energia de soldagem total do processo, assim como das energias de soldagem impostas durante o arco piloto e o arco principal (regiões 2 e 3 da Figura 21,

respectivamente), bem como o percentual de cada uma em relação a energia total da solda, além da obtenção da temperatura máxima atingida no verso da chapa. Como a literatura carece de estudos sobre a eficiência térmica do processo SW, será adotado o valor de 100% ($\eta = 1$).

Os resultados da energia de soldagem durante o arco piloto, o arco principal e o processo todo, bem como a temperatura máxima atingida no verso da chapa, obtidos através das aquisições com o Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR, estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Energia de soldagem e temperatura máxima no verso da chapa
(continua)

Ensaio	Amostra	Arco Piloto		Arco Principal		E _{TOTAL} (J)	Temperatura Máxima (°C)
		E (J)	% E _{TOTAL}	E (J)	% E _{TOTAL}		
1	1	119,9	1,29	9.077,1	97,80	9.281,0	395,2
1	2	120,0	1,28	9.188,6	98,00	9.376,4	481,4
1	3	119,3	1,23	9.367,4	96,83	9.674,4	420,5
2	1	115,8	1,21	9.381,8	98,05	9.568,1	351,6
2	2	109,2	1,17	9.140,4	98,14	9.313,6	356,3
2	3	115,6	1,22	9.264,3	97,76	9.476,7	354,5
3	1	119,9	1,23	9.591,7	98,27	9.761,0	289,6
3	2	117,4	1,29	8.921,5	97,88	9.114,4	274,5
3	3	114,1	1,22	9.214,1	98,29	9.374,6	273,9
4	1	123,4	1,37	8.825,0	97,65	9.037,7	166,5
4	2	127,0	1,39	8.960,2	97,83	9.159,3	172,7
4	3	121,7	1,33	8.975,5	97,97	9.161,5	172,5
5	1	124,8	1,37	8.913,5	98,08	9.088,2	109,1
5	2	115,4	1,27	8.881,1	98,04	9.058,4	98,9
5	3	126,0	1,37	8.979,7	97,73	9.188,6	112,3
6	1	115,3	1,22	9.316,0	98,51	9.456,8	77,1
6	2	109,7	1,18	9.170,3	98,36	9.323,5	78,3
6	3	111,2	1,18	9.244,9	98,13	9.420,8	80,8
7	1	118,3	1,28	9.042,3	98,14	9.214,2	49,0
7	2	130,0	1,38	9.260,8	98,05	9.444,7	51,3
7	3	125,3	1,33	9.206,2	97,94	9.399,7	54,2
8	1	101,0	0,31	32.098,7	99,27	32.334,7	786,0
8	2	99,3	0,32	30.565,4	99,05	30.859,4	823,0
8	3	99,8	0,33	30.320,4	99,04	30.613,1	781,6
9	1	97,7	0,30	31.819,7	99,12	32.100,7	647,7
9	2	103,4	0,31	32.662,1	99,12	32.952,6	645,0
9	3	104,0	0,31	33.230,9	99,26	33.479,8	656,8
10	1	98,5	0,31	30.980,6	98,98	31.299,7	504,2
10	2	108,7	0,35	31.139,2	99,15	31.406,9	519,2
10	3	98,6	0,32	30.934,9	99,07	31.225,5	499,8
11	1	99,7	0,31	31.959,8	99,25	32.200,6	338,0
11	2	95,8	0,30	31.278,9	99,15	31.547,0	334,1
11	3	106,1	0,33	31.580,9	99,08	31.873,9	331,3
12	1	94,1	0,31	30.207,3	99,10	30.482,8	222,0
12	2	102,8	0,33	30.965,7	99,12	31.241,9	220,8

Tabela 6 – Energia de soldagem e temperatura máxima no verso da chapa
(continuação)

Ensaio	Amostra	Arco Piloto		Arco Principal		E _{TOTAL} (J)	Temperatura Máxima (°C)
		E (J)	% E _{TOTAL}	E (J)	% E _{TOTAL}		
12	3	94,1	0,30	30.905,7	99,03	31.207,9	227,1
13	1	98,8	0,32	30.482,4	99,16	30.739,9	157,2
13	2	96,4	0,31	31.194,9	99,22	31.441,5	158,9
13	3	94,1	0,29	32.433,2	99,29	32.666,4	171,3
14	1	100,3	0,31	31.649,1	99,19	31.907,2	97,5
14	2	99,6	0,32	31.189,4	99,11	31.469,5	103,4
14	3	99,8	0,32	30.828,7	99,01	31.136,7	95,6
15	1	83,2	0,16	52.997,1	99,77	53.121,7	1.092,0
15	2	80,4	0,15	52.893,3	99,31	53.260,8	1.066,2
15	3	80,8	0,16	51.542,5	99,33	51.892,5	1.163,5
16	1	78,7	0,15	53.605,4	99,37	53.942,6	746,2
16	2	88,0	0,16	53.514,7	99,44	53.817,1	745,5
16	3	79,8	0,15	52.627,5	99,41	52.942,2	733,7
17	1	78,4	0,15	52.324,2	99,41	52.634,5	653,2
17	2	82,7	0,15	54.163,7	99,29	54.552,7	618,0
17	3	84,8	0,15	55.222,7	99,44	55.533,4	587,0
18	1	85,9	0,17	50.036,0	99,33	50.374,2	422,3
18	2	86,5	0,17	51.891,0	99,44	52.184,2	427,9
18	3	84,1	0,15	55.086,8	99,45	55.390,6	417,9
19	1	84,3	0,17	50.641,3	99,26	51.018,2	288,2
19	2	67,5	0,13	51.823,8	99,44	52.115,3	279,5
19	3	75,0	0,15	51.260,6	99,26	51.642,5	283,7
20	1	81,4	0,15	54.187,4	99,47	54.475,1	213,9
20	2	83,0	0,16	52.856,3	99,51	53.115,2	215,2
20	3	80,5	0,15	52.835,6	99,47	53.119,5	207,1
21	1	77,4	0,15	52.554,2	99,47	52.834,5	121,1
21	2	78,9	0,15	53.347,4	99,47	53.632,4	116,7
21	3	75,8	0,14	54.612,2	99,35	54.967,9	132,5
22	1	80,8	0,96	8.268,8	98,34	8.408,6	382,9
22	2	77,1	0,91	8.347,5	98,10	8.509,6	386,5
22	3	77,5	0,87	8.692,1	98,15	8.856,2	423,7
23	1	78,2	0,87	8.823,6	98,01	9.002,5	316,0
23	2	81,5	0,88	8.675,4	93,92	9.237,4	323,6
23	3	87,7	1,11	7.735,3	97,63	7.922,8	282,5
24	1	79,2	0,93	8.327,7	98,21	8.479,3	230,7
24	2	88,0	1,11	7.733,5	97,79	7.908,5	218,7
24	3	79,0	0,97	7.987,2	97,98	8.151,8	210,2
25	1	78,1	0,92	8.287,1	98,12	8.446,3	147,7
25	2	82,1	0,90	8.972,5	98,17	9.140,0	154,6
25	3	83,1	0,97	8.427,7	97,99	8.600,8	153,4
26	1	76,3	0,92	8.182,4	98,21	8.331,5	95,2
26	2	80,2	1,00	7.845,9	98,17	7.991,9	94,2
26	3	83,5	0,94	8.745,9	98,20	8.906,0	102,3
27	1	85,3	0,97	8.612,9	98,00	8.788,7	72,6
27	2	81,8	0,98	8.208,8	97,87	8.387,6	75,7
27	3	79,7	0,89	8.783,7	98,13	8.951,5	79,6
28	1	79,1	0,89	8.674,6	98,10	8.842,8	48,1
28	2	80,5	0,88	8.991,9	98,25	9.152,0	49,5
28	3	80,7	0,90	8.788,6	98,15	8.954,3	50,4
29	1	91,3	3,67	2.358,0	94,84	2.486,3	181,2

Tabela 6 – Energia de soldagem e temperatura máxima no verso da chapa
(continuação)

Ensaio	Amostra	Arco Piloto		Arco Principal		E _{TOTAL} (J)	Temperatura Máxima (°C)
		E (J)	% E _{TOTAL}	E (J)	% E _{TOTAL}		
29	2	89,8	3,57	2.388,3	95,06	2.512,4	188,1
29	3	89,9	3,71	2.283,1	94,33	2.420,4	185,0
30	1	93,4	3,62	2.452,4	95,09	2.578,9	134,9
30	2	90,4	3,52	2.428,9	94,59	2.567,9	138,3
30	3	96,0	3,89	2.327,1	94,31	2.467,6	131,3
31	1	90,4	3,51	2.453,5	95,22	2.576,8	107,9
31	2	90,6	3,60	2.400,2	95,24	2.520,1	108,4
31	3	91,7	3,62	2.398,7	94,56	2.536,6	102,4
32	1	86,6	3,50	2.359,6	95,36	2.474,5	64,4
32	2	91,1	3,76	2.293,9	94,74	2.421,4	63,5
32	3	97,1	3,80	2.424,8	95,01	2.552,2	68,3
33	1	94,2	3,21	2.817,7	95,97	2.936,2	49,5
33	2	91,2	3,63	2.380,7	94,64	2.515,4	45,6
33	3	95,4	3,58	2.522,9	94,59	2.667,3	47,1
34	1	95,7	3,76	2.404,0	94,46	2.545,0	36,7
34	2	93,7	3,59	2.473,1	94,69	2.611,7	37,9
34	3	107,4	4,20	2.418,2	94,57	2.557,2	36,7
35	1	91,3	3,67	2.293,0	94,50	2.426,5	29,1
35	2	89,8	3,57	2.365,9	94,81	2.495,3	27,7
35	3	89,9	3,71	2.263,8	94,81	2.387,8	30,2
36	1	86,2	2,23	3.710,9	96,12	3.860,6	235,5
36	2	79,6	2,14	3.577,2	96,38	3.711,6	216,4
36	3	80,1	2,16	3.581,2	96,60	3.707,4	209,5
37	1	97,1	2,78	3.348,2	95,67	3.499,6	161,6
37	2	96,3	2,68	3.445,1	95,87	3.593,5	155,4
37	3	96,7	2,56	3.616,5	95,92	3.770,5	152,3
38	1	95,7	2,72	3.342,3	95,11	3.514,1	133,2
38	2	99,5	2,93	3.227,4	95,12	3.392,8	131,4
38	3	95,0	2,89	3.145,2	95,73	3.285,4	130,6
39	1	84,8	2,25	3.636,7	96,52	3.767,8	83,5
39	2	86,8	2,56	3.234,0	95,38	3.390,5	73,0
39	3	82,3	2,47	3.155,6	94,75	3.330,4	76,7
40	1	90,0	2,81	3.075,1	95,88	3.207,2	55,8
40	2	79,9	2,52	3.007,7	94,96	3.167,3	52,7
40	3	89,8	2,51	3.438,8	96,06	3.580,0	60,4
41	1	94,9	2,43	3.775,0	96,56	3.909,4	45,3
41	2	105,1	2,85	3.538,2	95,86	3.691,0	45,1
41	3	92,5	2,50	3.553,3	95,86	3.706,6	46,0
42	1	98,9	2,82	3.360,2	95,77	3.508,8	37,7
42	2	91,5	2,56	3.436,7	96,12	3.575,3	37,4
42	3	101,1	3,21	2.981,2	94,59	3.151,8	36,2
43	1	99,6	0,74	13.180,4	98,39	13.396,7	492,9
43	2	88,4	0,65	13.360,3	98,53	13.559,2	474,4
43	3	87,2	0,68	12.542,7	98,36	12.751,2	467,4
44	1	94,6	0,70	13.248,4	98,61	13.435,6	377,1
44	2	88,5	0,73	11.839,5	98,22	12.054,4	338,3
44	3	89,4	0,72	12.284,0	98,35	12.489,7	347,9
45	1	98,7	0,70	13.815,0	98,48	14.028,4	308,9
45	2	96,5	0,70	13.553,2	98,44	13.768,0	278,6
45	3	89,0	0,67	13.117,1	98,40	13.330,9	290,1

Tabela 6 – Energia de soldagem e temperatura máxima no verso da chapa
(conclusão)

Ensaio	Amostra	Arco Piloto		Arco Principal		E _{TOTAL} (J)	Temperatura Máxima (°C)
		E (J)	% E _{TOTAL}	E (J)	% E _{TOTAL}		
46	1	94,9	0,67	13.996,6	98,48	14.212,9	201,9
46	2	86,9	0,66	13.021,0	98,38	13.235,0	181,0
46	3	88,7	0,67	13.003,0	98,55	13.193,8	187,0
47	1	93,7	0,64	14.448,3	98,42	14.679,7	128,2
47	2	88,9	0,64	13.653,2	98,54	13.855,6	125,1
47	3	86,0	0,61	13.766,6	98,41	13.988,9	125,4
48	1	100,9	0,81	12.246,8	98,26	12.464,2	85,0
48	2	91,2	0,72	12.455,6	98,41	12.656,3	91,6
48	3	94,2	0,75	12.318,4	98,43	12.514,5	89,6
49	1	91,7	0,64	14.183,1	98,54	14.393,1	56,3
49	2	89,1	0,71	12.317,8	98,33	12.527,3	53,1
49	3	91,1	0,70	12.828,0	98,36	13.041,7	56,2

Fonte: elaborado pelo autor

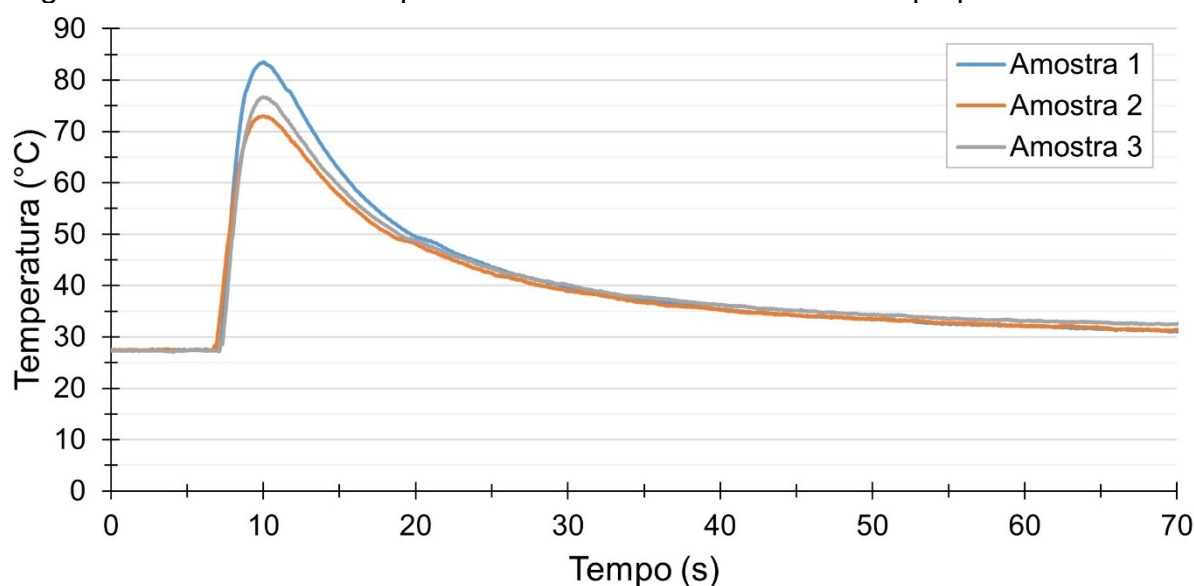
É possível observar, através dos resultados apresentados, que quanto maior é a energia necessária para a soldagem do pino, maior é a parcela de energia fornecida durante o arco principal. Como exemplo, é possível perceber que na soldagem de pinos com ponta de esfera de alumínio, os pinos de 20 mm de diâmetro (ensaios 15 a 21) foram soldados com energia maiores que 50 kJ, sendo que a parcela de contribuição do arco principal corresponde a mais de 99% da energia total, enquanto os pinos de 10 mm de diâmetro (ensaios 1 a 7) foram soldados com energia inferiores a 10 kJ, e a contribuição do arco principal ser em torno de 97 a 98% da energia total. De fato, esse comportamento já é esperado, uma vez que para a soldagem de pinos de maiores diâmetros, os parâmetros de corrente de soldagem e tempo de soldagem, que contribuem diretamente para a energia de soldagem, bem como os parâmetros de recuo do pino, que contribui indiretamente para a energia de soldagem, são maiores. Ao efetuar a mesma comparação com a soldagem de pinos com ponta fina, o mesmo comportamento é observado, em que para pinos de maior diâmetro, o percentual da energia total de soldagem fornecida durante o arco principal é maior.

Outro ponto importante é em relação a comparação da temperatura máxima atingida no verso da chapa para pinos de mesmo diâmetro soldados com diferentes variantes do processo SW por arco retraído. Nesse sentido, ao analisar pinos de 10 mm de diâmetro soldados em uma chapa base de mesma espessura, a temperatura atingida no verso da chapa foi significativamente menor para pinos de ponta fina (com

emprego da tecnologia assistida por campo magnético). Tal resultado se justifica pelo fato de o tempo de soldagem nessa variante ser de 100 ms, que corresponde a cerca de 30% do valor do tempo de soldagem com pinos com ponta cônica ou de esfera de alumínio, que é de 350 ms. Conseqüentemente, a energia de soldagem do pino com ponta fina e emprego da tecnologia assistida por campo magnético é bem menor, acarretando uma temperatura inferior no verso da chapa.

Os dados de temperatura foram plotados na forma de gráfico em função do tempo, sendo que para cada ensaio, dentre as três amostras realizadas, foi utilizada a amostra que apresentou a temperatura máxima mediana. Como exemplo, a Figura 24 apresenta o comportamento térmico das três amostras do ensaio 39. Desta forma, para este ensaio, a curva do comportamento térmico que será utilizada é o da amostra 3, que obteve a temperatura máxima mediana

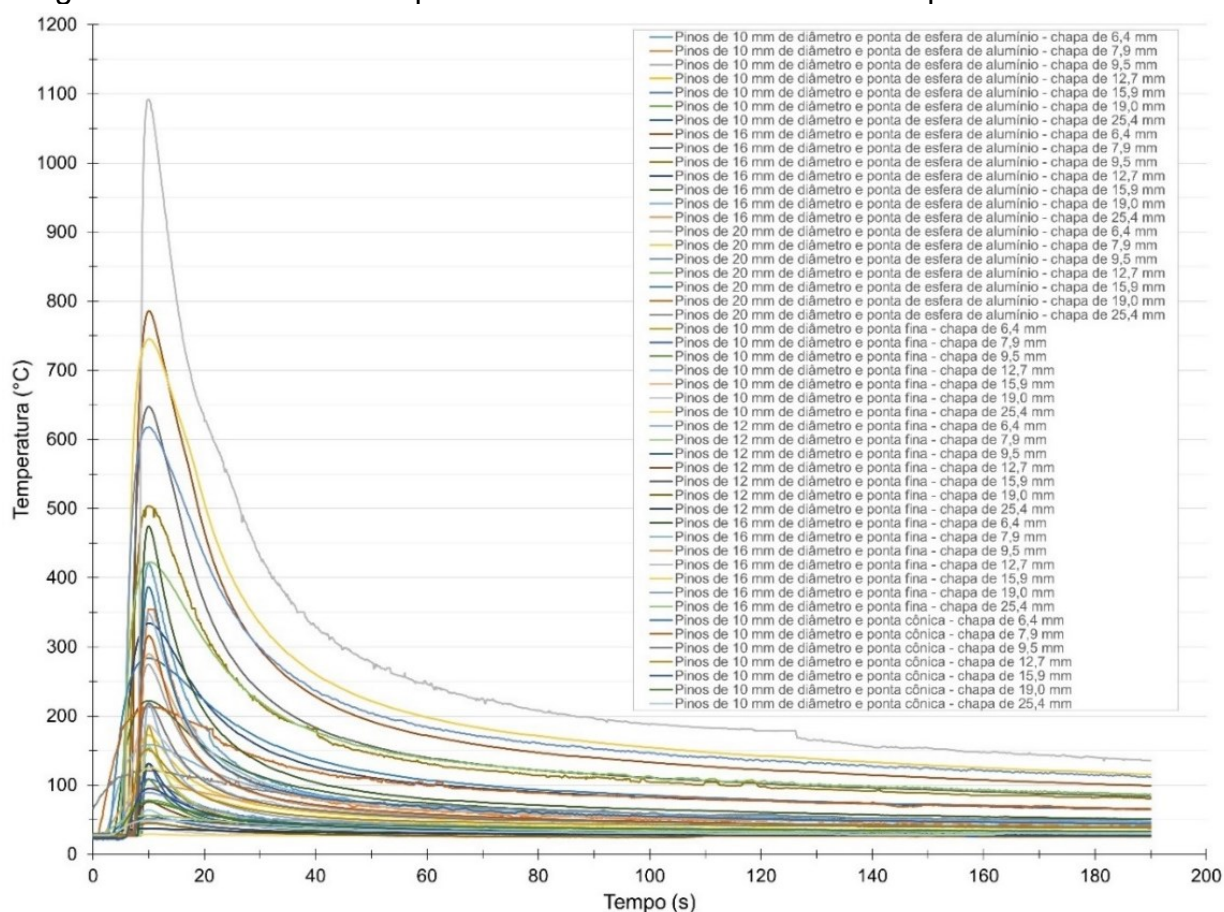
Figura 24 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa para o ensaio 39



Fonte: elaborado pelo autor

Assim sendo, a Figura 25 apresenta as curvas do comportamento térmico para cada um dos 49 ensaios.

Figura 25 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa dos 49 ensaios



Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico apresentado na Figura 25, pela quantidade demasiada de curvas sobrepostas, serve apenas para mostrar a grande quantidade de diferentes temperaturas máximas atingidas no verso da chapa nos 49 ensaios de soldagem de pinos, de diferentes diâmetros e pontas, em diversas espessuras de chapas, que variaram desde temperaturas próximas à temperatura ambiente até temperaturas de quase 1.100°C, ficando difícil de se tirar qualquer outra informação ou de se fazer qualquer análise mais detalhada, bem como de identificar qual curva corresponde a um determinado ensaio. Nesse sentido, serão apresentados gráficos com menores quantidades de curvas de comportamento térmico, agrupadas por diferentes características, seja esta característica do pino (diâmetro ou ponta de ignição do pino), seja esta característica da chapa base (espessura da chapa), ou da combinação delas.

O primeiro agrupamento é por espessuras da chapa base. Desta forma, as Figuras 26, 27, 28, 29, 30, 31 e 32 apresentam, respectivamente, as curvas do

comportamento térmico no verso da chapa dos pinos soldados em chapas de aço de 6,4 mm, 7,9 mm, 9,5 mm, 12,7 mm, 15,9 mm, 19,0 mm e 25,4 mm.

Figura 26 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 6,4 mm de espessura

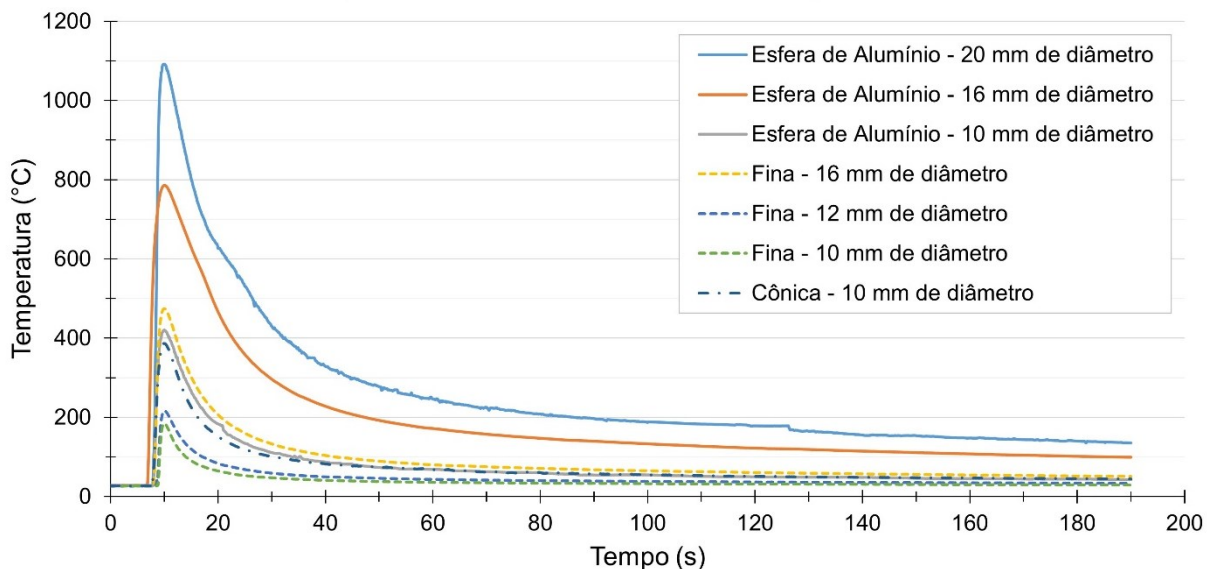


Figura 27 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 7,9 mm de espessura

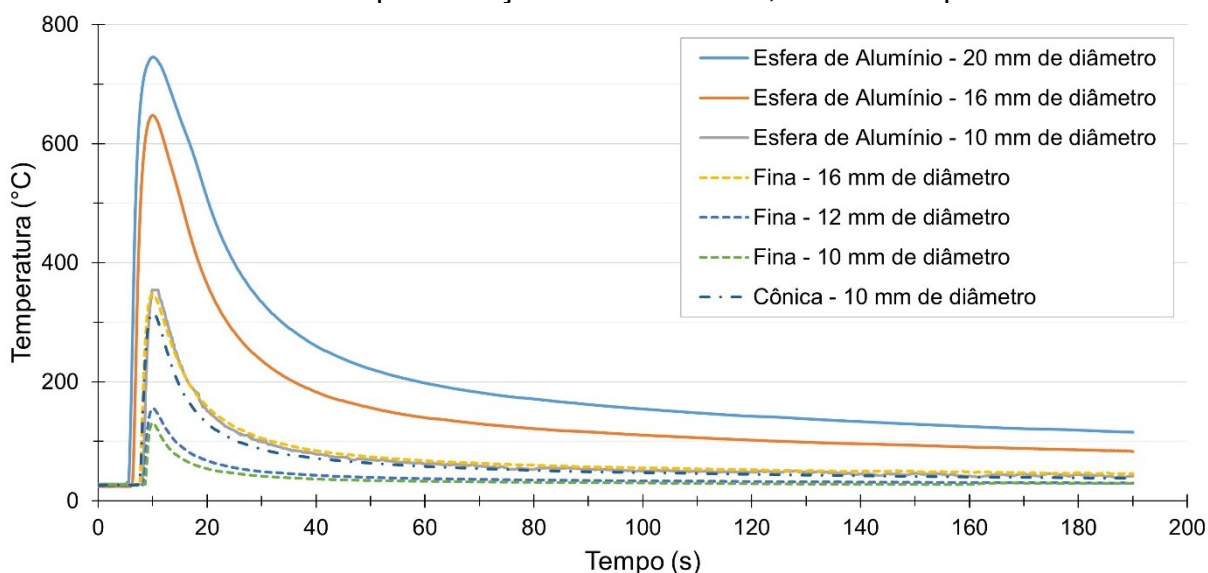
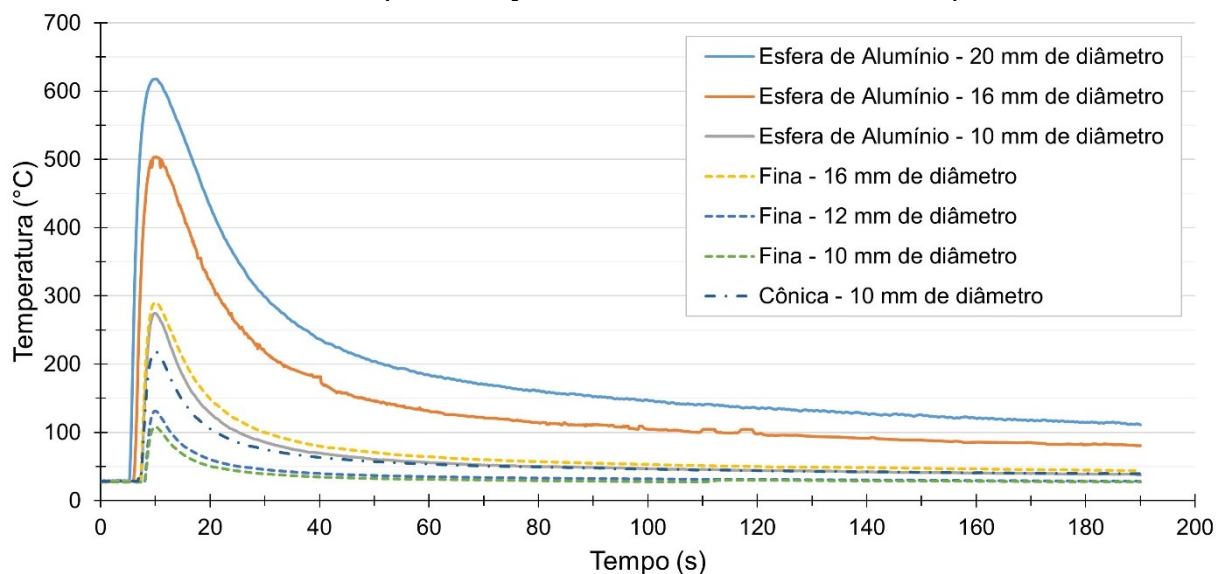
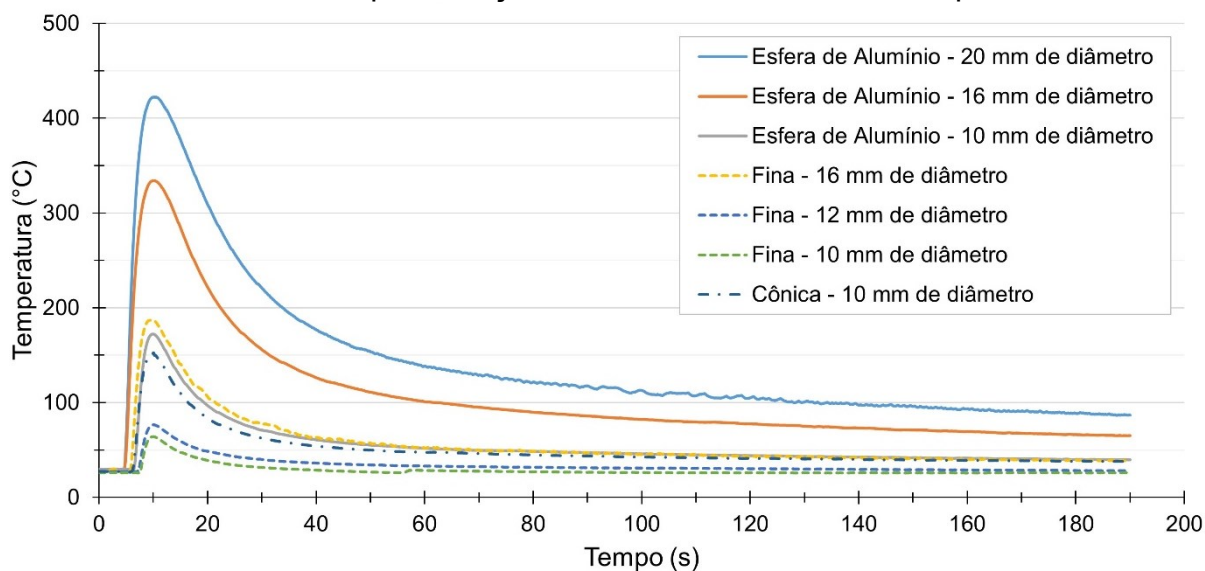


Figura 28 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 9,5 mm de espessura



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 29 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 12,7 mm de espessura



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 30 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 15,9 mm de espessura

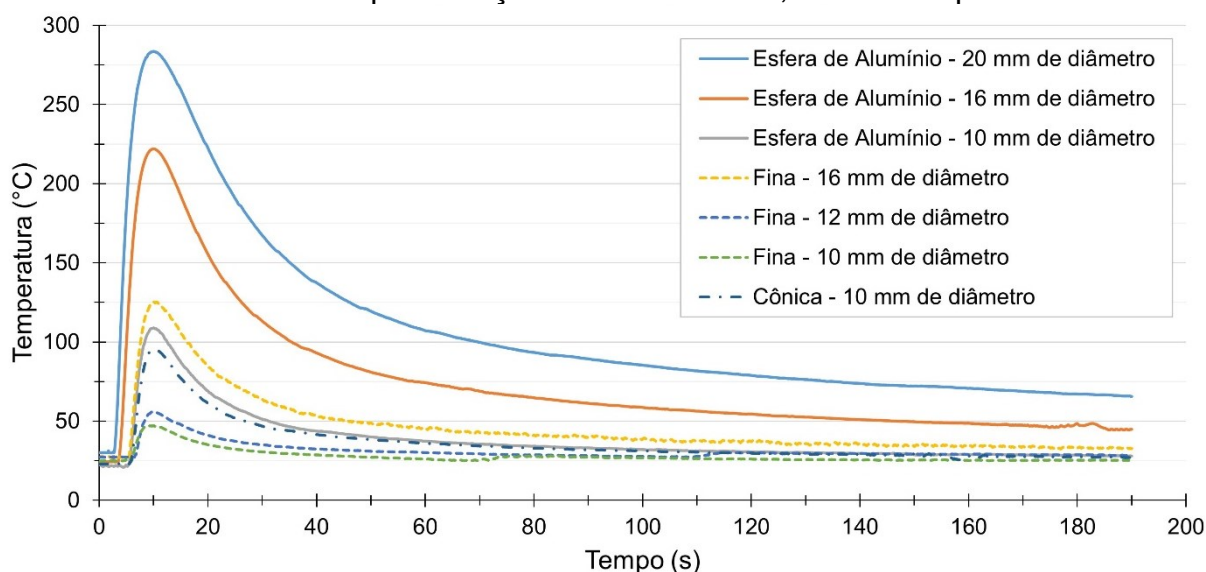


Figura 31 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 19,0 mm de espessura

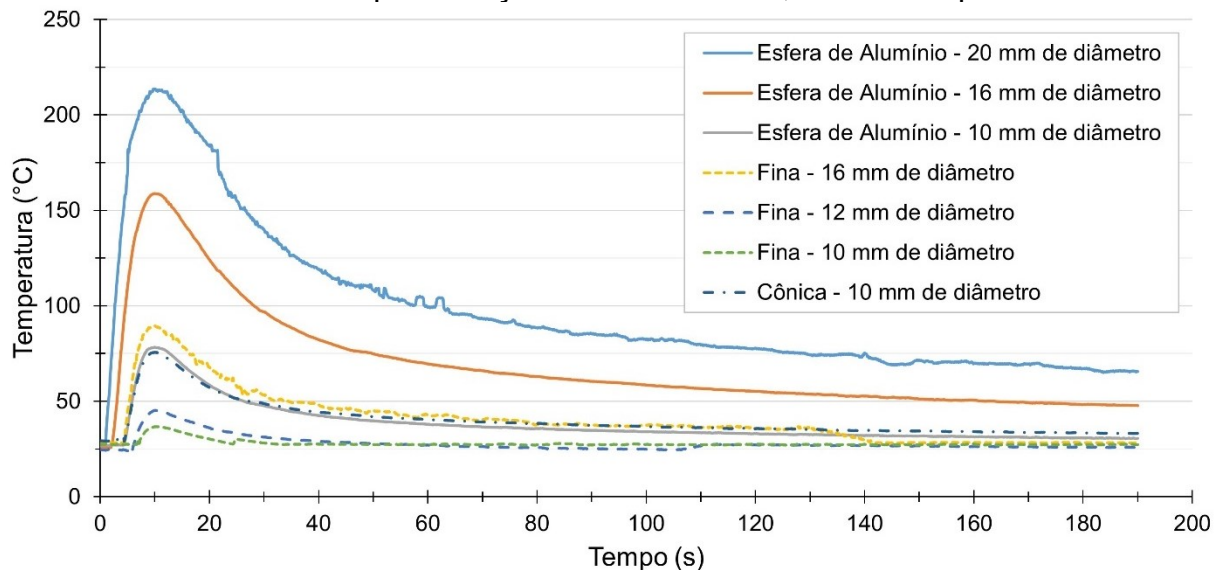
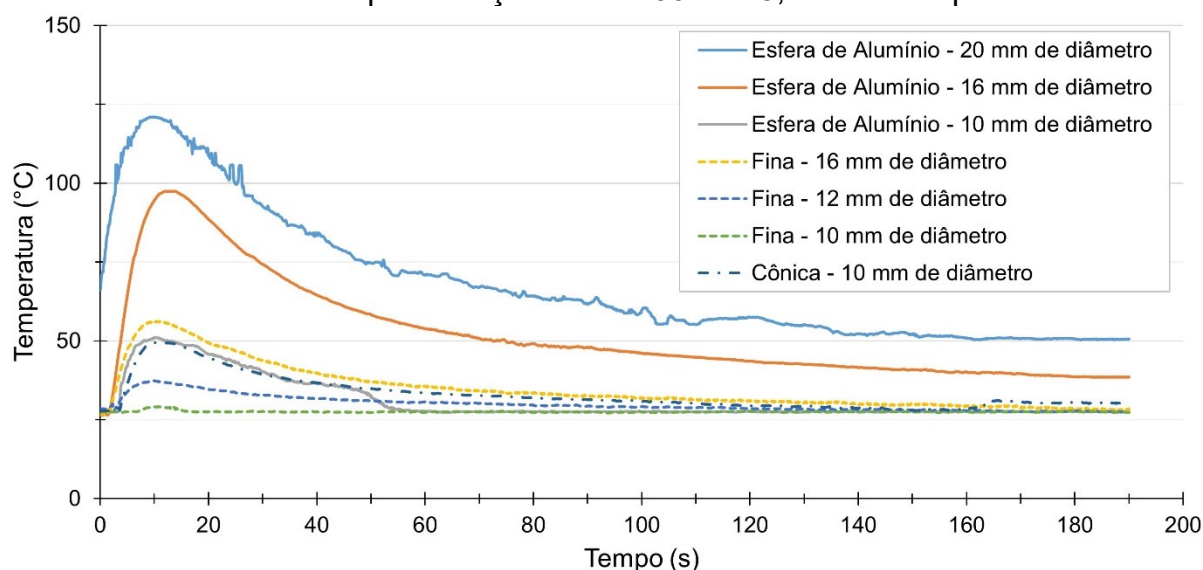


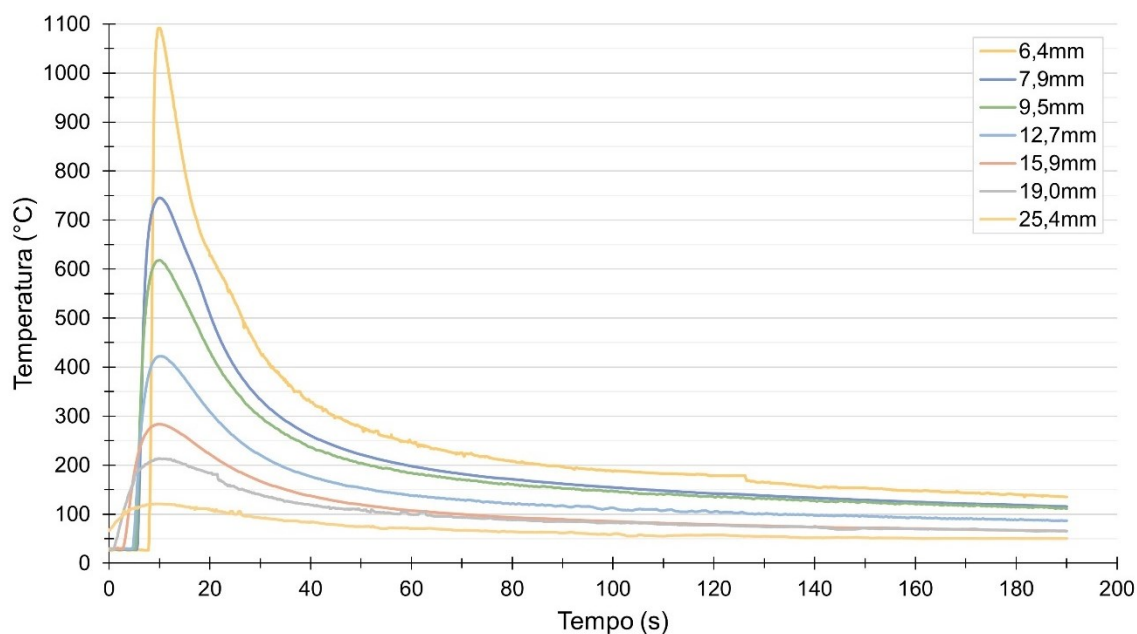
Figura 32 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem de pinos de diferentes diâmetros e pontas de ignição com o processo SW por arco retraído em chapas de aço ASTM A36 de 25,4 mm de espessura



Fonte: elaborado pelo autor

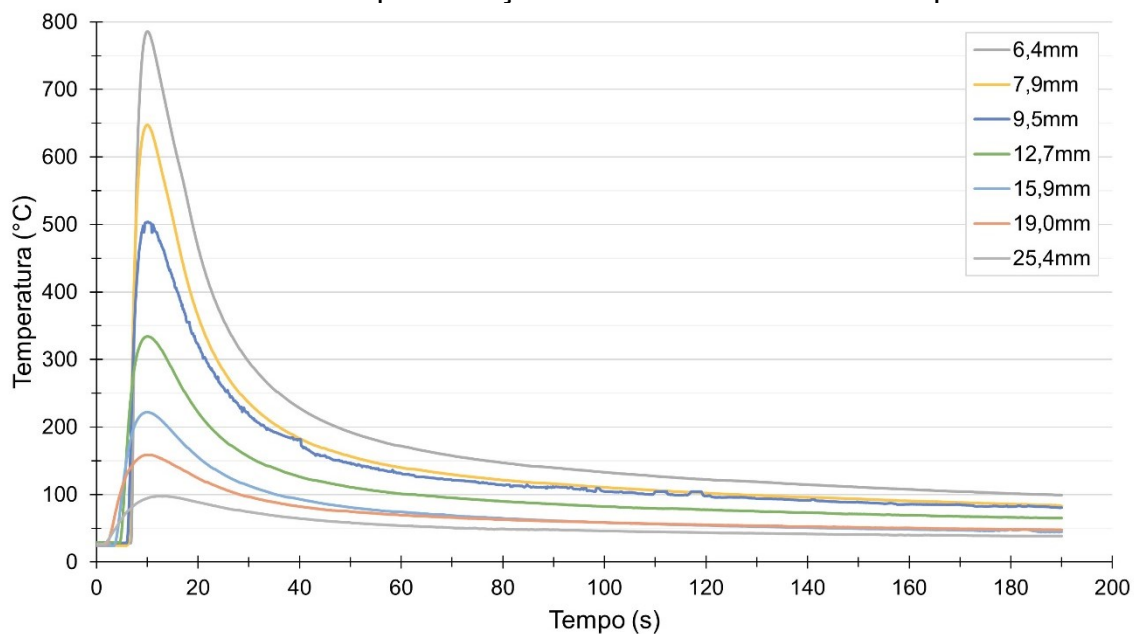
Uma outra forma de agrupamento das curvas de comportamento térmico pelas características do pino, como diâmetro e tipo de ponta de ignição. Nesse sentido, as Figuras 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39 apresentam, respectivamente, as curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 20 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio, 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio, 10 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio, 16 mm de diâmetro e ponta fina, 12 mm de diâmetro e ponta fina, 10 mm de diâmetro e ponta fina e 10 mm de diâmetro e ponta cônica.

Figura 33 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 20 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio em chapas de aço ASTM A36 de diferentes espessuras



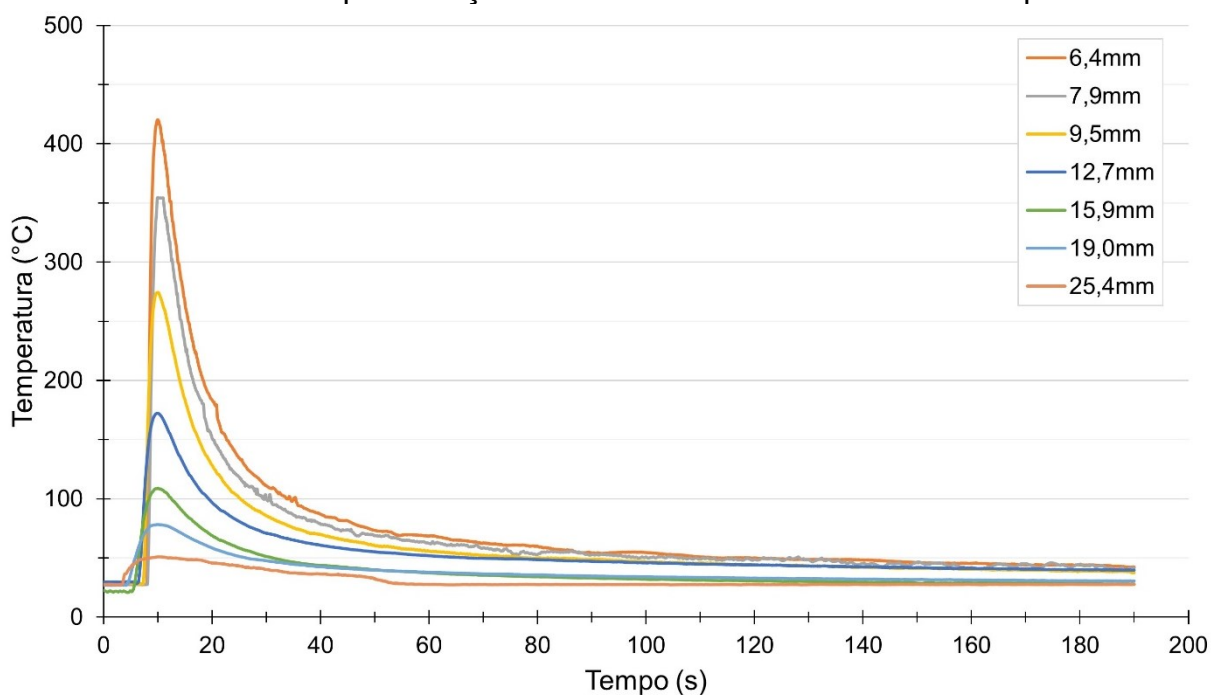
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 34 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio em chapas de aço ASTM A36 de diferentes espessuras



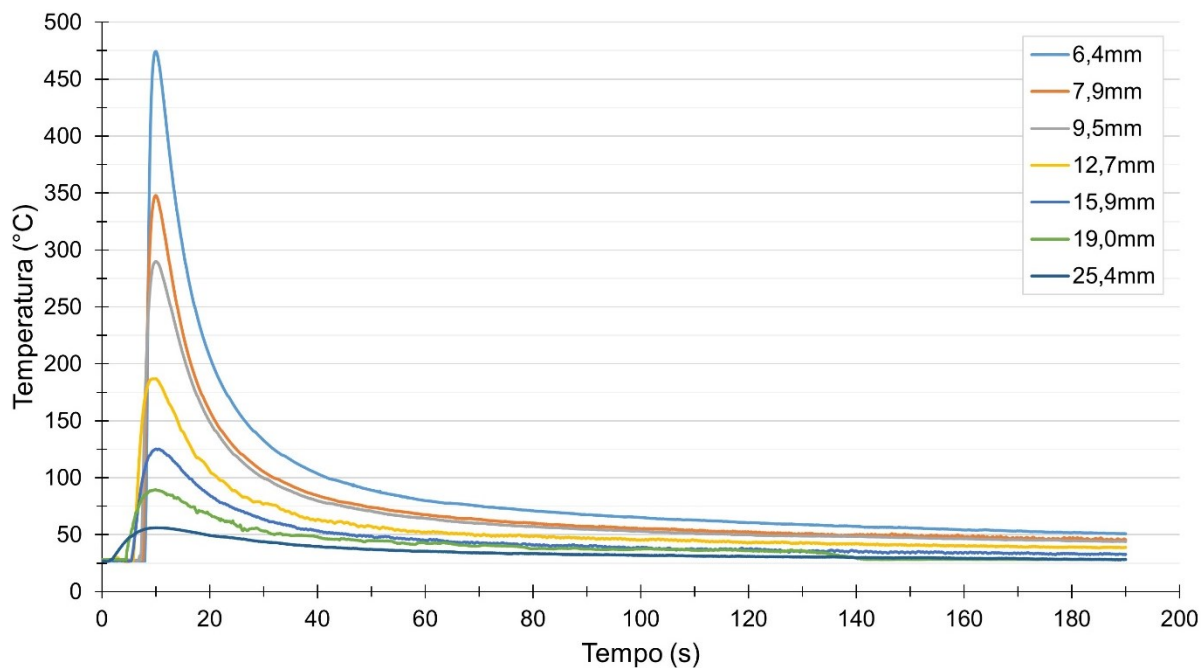
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 35 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 10 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras



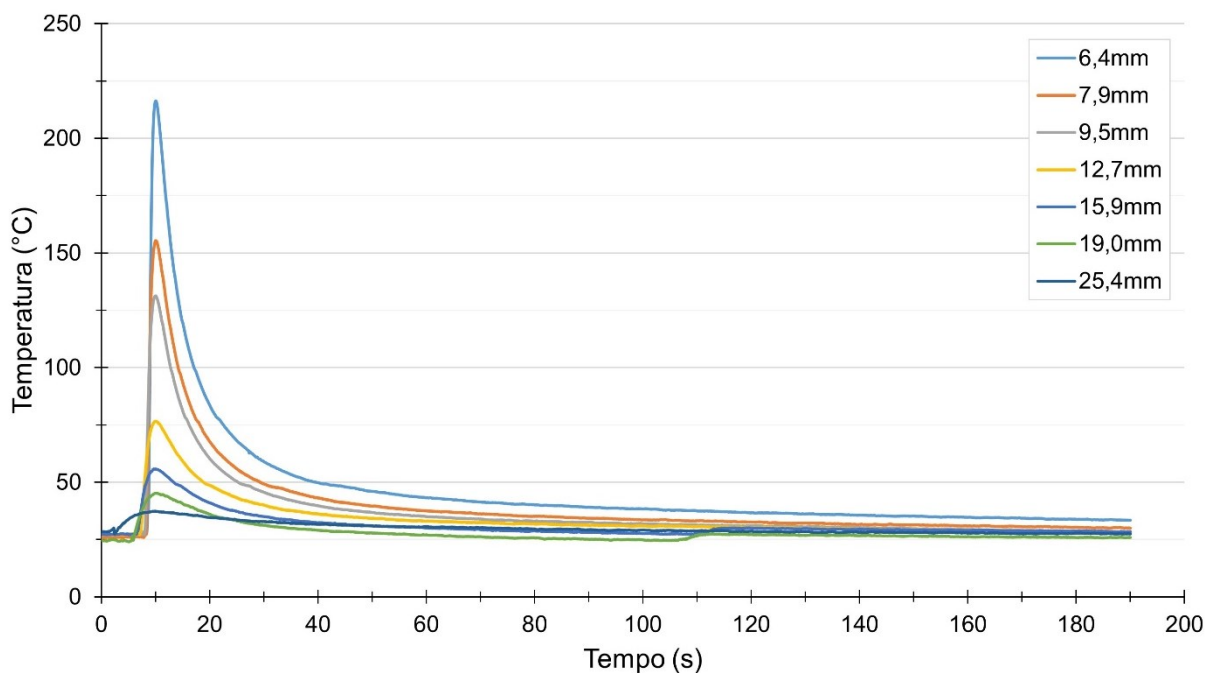
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 36 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 16 mm de diâmetro e ponta fina em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras



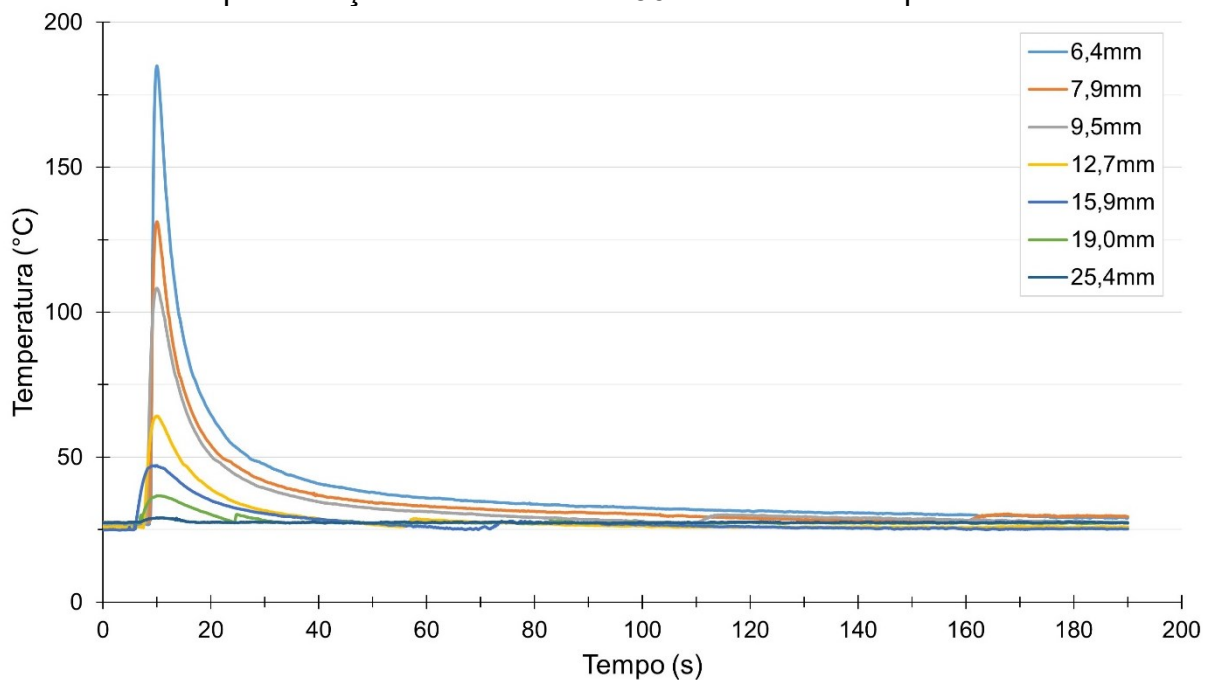
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 37 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 12 mm de diâmetro e ponta fina em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras



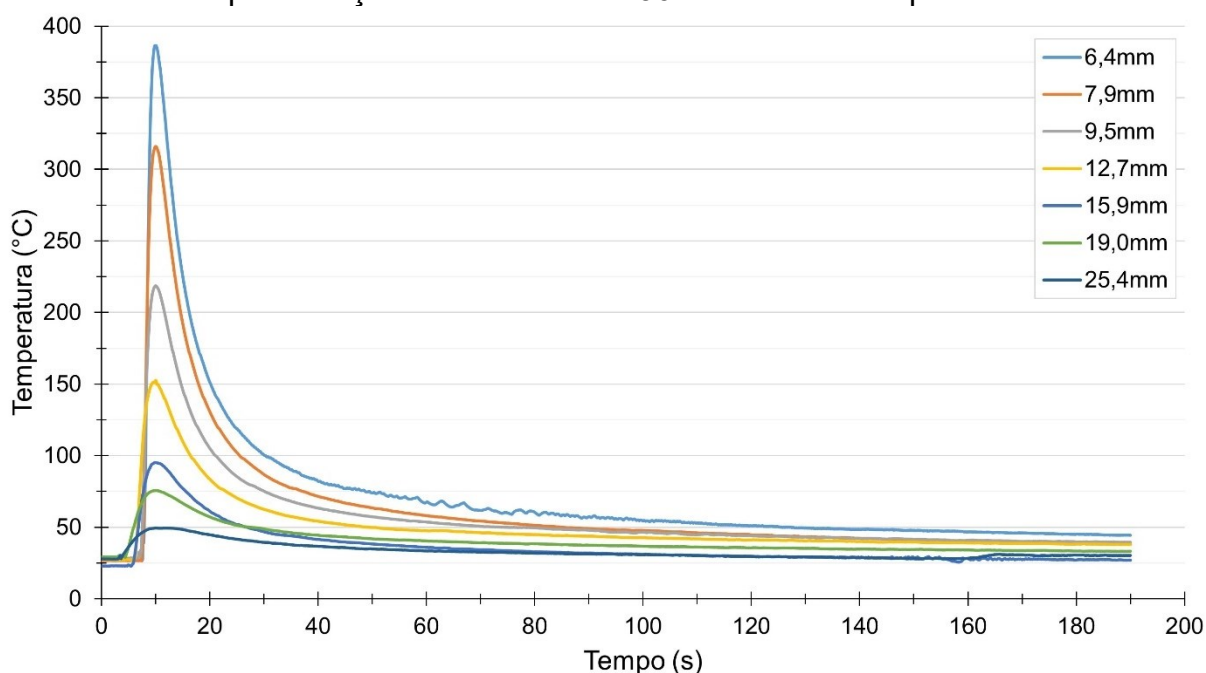
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 38 – Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 10 mm de diâmetro e ponta fina em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 39 - Curvas do comportamento térmico no verso da chapa da soldagem com o processo SW por arco retraído de pinos de 10 mm de diâmetro e ponta cônica em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras



É possível observar, além da temperatura máxima atingida no verso da chapa, também o ciclo de resfriamento, bem como a temperatura no verso da chapa após um determinado tempo. Nesse contexto, foi registrada a temperatura no verso da chapa nos seguintes instantes: 60, 120 e 180 segundos após a temperatura máxima. Além disso, também foi registrado o tempo de resfriamento em que o verso da chapa levou, após o atingir a temperatura máxima, para alcançar as temperaturas de 100°C e 50°C. Assim sendo, a Tabela 7 apresenta o resultado dessas características de temperaturas e tempos de resfriamento. Para a temperatura máxima foi registrada a média dos resultados obtidos das três amostras em cada ensaio.

Tabela 7 – Temperatura e tempo de resfriamento do verso da chapa
(continua)

Ensaio	Temperatura (°C)				Tempo de resfriamento (s)	
	Máxima	Após 60s	Após 120s	Após 180s	100°C	50°C
1	432,4	62,8	48,8	42,5	23,8	103,4
2	354,1	58,7	48,8	41,5	19,5	88,5
3	279,3	52,3	43,2	37,5	15,3	67,5
4	170,6	49,7	43,3	39,7	9,4	57,3
5	106,8	35,4	30,1	28,0	2,6	21,2
6	78,7	36,5	32,6	30,6	-	16,4

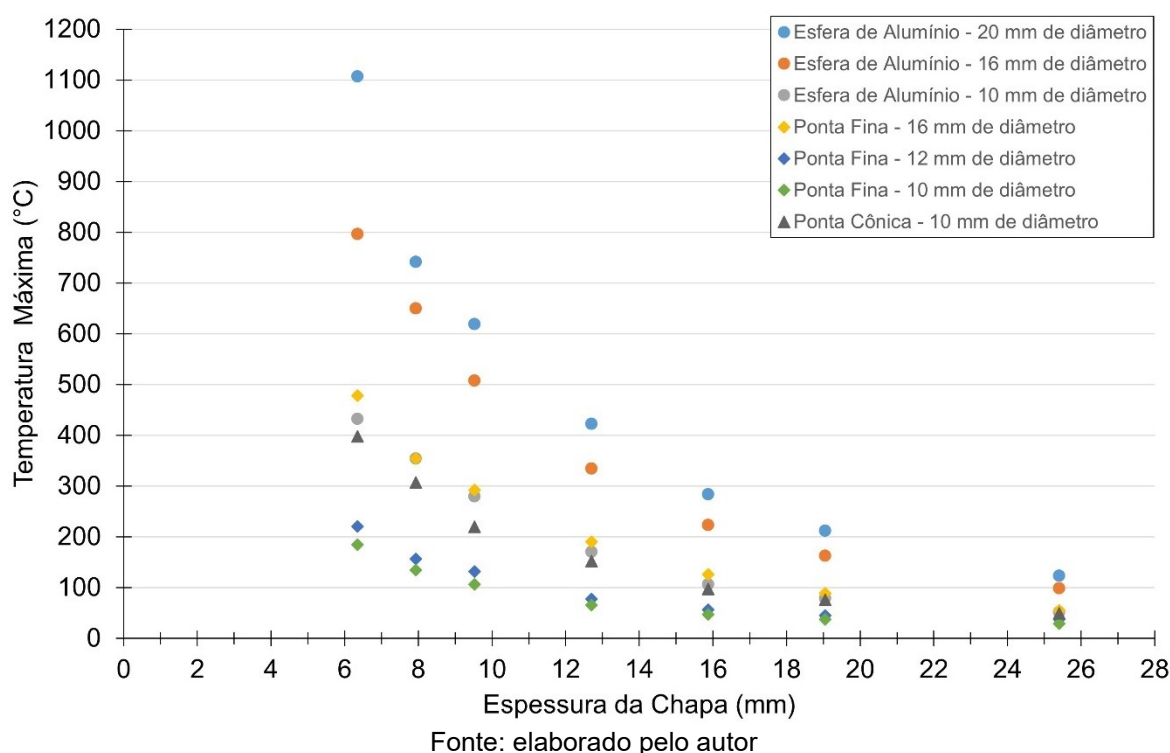
Tabela 7 – Temperatura e tempo de resfriamento do verso da chapa
(conclusão)

Ensaio	Temperatura (°C)				Tempo de resfriamento (s)	
	Máxima	Após 60s	Após 120s	Após 180s	100°C	50°C
7	51,5	27,7	27,4	27,7	-	2,7
8	796,9	157,6	118,9	99,4	176,9	>180
9	649,8	129,6	98,8	82,9	116,3	>180
10	507,7	121,3	94,1	80,6	99,3	>180
11	334,5	95,1	75,2	65,2	52,4	>180
12	223,3	68,8	52,5	44,9	25,4	170,6
13	162,5	66,0	53,8	47,8	18,2	152,1
14	98,8	50,8	42,5	38,5	-	62,5
15	1.107,2	225,5	164,9	135,4	>180	>180
16	741,8	182,3	137,8	115,5	>180	>180
17	619,4	170,2	132,1	111,2	>180	>180
18	422,7	129,0	100,6	86,7	118,1	>180
19	283,8	99,9	76,3	65,6	59,7	>180
20	212,1	93,4	74,3	65,6	49,5	>180
21	123,4	67,0	55,1	50,7	15,0	>180
22	397,7	61,8	49,7	44,4	20,4	115,4
23	307,4	54,3	43,4	38,0	15,6	75,3
24	219,9	50,7	43,2	39,5	11,1	64,6
25	151,9	46,3	40,5	37,9	6,5	39,5
26	97,2	34,2	29,4	27,0	-	16,9
27	76,0	39,1	35,3	33,2	-	17,3
28	49,3	32,6	29,3	30,3	-	-
29	184,8	34,8	31,0	29,1	4,0	17,1
30	134,8	32,1	28,3	29,5	2,1	12,1
31	106,2	30,2	29,5	27,6	1,2	10,3
32	65,4	27,6	25,9	26,0	-	4,2
33	47,4	25,5	25,8	25,3	-	-
34	37,1	27,4	27,4	27,3	-	-
35	29,0	27,4	27,5	27,3	-	-
36	220,5	41,4	36,2	33,5	7,1	29,7
37	156,4	36,2	32,2	30,0	4,2	19,4
38	131,7	34,0	30,5	28,1	2,8	15,3
39	77,7	32,5	29,9	28,1	-	8,9
40	56,3	29,4	29,8	28,5	-	3,4
41	45,5	26,3	26,8	25,9	-	-
42	37,1	30,2	28,5	27,5	-	-
43	478,2	75,2	59,0	50,9	31,8	>180
44	354,4	63,4	51,0	45,6	21,9	124,2
45	292,5	60,0	49,0	44,1	20,0	109,4
46	190,0	49,8	42,5	38,9	11,5	59,0
47	126,2	42,8	35,8	32,8	6,2	35,9
48	88,7	40,2	35,5	28,2	-	23,6
49	55,2	34,1	30,5	28,2	-	9,4

Fonte: elaborado pelo autor

Uma outra forma de mostrar os resultados de temperatura máxima atingida no verso da chapa de cada ensaio, apresentados na Tabela 7, é através da plotagem na forma de gráfico da temperatura máxima em função da espessura da chapa, que está apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Gráfico de Temperatura máxima atingida no verso da chapa por espessura da chapa



É possível observar através do gráfico que para cada tipo de ponta e diâmetro do pino, existe uma certa tendência em relação ao comportamento da temperatura máxima atingida no verso da chapa em relação a espessura da chapa. Nesse sentido, a Figura 41 apresenta o mesmo gráfico apresentado na Figura 40, com complementação de linhas de tendência, que foram traçadas com auxílio do software Microsoft Excel, com a seleção dos pontos do gráfico para cada determinado tipo de ponta de ignição e diâmetro do pino, e a opção de gerar linha de tendência. A opção que obteve o melhor resultado foi da opção de linha de tendência de potência, cujos valores de R-quadrado (R^2) e das equações da temperatura máxima no verso da chapa ($T_{m\acute{a}x}$), em °C, em função da espessura da chapa (t), em mm, estão apresentados na Tabela 8.

Figura 41 – Linhas de tendência para cada tipo de ponta e diâmetro do pino para o gráfico de Temperatura máxima atingida no verso da chapa por espessura da chapa

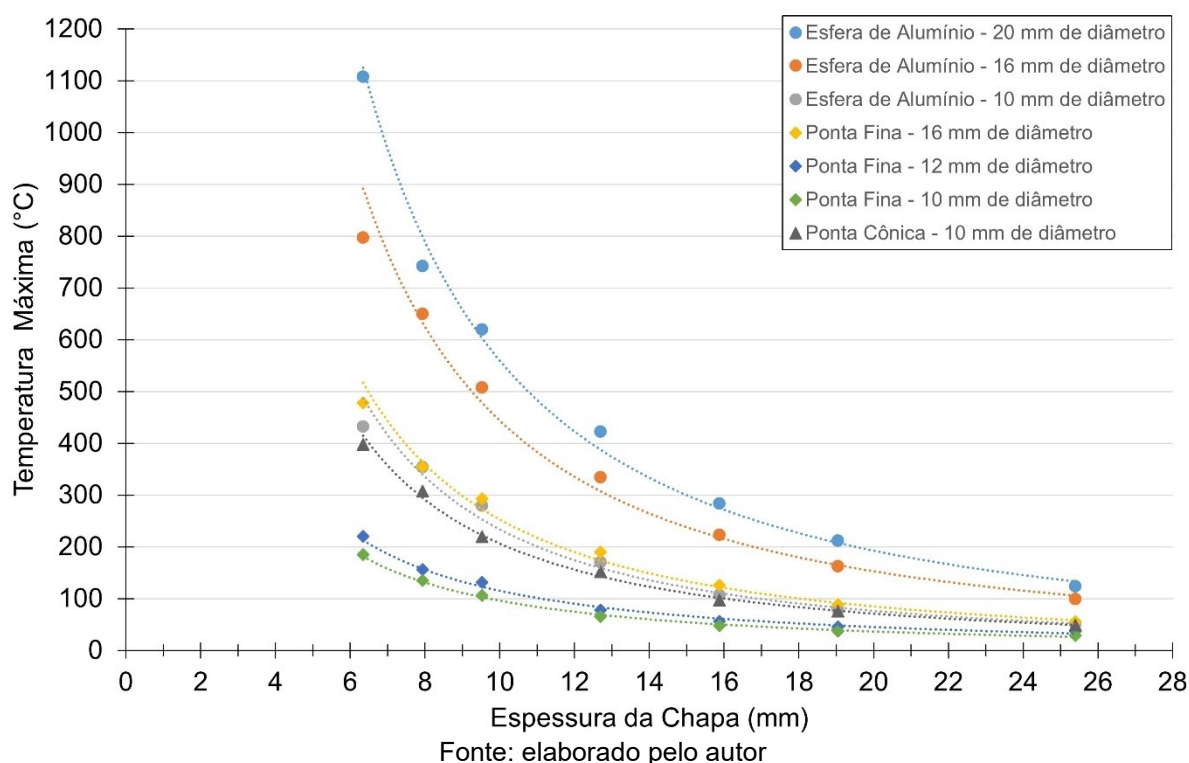


Tabela 8 – Equações das linhas de tendência e R-quadrado

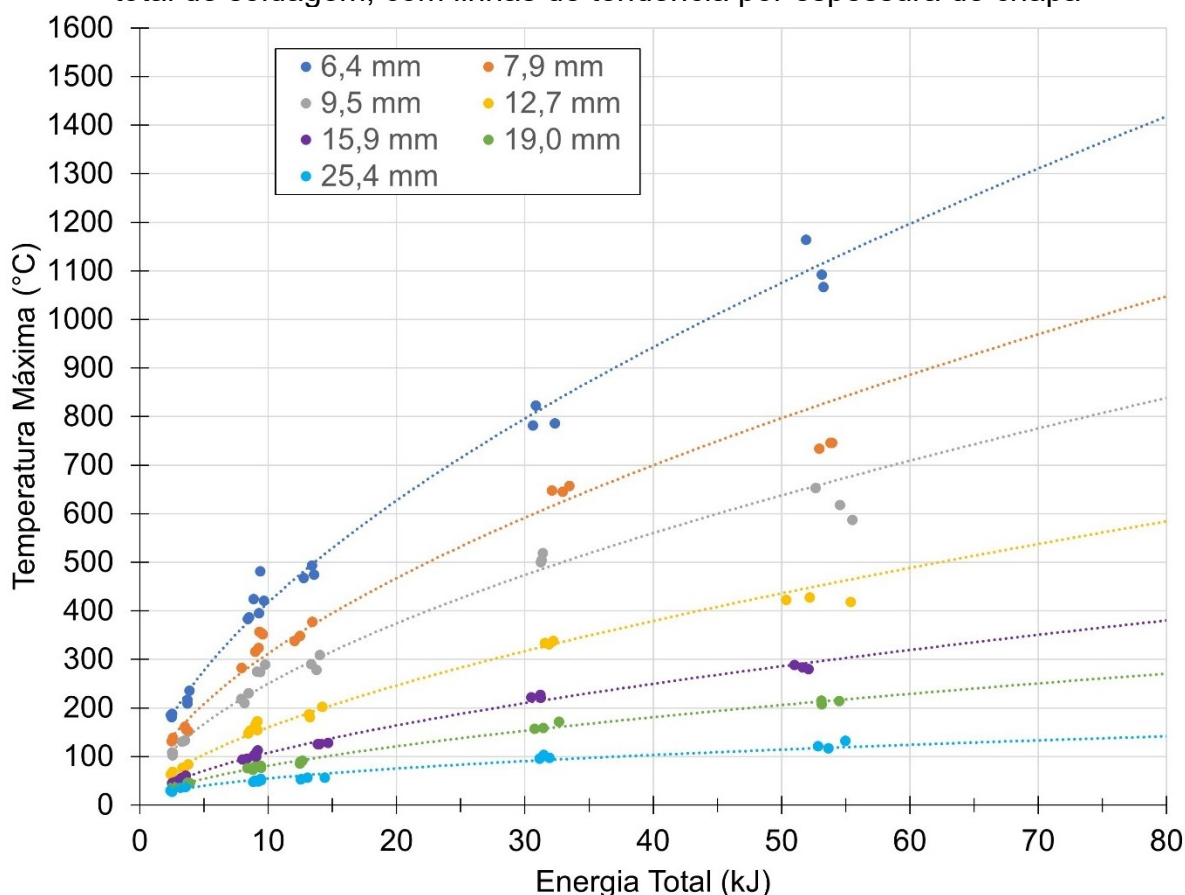
Ponta do Pino	Diâmetro do pino (mm)	Equação da linha de Tendência	R-quadrado
Esfera de alumínio	10	$T_{máx} = 9619,19 \times t^{-1,6143}$	0,9760
Esfera de alumínio	16	$T_{máx} = 15278,64 \times t^{-1,5370}$	0,9821
Esfera de alumínio	20	$T_{máx} = 19327,79 \times t^{-1,5383}$	0,9944
Cônica	10	$T_{máx} = 7105,71 \times t^{-1,5369}$	0,9950
Fina	10	$T_{máx} = 2368,76 \times t^{-1,3918}$	0,9979
Fina	12	$T_{máx} = 2578,12 \times t^{-1,3498}$	0,9940
Fina	16	$T_{máx} = 9448,02 \times t^{-1,5725}$	0,9905

Fonte: elaborado pelo autor

Uma outra forma de reunir os resultados obtidos na soldagem de pinos de diferentes pontas, com diferentes diâmetros, em diferentes espessuras de chapas, está apresentado na Figura 42, na forma de gráfico, em que é possível observar uma relação entre a energia total imposta durante a soldagem dos pinos e a temperatura máxima atingida no verso da chapa, reunidas por espessura de chapa. Adicionalmente, assim como no gráfico apresentado anteriormente, com auxílio do software Microsoft Excel, com a seleção dos pontos do gráfico para uma determinada espessura de chapa, e a seleção da função gerar linha de tendência. Assim como no

gráfico anterior, foi utilizada a opção de linha de tendência de potência, tendo em vista que foi a que obteve melhor resultado nos valores de R-quadrado (R^2), cujos valores estão apresentados na Tabela 9, juntamente com as equações da temperatura máxima no verso da chapa ($T_{m\acute{a}x}$), em $^{\circ}\text{C}$, em função da energia total (E), em kJ.

Figura 42 – Gráfico de Temperatura máxima atingida no verso da chapa X Energia total de soldagem, com linhas de tendência por espessura de chapa



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 9 – Equações das linhas de tendência e R-quadrado

Espessura da Chapa (mm)	Equação da Linha de Tendência	R-quadrado
6,4	$T_{m\acute{a}x} = 107,51 \times E^{0,5886}$	0,9902
7,9	$T_{m\acute{a}x} = 81,71 \times E^{0,5822}$	0,9724
9,5	$T_{m\acute{a}x} = 65,51 \times E^{0,5817}$	0,9768
12,7	$T_{m\acute{a}x} = 38,06 \times E^{0,6233}$	0,9897
15,9	$T_{m\acute{a}x} = 26,69 \times E^{0,6061}$	0,9939
19,0	$T_{m\acute{a}x} = 21,26 \times E^{0,5806}$	0,9965
25,4	$T_{m\acute{a}x} = 19,18 \times E^{0,4563}$	0,9767

Fonte: elaborado pelo autor

O Apêndice E apresenta um exemplo prático da aplicação da ferramenta apresentada em forma de gráfico nas Figuras 41 e 42, subsidiando o operador na escolha de um pino ou na parametrização do processo SW.

Um outro fator que é preciso destacar é que no processo SW existe uma possibilidade de manipulação na escolha dos parâmetros de soldagem, apesar de existir recomendações, tanto dos fabricantes quanto da literatura e normas técnicas, de valores de parâmetros de soldagem usuais, que são frutos de estudos e experimentos realizados. Mesmo assim, esses valores recomendados divergem entre si, como é possível observar na Tabela 10, que apresenta os principais parâmetros de soldagem de um pino de 16 mm de diâmetro com ponta de esfera de alumínio.

Tabela 10 – Parâmetros recomendados para a soldagem com o processo SW por arco retraído de um pino de 16 mm de diâmetro com ponta de esfera de alumínio

Parâmetro de Soldagem	Soyer	Trillmich & Welz	Norma ISO 14555:2014(E)
Corrente de soldagem (A)	1.300	1.200	1.280
Tempo de soldagem (s)	0,65	0,6	0,64
Recuo do pino (mm)	3,0	3,0	-
Protrusão do pino (mm)	3,4	3,3	-

Fonte: Soyer (2006), Trillmich & Welz (2016) e ISO 14555:2014(E) (2014)

Como pode ser observado, os parâmetros de soldagem recomendados por cada autor são divergentes. Trillmich & Welz (2016) apresentam menores valores de corrente e tempo de soldagem, quando comparado com os valores recomendados por Soyer (2006) e a norma ISO 14555:2014 (E) (2014). De fato, a manipulação nos parâmetros de soldagem do processo SW é viável, mas exige estudos, principalmente no que tange à qualificação do procedimento de soldagem de pinos, com os parâmetros escolhidos, que devem ser submetidos conforme preconizado nas normas técnicas. Rosa et al. (2022) apresenta um estudo em que foram soldados pinos roscados com ponta de esfera de alumínio com o processo SW por arco retraído utilizando parâmetros de soldagem diferentes dos recomendados, e estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de soldagem utilizados no estudo de Rosa *et al.* (2022)

Parâmetro de Soldagem	M10	M16	M20
Corrente de soldagem (A)	790	800	970
Tempo de soldagem (s)	0,35	0,5	0,92
Recuo do pino (mm)	1,5	2,0	5,0
Protrusão do pino (mm)	2,5	2,5	1,5

Fonte: Rosa *et al.* (2022)

Os resultados obtidos no presente estudo e no realizado por Rosa *et al.* (2022) estão apresentados na Tabela 12, para melhor comparação.

Tabela 12 – Resultados de temperatura máxima atingida no verso da chapa no presente estudo e no estudo realizado por Rosa *et al.* (2022)

Diâmetro do Pino (mm)	Espessura da Chapa (mm)	Temperatura Máxima no verso da chapa (°C)	
		Presente estudo	Estudo de Rosa <i>et al.</i> (2022)
10	9,5	279,3	241,9
10	12,7	170,6	140,6
10	15,9	106,8	75,4
20	9,5	619,4	402,1
20	12,7	422,7	268,8
20	15,9	283,8	183,6
16	7,9	649,8	389,5

Fonte: elaborado pelo autor

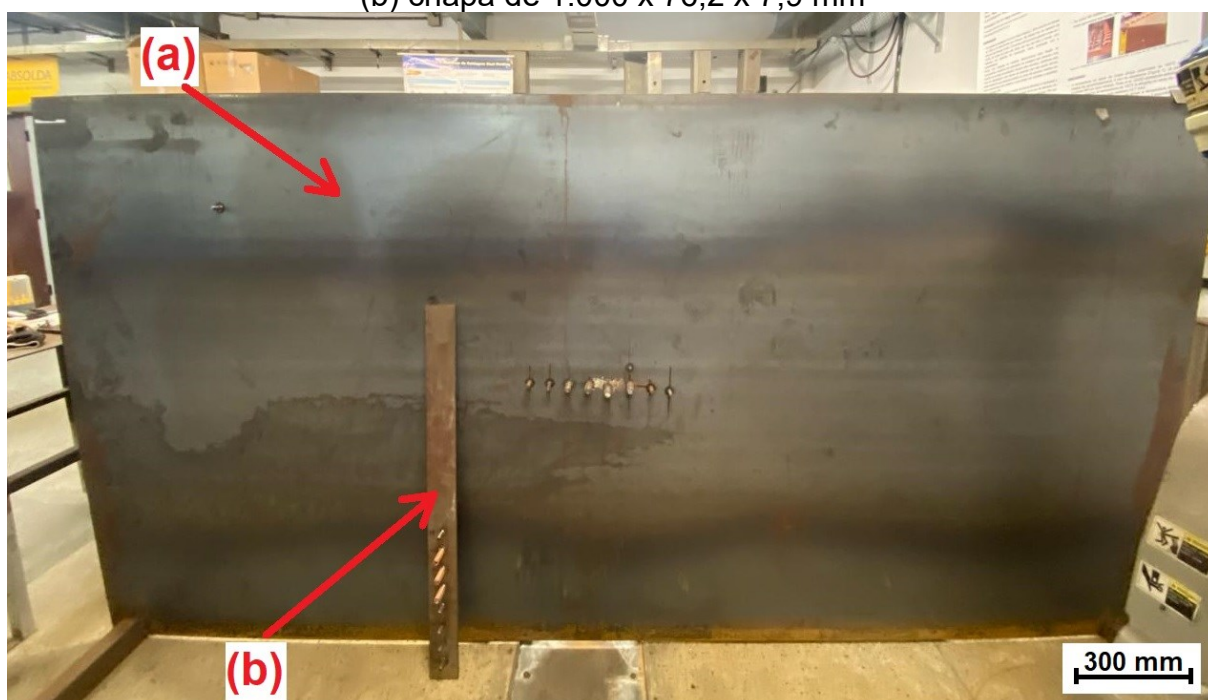
Comparando os parâmetros utilizados no presente estudo (Tabela 4) com os parâmetros do estudo realizado por Rosa *et al.* (2022), é possível observar que para os pinos de 10 mm de diâmetro não houve muita diferença, sendo que as temperaturas máximas atingidas estão próximas, com diferenças de até 40°C entre os estudos. Já para os pinos com 16 mm e 20 mm de diâmetro, a diferença é relevante, tendo em vista que os valores dos parâmetros de corrente de soldagem utilizados no estudo apresentado por Rosa *et al.* (2022) são 38,5% e 42,9% menores que os utilizados no presente estudo para os pinos com 16 mm e 20 mm de diâmetro, respectivamente. Essa redução implica numa menor energia de soldagem, e conseqüentemente, numa menor temperatura máxima atingida no verso da chapa, que significou uma diferença de até 260°C, aproximadamente, entre os estudos.

Um outro questionamento que pode surgir entre os experimentos realizados neste estudo e as soldagens de pino em campo é com relação a dissipação facilitada da energia introduzida pelo processo durante a soldagem em campo, em virtude das dimensões grandes da chapa base, conseguindo com que o calor seja dissipado de

forma mais rápida, e conseqüentemente, reduzindo a temperatura máxima atingida no verso da chapa. Já as chapas utilizadas no presente estudo possuem um comprimento de 1.000 mm e uma largura de 76,2 mm (para as chapas de 6,4 mm, 7,9 mm, 9,5 mm, 12,7 mm e 15,9 mm) e de 101,6 mm (para as chapas de 19,0 mm e 25,4 mm de espessura).

Sendo assim, uma chapa de aço ASTM A36 de 7,9 mm de espessura com dimensões maiores, de 3.000 mm de comprimento e 1.500 mm de largura, foi utilizada para um rápido experimento de aquisição de temperaturas no verso da chapa. A Figura 43 apresenta a chapa de grande dimensão, além de uma chapa utilizada nos experimentos de levantamento térmico.

Figura 43 – Dimensões das chapas: (a) chapa de 3.000 mm x 1.500 mm x 7,9 mm e (b) chapa de 1.000 x 76,2 x 7,9 mm



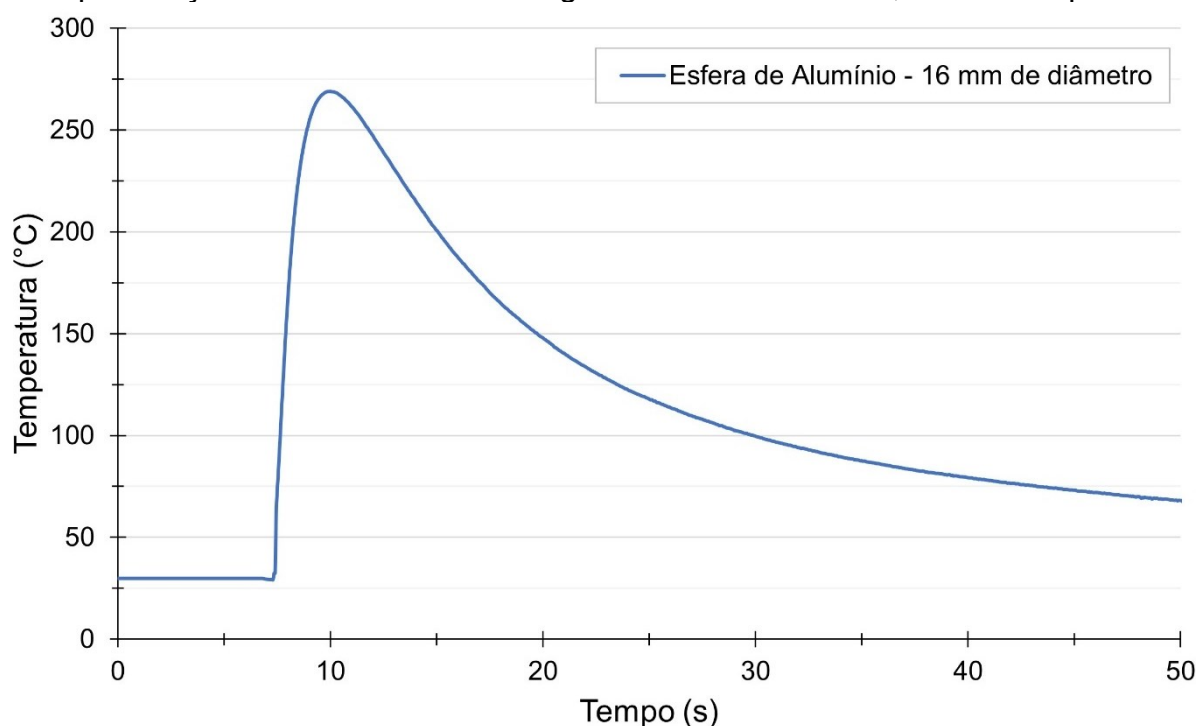
Fonte: elaborado pelo autor

Para tal, um pino de 16 mm de diâmetro com ponta de esfera de alumínio foi soldado, com a mesma fonte e pistola de soldagem (uma SOYER/BMK-16i, equipada com uma pistola de soldagem SOYER/PH-3N) e os mesmos parâmetros de soldagem utilizados no estudo realizado por Rosa *et al.* (2022), que estão apresentados na Tabela 11.

Através da curva do comportamento térmico obtida (Figura 44), é possível observar que a temperatura máxima atingida no verso da chapa foi de 268,9 °C, cerca

de 30% inferior que a temperatura obtida no estudo de Rosa *et al.* (2022). Assim sendo, é possível afirmar que os gráficos de temperatura máxima atingida no verso da chapa por espessura de chapa e por energia total de soldagem, apresentados neste estudo, possuem um fator de segurança para aplicações em campo.

Figura 44 - Curva do comportamento térmico no verso da chapa de um pino de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio soldado com o processo SW por arco retraído e parâmetros de soldagem do estudo realizado por Rosa *et al.* (2022) em chapa de aço carbono ASTM A36 de grandes dimensões e 7,9 mm de espessura



Fonte: elaborado pelo autor

4.2.2 Processo SW por Descarga Capacitiva

De modo a obter informações sobre o comportamento térmico da soldagem de pinos utilizando o processo SW por descarga capacitiva, foram realizados experimentos utilizando pinos roscados de 10 mm de diâmetro (M10) soldados em chapas de aço carbono ASTM A36 de diferentes espessuras (2,0 mm, 2,6 mm, 3,2 mm e 6,4 mm), na posição plana de soldagem.

As medições de temperaturas no verso das chapas foram realizadas utilizando sensores termopares tipo K, através de um sistema de aquisição de temperaturas portátil IMC/SAT. Com as curvas do comportamento térmico do

processo para cada espessura de chapa, foi possível extrair o valor da temperatura máxima atingida, bem como o tempo de resfriamento das chapas.

A fonte de soldagem utilizada em todos os experimentos foi uma SOYER/BMS-10N, equipada com uma pistola de soldagem de pinos SOYER/PS-3K, ou seja, foi utilizada a subvariação do processo SW por descarga capacitiva com contato inicial.

Os principais parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos que possuem relevância para este estudo estão descritos na Tabela 13.

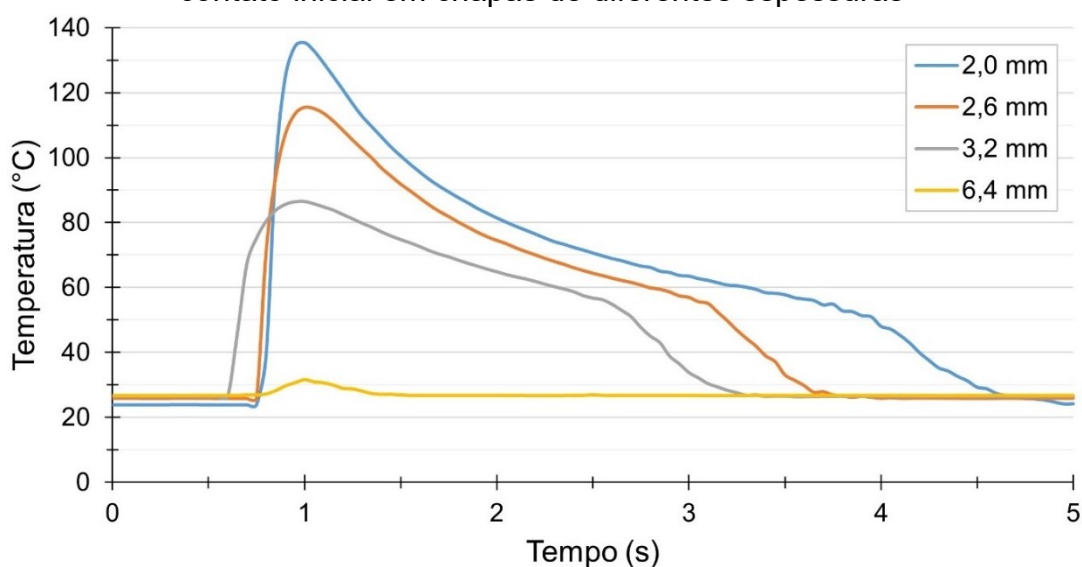
Tabela 13 – Principais parâmetros de soldagem utilizados

Parâmetro de Soldagem	Valor
Tensão de Carga (V)	180
Pressão da mola	Médio
Protrusão do pino (mm)	1,5

Fonte: elaborado pelo autor

As aquisições de temperaturas feitas pelo sistema de aquisição de temperaturas portátil nas diferentes espessuras de chapas na soldagem de pinos M10 foram plotados na forma de gráfico em função do tempo e estão apresentados na Figura 45.

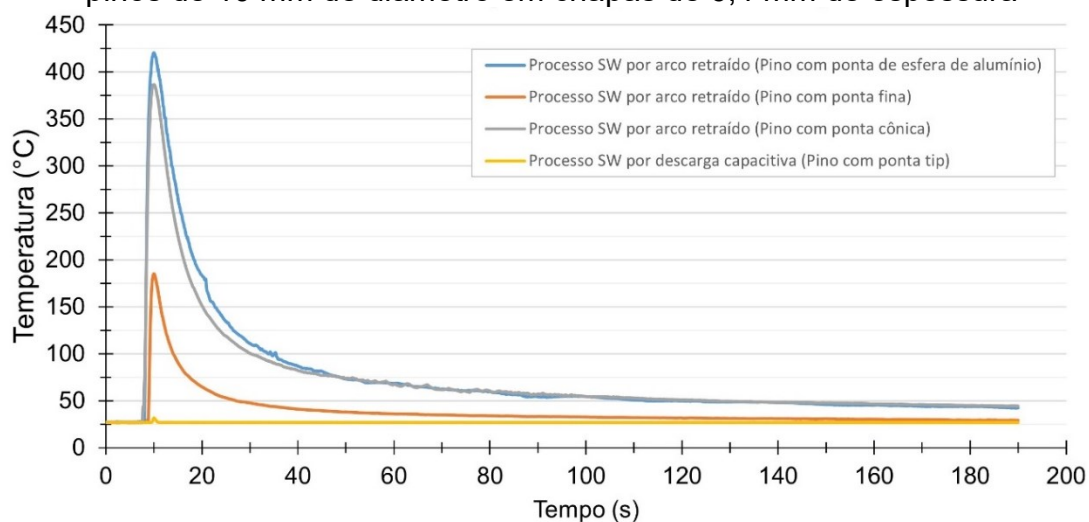
Figura 45 – Ciclo térmico para soldagem de pinos M10 com processo DC com contato inicial em chapas de diferentes espessuras



Fonte: elaborado pelo autor

É possível verificar que a temperatura mais alta atingida no verso da chapa foi maior para a chapa de 2 mm de espessura, atingindo a temperatura máxima de 135°C. Para as chapas de 2,6 mm, 3,2 mm e 6,4 mm de espessura, as temperaturas máximas atingidas no verso da chapa foram de 115°C, 87°C e 32°C, respectivamente. Além disto, foi possível realizar uma comparação com os resultados obtidos na soldagem de pinos de 10 mm de diâmetro com o processo SW por arco retraído em chapas de 6,4 mm de espessura, em que as curvas do comportamento térmico para cada variante estão apresentadas na Figura 46.

Figura 46 – Ciclo térmico da soldagem com diferentes variantes do processo SW de pinos de 10 mm de diâmetro em chapas de 6,4 mm de espessura



Fonte: elaborado pelo autor

É possível observar que os pinos de mesmo diâmetro soldados com o processo SW por arco retraído atingiram cerca de 400°C, para os pinos com ponta de esfera de alumínio e ponta cônica, e de 185°C para o pino com ponta fina, enquanto o pino soldado com o processo SW por descarga capacitiva praticamente não sofreu alteração da temperatura da chapa.

Outro fator relevante que é possível efetuar uma comparação é o tempo de resfriamento do verso da chapa. Utilizando o processo SW por arco retraído, o manuseio completo das peças pelo operador, sem a necessidade de proteção como luvas antitérmicas, é possível apenas 30 segundos após a soldagem, para pino com ponta fina, e mais de 180 segundos após a soldagem, para pinos com ponta de esfera de alumínio e com ponta cônica, em que a temperatura atinge patamar próximo a

40°C. Já no processo DC, é possível verificar que a temperatura da chapa já atinge a temperatura ambiente em menos de 1 segundo após a soldagem.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a temperatura atingida no verso da chapa durante a soldagem de pinos utilizando diferentes variantes do processo SW, utilizando diferentes diâmetros de pinos e diferentes espessuras de chapa base. Os parâmetros de soldagem utilizados no estudo foram os recomendados pela literatura e pelas normas técnicas, de acordo com as características do pino (diâmetro e geometria da ponta e variante do processo SW utilizada).

O sistema de monitoração customizado para o processo SW, justificado pelas características intrínsecas ao processo, permitiu um melhor entendimento acerca do processo e suas peculiaridades, através da sincronização da movimentação do pino com o oscilograma de corrente e tensão, permitindo monitorar os fenômenos com suficiente precisão para melhor entendimento das etapas e caracterização do processo. Nesse sentido, para o processo SW por arco retraído, foi possível dividir o período em que a fonte comanda corrente em 4 regiões: pré-arco, arco piloto, arco principal e pós-arco. Os resultados mostram que a maior parte da energia introduzida durante a soldagem, acima de 94% da energia total, ocorre durante a região do arco principal.

A temperatura máxima no verso da chapa base é determinada pela energia de soldagem introduzida pelo processo. Desta forma, os parâmetros que soldagem que influenciam no cálculo da energia devem ser monitorados para se poder estimar qual será a temperatura máxima que será atingida no verso da chapa base de uma determinada espessura.

Os resultados apresentados mostram que, para pinos de mesma geometria da ponta e soldados com a mesma variante do processo em uma chapa base de mesma espessura, a temperatura máxima atingida no verso da chapa é maior quanto maior é o diâmetro do pino, o que de certa forma era o resultado esperado, tendo em vista que os parâmetros de soldagem (corrente, tensão e recuo) são maiores para diâmetros de pinos maiores, acarretando uma maior energia de soldagem, e conseqüentemente, aquecendo mais o verso da chapa base.

Quanto às diferenças do tipo de ponta de ignição dos pinos do processo SW por arco retraído, e conseqüentemente, os parâmetros selecionados intrínsecos a cada tipo de tecnologia empregada, os resultados observados mostram que os pinos de ponta fina soldados com emprego da tecnologia assistida por campo magnético

obtiveram os menores valores de temperatura máxima atingida no verso da chapa, reduzindo de 40 a 62% quando comparado com as temperaturas obtidas na soldagem de pinos com ponta de esfera de alumínio de mesmo diâmetro.

O processo SW por descarga capacitiva foi o que obteve a menor temperatura máxima atingida no verso da chapa base, quando comparado com um pino de mesmo diâmetro soldado com o processo SW por arco retraído. Apesar da corrente de soldagem no processo SW por descarga capacitiva ser da ordem de 10 vezes maior, podendo chegar a patamares de 10.000 A, o tempo de soldagem é muito inferior, de até 3 ms, correspondendo menos de 1% do tempo de soldagem do processo SW por arco retraído, justificando a menor temperatura atingida no verso da chapa base.

O exemplo prático de utilização da ferramenta, em forma de gráfico, confeccionada no presente estudo, serve como subsídio para tomada de decisão em aplicações com restrição térmica que utilizem o processo SW, seja na escolha do pino, seja no suporte à parametrização do processo.

Conclui-se que o presente trabalho contribuiu para a caracterização das diferentes variações do processo SW, bem como a criação de uma ferramenta de consulta sobre o comportamento térmico no verso da chapa, de modo que possa servir como subsídio para uma tomada de decisão em aplicações com restrição térmica que utilizem o processo SW, impostas pelo material presente no verso da chapa base.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho atingiram resultados importantes para o processo SW. Outrossim, o referido processo, quando comparado com outros processos de soldagem a arco, carece de pesquisas e desenvolvimentos, fazendo com que seja promissor para novas pesquisas que possibilitem aplicações do processo SW em diversos setores da indústria. Nesse contexto, são apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Ampliação dos resultados obtidos nesse estudo com um número maior de ensaios, variando-se os parâmetros de soldagem, e conseqüentemente, a energia introduzida durante a soldagem, complementando as informações de comportamento térmico obtidas;
- Desenvolvimento de uma interface gráfica (aplicativo) específico para simulação da temperatura atingida no verso da chapa;
- Estudar a influência dos gases, tanto na caracterização e estabilidade do processo, bem como na temperatura atingida no verso da chapa;
- Estudar a eficiência do processo SW, para as diversas variações existentes, bem para diferentes geometrias e dimensões de pinos, através de técnicas de calorimetria;
- Estudar o uso de técnica de pré-aquecimento por indução do pino e/ou da chapa, de modo que haja uma redução da energia necessária para a soldagem do pino, e conseqüentemente, uma menor temperatura no verso da chapa;
- Desenvolver e validar modelos numéricos do comportamento térmico, para prever a temperatura máxima atingida no verso da chapa e tempo de resfriamento através da simulação da soldagem em operação com o processo SW; e
- Estudar as influências metalúrgicas dos ciclos térmicos do processo SW.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2020: Structural Welding Code - Steel**. 24 ed. Miami, 2020.
- CARY, H. B. **Arc Welding Automation**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995.
- CHAMBERS, H. A. **Principles and Practices of Stud Welding**. Pci Journal. Elyria, Ohio, 2001.
- CRAMER, H.; JENICEK, A.; MÜLLER, M.; FORSTER, G.; HARTZ-BEHREND, K; SCHEIN, J. **SRM stud welding – a new arc stud welding variant**. Welding and Cutting, v. 13, n. 05, p. 24–29, 2014.
- DUTRA, J. C. **Ciência e Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico: Dos Fundamentos às Modernas Técnicas**. 1 ed. Editora Alfa Centauri, 2023.
- EYRES, D. J., & BRUCE, G. J. **Welding and cutting processes used in shipbuilding**. In Ship Construction, 81–101 (2012). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097239-8.00009-X>.
- GERDAU. **Certificado de Qualidade nº 8132313755/000010**. Gerdau, 2021.
- HARADA, Y.; SADA, Y.; KUMAI, S. **Joining steel studs and steel plates by solid-state stud welding and estimation of temperature near the joint interface**. Journal of Manufacturing Processes 23. p. 75–82, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.05.009>.
- HSU, C. & MUMAW, J. **Weldability of Advanced High-Strength Steel Drawn Arc Stud Welding**. Welding Journal, vol. 90, pp. 45-53, March 2011.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14555: Welding – Arc stud welding of metallic materials**. Switzerland, 2014.
- KAPLER, M.; NOWACKI, J.; SAJEK, A. **The Development of Arc Stud Welding**. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol. 2019, nº 4, 2019, p. 27–38. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.17729/ebis.2019.4/3>.
- MAGDA, A., BURCA, M., & LEGO, M. **Research Regarding Capacitor Discharge Stud Welding with Tip Ignition on Galvanized Thin Sheets**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 416 (2018), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012015>.
- NELSON, E. F. **Stud Welder**. US Patent N° US2191494A, Publication 1940-02-27.
- NISHIKAWA, W. **The principle and application field of stud welding**. Welding International 17, p. 699–705, 2003. <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3170>.

OH, H. S.; LEE, J. H.; YOO, C. D. **Simulation of capacitor discharge stud welding process and void formation**. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(3), 274–281 (2007). <https://doi.org/10.1179/174329307X166803>.

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BOLMSJÖ, G. **Welding Robots: technology, system issues and applications**. 1 ed. Springer, 2005.

RAMASAMY, S. **Drawn arc aluminum stud welding for automotive applications**. *JOM* 54, 44–46 (2002). <https://doi.org/10.1007/BF02711866>.

RAMASAMY, S.; GOULD, J.; WORKMAN, D. **Design-of-Experiments Study to Examine the Effect of Polarity on Stud Welding**. An investigation of factors that influence the quality of short duration draw arc stud welding of steels. *Welding Journal*, p. 19-26, February 2002.

ROSA, A. F., SILVA, R. H. G., MARCHIONE, T. S. L., MARINHO, R. R., & DALPIAZ, G. **Análise e caracterização térmica da soldagem de pinos (Stud Welding) em aplicações do setor naval**. In: ANAIS DO 29º CONGRESSO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 2022, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/sobena-congresso/sobena-2022/trabalhos/analise-e-caracterizacao-termica-da-soldagem-de-pinos-stud-welding-em-aplicacoes?lang=pt-br>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SCOTTI, A.; NASCIMENTO, A.S.; BATISTA, M.A.; NASCIMENTO, V. C. **Comparação métodos para cálculo da potência elétrica através de uma abordagem experimental/matemática, em processos de soldagem a arco**. 8º Congresso iberoamericano de engenharia mecanica. Cusco, Peru, 2007.

SOYER. **Operating Instructions: BMH-22i Stud Welder**. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH. Germany, 2006.

SOYER. **Operating Instructions: BMK-16i Stud Welder**. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH. Germany, 2013.

SOYER. **Operating Instructions: Stud Welder BMS-10N and BMS-10NV**. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH. Germany, 1995.

SOYER. **Produktschulung Bolzenschweissen (In Germany)**. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH. Germany, 2006.

SOYER. **Stud Welding Products 2022/2023**. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH. Germany, 2022.

STANLEY. **Problem-Solving Was Ted Nelson's First Love**. Stanley Engineered Fastening, 2019. Disponível em: <https://www.stanleyengineeredfastening.com/en/News-and-Stories/Problem-Solving-Was-Ted-Nelson-First-Love>. Acesso em 18 abr. 2023.

STEELE, L. J.; MARTIN, H.; McCARTHY, A. E. **Electric Welding**. US Patent Grant Nº US1410421A, Publication 1922-03-21.

STUDWELDINGSTORE. **StudWeldingStore.com**, 2024. Disponível em: <https://www.studweldingstore.com/products/1-2-13-mild-steel-full-thread-arc-studs-100-ea>. Acesso em: 07 fev. 2024.

TRILLMICH, R. & WELZ, W. **Stud welding: principles and application**. DVS media GmbH, Düsseldorf, 2016.

ZEEMANN, A. **Energia de Soldagem**. Rio de Janeiro, 2003.

ZHANG, Q.; ZHANG, B.; LUO, Y.; YANG, G.; ZHENG, H.-X. **Effect of the Welding Process on Microstructure, Microhardness, and Residual Stresses of Capacitor Discharge Stud Welded Joint**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 144, 2022. <https://doi.org/10.1115/1.4051533>.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO SW POR ARCO RETRAÍDO

De modo a obter a caracterização da soldagem de pinos por arco retraído, foram realizados experimentos com pinos roscados de diferentes diâmetros, com pontas de ignição diversas, utilizando 3 variantes desse processo:

- a) soldagem de pinos com ponta de esfera de alumínio e utilização de anel cerâmico e sem gás de proteção;
- b) soldagem de pinos com ponta cônica e utilização de gás de proteção; e
- c) soldagem de pinos com ponta fina com emprego da técnica assistida por campo magnético.

Para tal, foram utilizados pinos roscados de 10 mm, 16 mm e 20 mm de diâmetro com ponta de esfera de alumínio (M10, M16 e M20, respectivamente), pinos roscados de 12 mm de diâmetro (M12) com ponta cônica e pinos roscados de 10 mm, 12 mm e 16 mm de diâmetro com ponta fina (M10, M12 e M16, respectivamente). Todos os pinos soldados em chapas de aço ASTM A36 de 9,5 mm de espessura, na posição plana de soldagem.

É preciso ressaltar que os pinos com ponta cônica, apesar de terem roscas com diâmetro de 12 mm (M12), possuem redução de diâmetro para 10 mm. Sendo assim, os parâmetros utilizados para soldagem deles são aqueles para pinos com 10 mm de diâmetro, uma vez que é essa parte do pino com diâmetro menor que é fundida para a soldagem dele na chapa base. Já os pinos com ponta de esfera de alumínio e com ponta fina não possuem essa redução de diâmetro.

A fonte de soldagem empregada nos experimentos foi uma SOYER/BMH-22i, equipada com uma pistola de soldagem SOYER/PH-4L, para a soldagem dos pinos com ponta de esfera de alumínio e com ponta cônica, e uma pistola SOYER/PH-3N SRM, para os pinos com ponta fina.

Para melhor entendimento e caracterização do processo, foram conduzidas aquisições de sinais elétricos de tensão e corrente, além do deslocamento do pino, que foram medidos e registrados através de um Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade – 3SR. Os principais parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na Tabela 14.

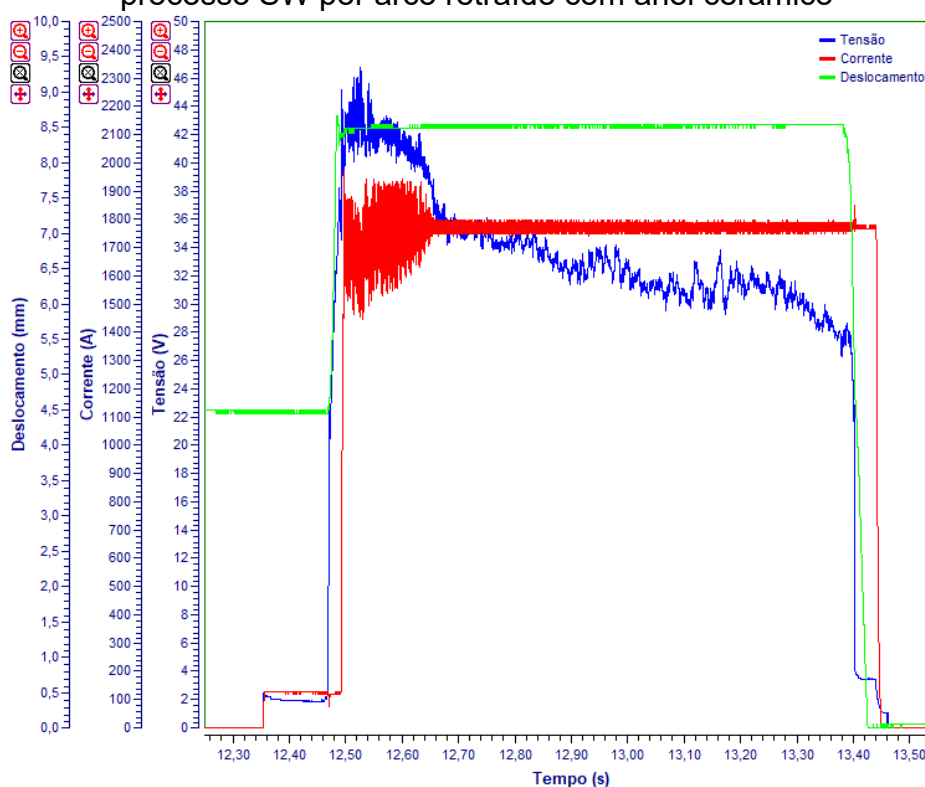
Tabela 14 – Principais parâmetros de soldagem utilizados na caracterização de diferentes variações do processo SW por arco retraído

Parâmetro de Soldagem	Esfera de Alumínio			Cônica 10 mm	Fina		
	10 mm	16 mm	20 mm		10 mm	12 mm	16 mm
Corrente de soldagem (A)	700	1.300	1.700	800	800	800	1.100
Tempo de soldagem (ms)	350	650	850	350	100	180	400
Protrusão (mm)	2,8	3,4	3,6	4,0	1,2	1,2	1,2
Recuo (mm)	2,0	3,0	3,7	1,3	2,0	2,0	2,5
Proteção da poça	Anel cerâmico	Anel cerâmico	Anel cerâmico	85%Ar + 15%CO ₂	85%Ar + 15%CO ₂	85%Ar + 15%CO ₂	85%Ar + 15%CO ₂
Vazão (l/min)	-	-	-	10	10	10	10
Tempo de Pré-gás (s)	-	-	-	1	1	1	1
Tempo de pré-corrente (ms)	40	40	40	40	40	40	40
Corrente SRM (A)	-	-	-	-	0,25	0,25	0,20

Fonte: elaborado pelo autor

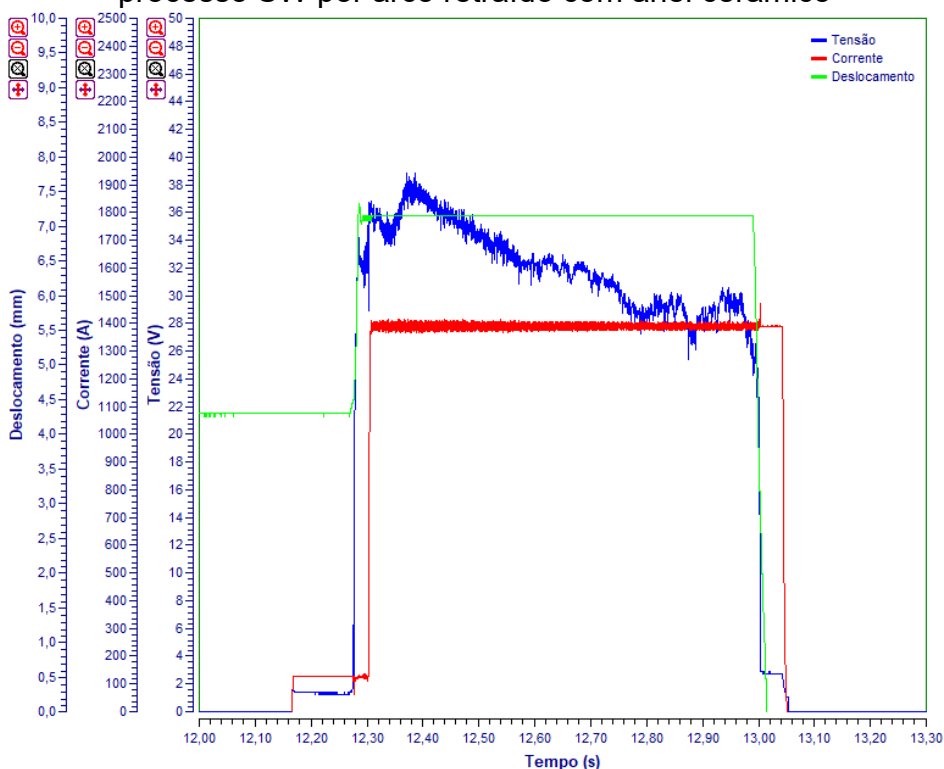
As Figuras 47, 48 e 49 apresentam, respectivamente, o oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino da soldagem de pinos roscados com ponta de esfera de alumínio e os seguintes valores de diâmetros: 20 mm, 16 mm e 10mm. De modo a efetuar uma melhor comparação, as escalas dos gráficos foram mantidas constantes.

Figura 47 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 20 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio usando o processo SW por arco retraído com anel cerâmico



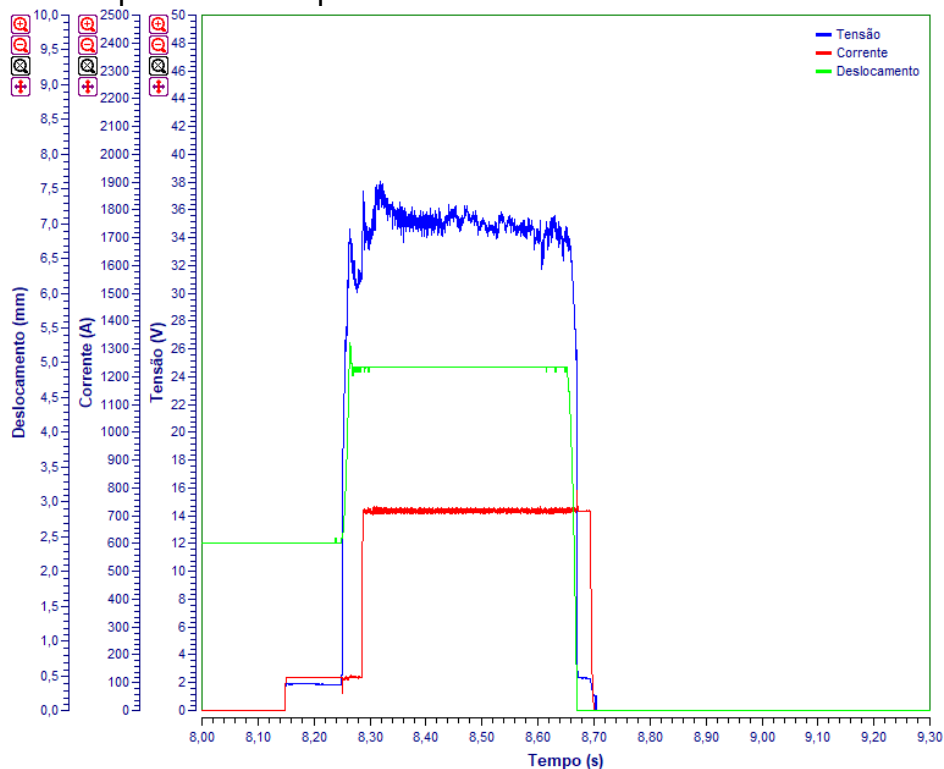
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 48 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio usando o processo SW por arco retraído com anel cerâmico



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 49 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 10 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio usando o processo SW por arco retraído com anel cerâmico



Fonte: elaborado pelo autor

Através dos oscilogramas apresentados da soldagem de pinos roscados com ponta de esfera de alumínio, é possível observar que para o pino de maior diâmetro (20 mm), a fonte demorou cerca de 150 ms para estabilizar o valor da corrente de soldagem, o que não ocorreu para os pinos de menor diâmetro (16 mm e 10 mm). Uma hipótese para esta instabilidade da corrente no início do arco principal é que para a soldagem do pino de maior diâmetro, a fonte opera próximo do seu valor limite, que é de 2.000 A.

Outro aspecto observado é o decaimento do valor da tensão, mais proeminente para os pinos de maior diâmetro (20 mm e 16 mm). Uma hipótese para essa questão é de que assim como a corrente de soldagem, o tempo de soldagem e o recuo do pino são maiores para os pinos de maior diâmetro, sendo que todos esses parâmetros contribuem para uma energia de soldagem maior, acarretando um maior volume de metal fundido do pino, tendendo com que esse metal fundido escorra para a ponta do pino, e desta forma, fazendo com que ocorra uma redução no comprimento do arco, e conseqüentemente, na redução do valor da tensão. Como o pino de 10 mm de diâmetro possui um menor volume de metal fundido, aliado também ao menor tempo de soldagem, esse comportamento de redução da tensão é minimizado, sendo pouco perceptível.

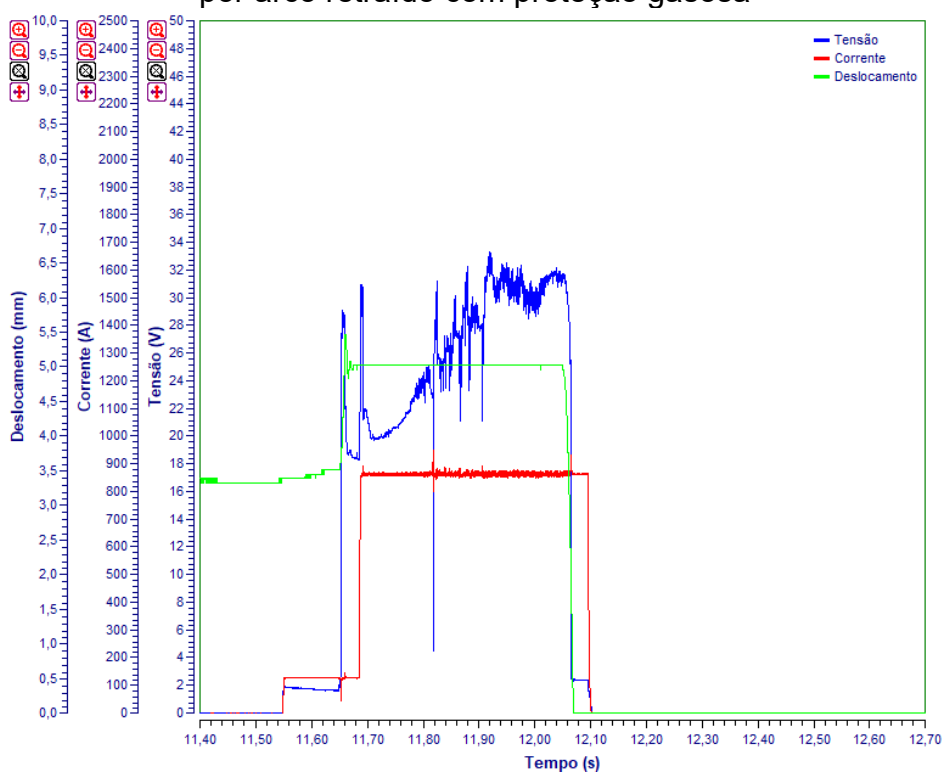
A Figura 50 apresenta o oscilograma da soldagem de pinos roscados de 10 mm de diâmetro com ponta cônica. Foi mantida a mesma escala utilizada nos oscilogramas da soldagem dos pinos com ponta de esfera de alumínio.

No oscilograma da soldagem do pino cônico, é possível observar duas situações. A primeira é a ocorrência de uma redução brusca da tensão na primeira metade do arco principal, indicando a ocorrência de um curto-circuito. A outra situação é que a tensão aumenta no decorrer do arco principal, diferentemente do ocorrido no pino de mesmo diâmetro com ponta de esfera de alumínio.

Uma hipótese para esse comportamento é de que na soldagem do pino com ponta cônica foi utilizado como gás de proteção uma mistura 85% Argônio + 15% CO₂, diferentemente da soldagem do pino com ponta de esfera de alumínio, em que não foi utilizado gás de proteção, sendo ionizado o próprio ar atmosférico. A diferença nas características dos gases, tais como potencial de ionização e condutividade térmica, afetam a estabilidade do arco bem como a taxa de fusão, podendo acarretar uma fusão uniforme ou não. Assim sendo, a seleção entre um gás de proteção, ou sua ausência (neste caso, o próprio ar atmosférico será ionizado), afeta diretamente na

tensão do arco, e conseqüentemente, na potência do arco e na energia de soldagem. Uma hipótese para o incremento da tensão ao longo do arco principal pode ser explicada pelo aumento da resistência do arco, devido às características dos gases e ao aumento da temperatura da poça de fusão.

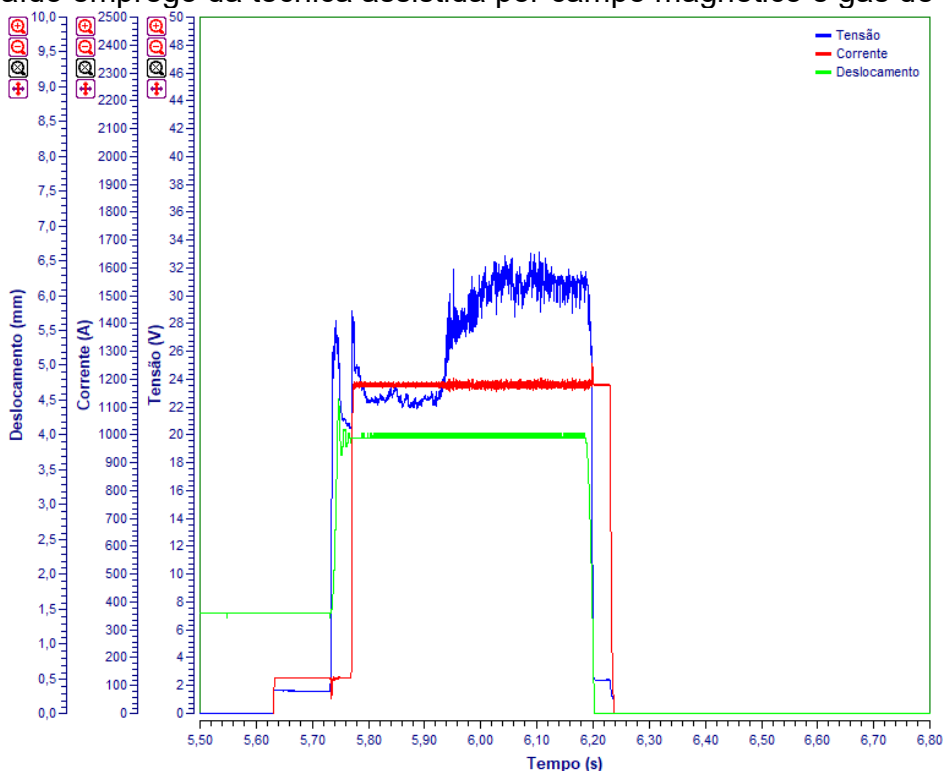
Figura 50 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 10 mm de diâmetro e ponta cônica usando o processo SW por arco retraído com proteção gasosa



Fonte: elaborado pelo autor

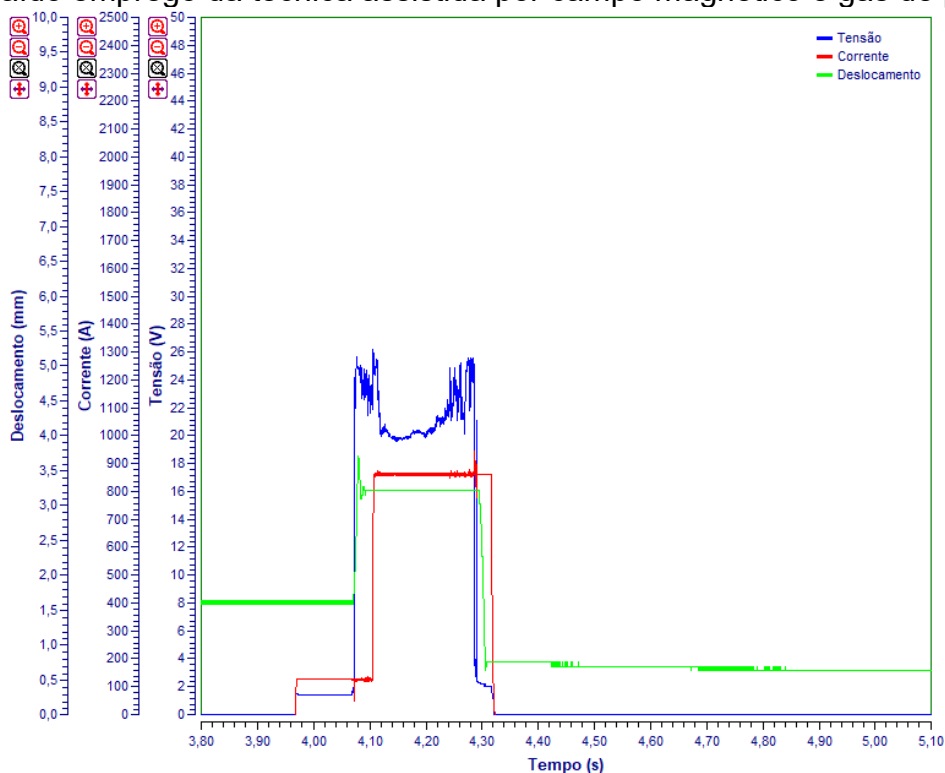
As Figuras 51, 52 e 53 apresentam, respectivamente, o oscilograma da soldagem, com emprego da técnica assistida por campo magnético, de pinos roscados com ponta fina e os seguintes valores de diâmetros: 16 mm, 12 mm e 10mm. Foi utilizada a mesma escala nos oscilogramas apresentados na soldagem de pinos com ponta de esfera de alumínio e com ponta cônica.

Figura 51 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 16 mm de diâmetro e ponta fina usando o processo SW por arco retraído empregado da técnica assistida por campo magnético e gás de proteção



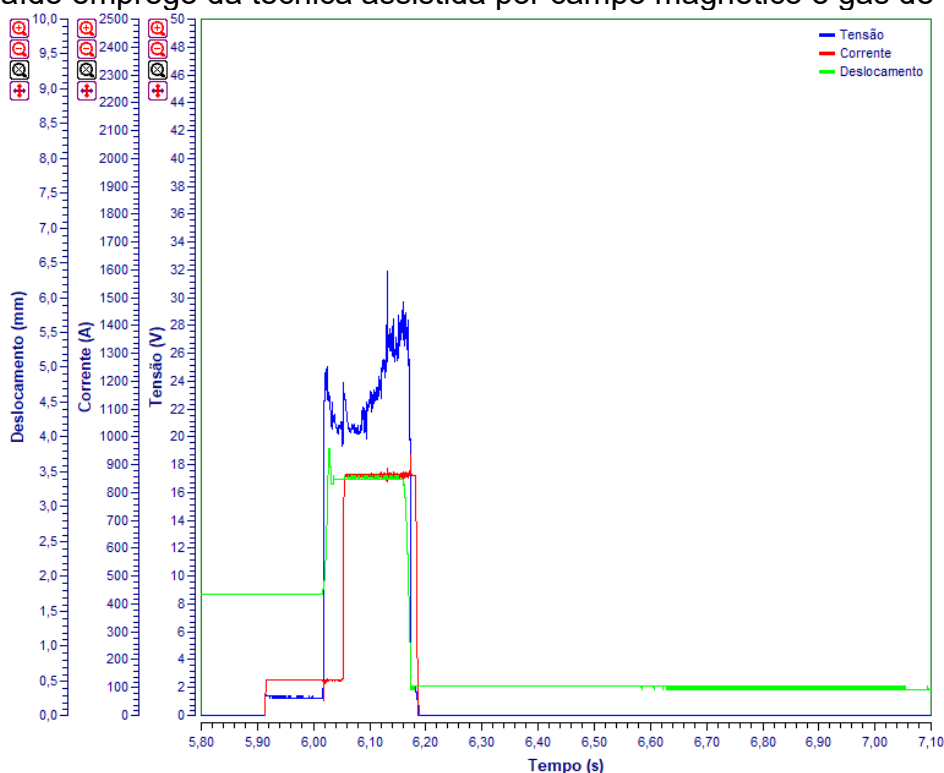
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 52 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 12 mm de diâmetro e ponta fina usando o processo SW por arco retraído empregado da técnica assistida por campo magnético e gás de proteção



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 53 – Oscilograma de corrente, tensão e deslocamento do pino para a soldagem de um pino de 10 mm de diâmetro e ponta fina usando o processo SW por arco retraído empregado da técnica assistida por campo magnético e gás de proteção



Fonte: elaborado pelo autor

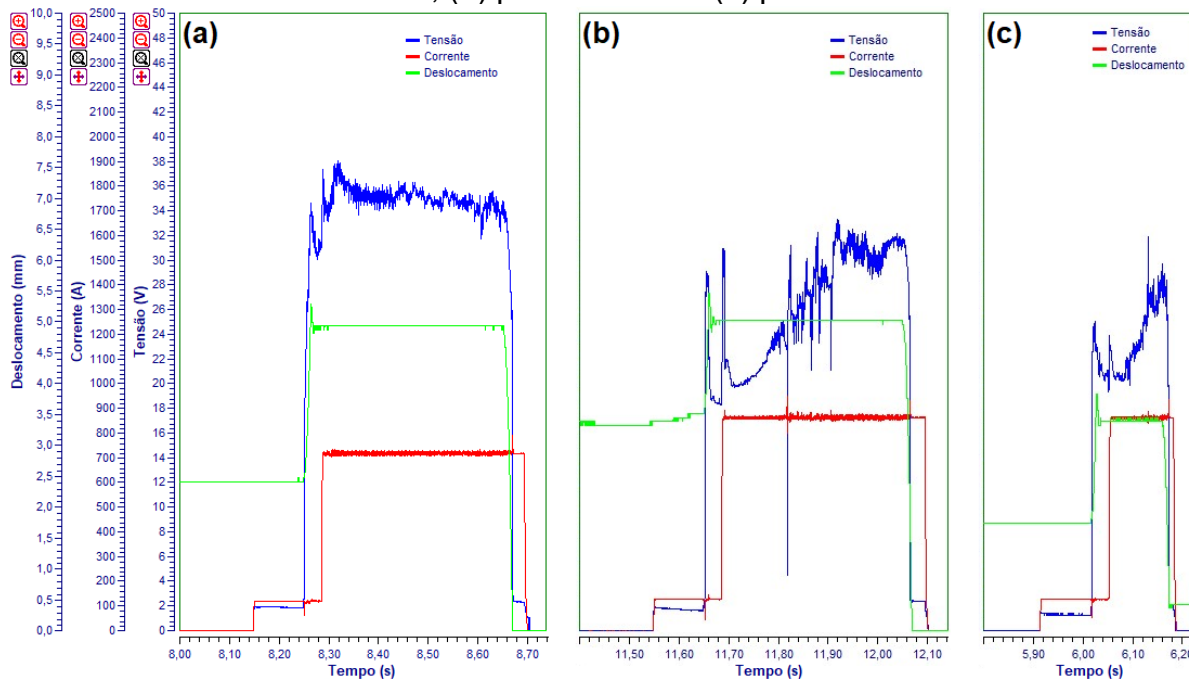
É possível observar, através dos oscilogramas da soldagem de pinos com ponta fina, que a tensão aumenta no decorrer do arco principal. Diferentemente do observado nos oscilogramas dos pinos de diâmetro maiores com ponta de esfera de alumínio, em que ocorre o inverso, nos pinos com ponta fina, independentemente do diâmetro, a tensão incrementa ao longo do arco principal. Uma hipótese para esse comportamento de aumento da tensão é de que o emprego da técnica assistida por campo magnético, promove, através das forças eletromagnéticas, a rotação do arco elétrico ao longo da superfície do pino, do centro para a borda, ocasionando uma fusão uniforme e completa da superfície do pino. Essa rotação do arco evita que ocorra o escorrimento do metal fundido do pino, aumentando assim o comprimento do arco, e consequentemente, a tensão do arco.

Outra hipótese para esse incremento do valor da tensão é que, assim como no pino de ponta cônica, para a soldagem dos pinos com ponta fina foi utilizado uma mistura 85% Argônio + 15% CO₂ como gás de proteção.

Para facilitar a visualização das comparações supracitadas, os oscilogramas da soldagem dos pinos de 10 mm de diâmetro com as três diferentes pontas de ignição

foram posicionados lado a lado e na mesma escala e estão apresentados na Figura 54.

Figura 54 – 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

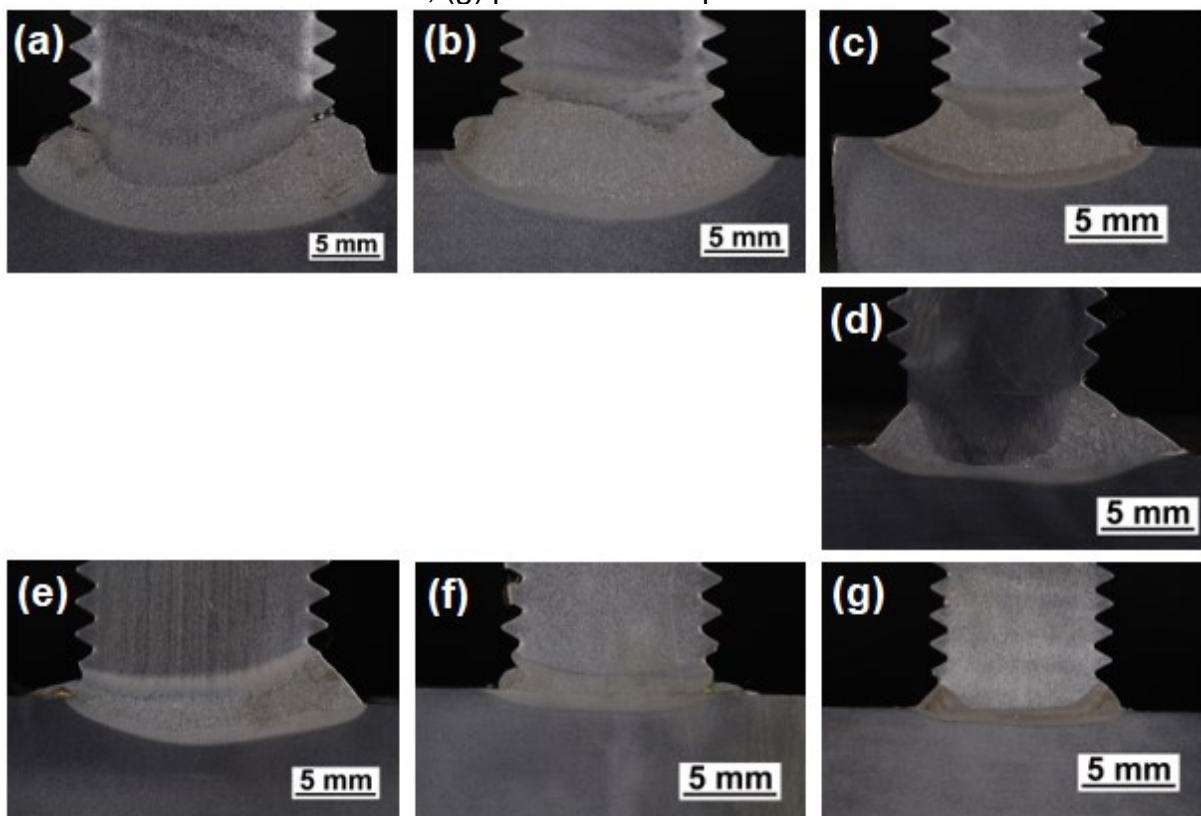


Fonte: elaborado pelo autor

Para cada variação de ponta de ignição e diâmetro de pino elencada na Tabela 14 foi realizada uma macrografia da solda com uma câmera Canon/60D equipada com a lente Macro Canon EF 180 mm L USM. É possível observar através das macrografias que os pinos com ponta de esfera de alumínio (Figuras 55a, 55b e 55c), que foram soldados sem proteção gasosa e com anel cerâmico, possuem uma zona fundida uniforme, robusta e de espessura considerável. Por outro lado, as macrografias da soldagem dos pinos com ponta fina (Figuras 55e, 55f e 55g), que foram soldados com proteção gasosa e com emprego da técnica assistida por campo magnético, possuem uma zona fundida uniforme e fina. Tal diferença ocorre por conta da menor energia de soldagem imposta pelo processo que utiliza o emprego da técnica assistida por campo magnético, acarretando numa fusão menor de material, principalmente pelo fato de o tempo de soldagem ser bem inferior com o emprego dessa técnica. Apesar da fusão do material ser menor, a técnica assistida por campo magnético permite uma fusão completa e uniforme em toda a face do pino. Já a macrografia da soldagem do pino com ponta cônica (Figura 55d), que foi soldado com

proteção gasosa, apresenta uma zona fundida maior nas extremidades do pino, tendo uma camada bem menor no centro do pino.

Figura 55 – Macrografia dos pinos soldados com diferentes variações do processo SW por arco retraído: (a) pino M20 com ponta de esfera de alumínio, (b) pino M16 com ponta de esfera de alumínio, (c) pino M10 com ponta de esfera de alumínio, (d) pino M12 com ponta cônica, (e) pino M16 com ponta fina, (f) pino M12 com ponta fina, (g) pino M10 com ponta fina



Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE B – INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM PROTRUSÃO E RECUO NA SOLDAGEM COM O PROCESSO SW POR ARCO RETRAÍDO

De modo a verificar na prática a influência dos parâmetros de soldagem protrusão e recuo na soldagem de pinos com o processo SW por arco retraído, foram conduzidos experimentos utilizando pinos com cabeça de 22 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio, que foram soldados em chapas de aço ASTM A36 de 7,9 mm de espessura, na posição plana de soldagem. A fonte de soldagem empregada nos testes foi uma SOYER/BMH-22i, equipada com uma pistola de soldagem SOYER/PH-4L. Macrografias dos colares de solda dos pinos soldados foram realizadas, com a utilização de uma câmera Canon/60D com a lente Macro Canon EF 180 mm L USM.

Os parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos são os recomendados pelo fabricante para pinos com as características supracitadas. Adicionalmente, o parâmetro de soldagem em estudo (protrusão ou recuo) foi alterado para verificar a sua influência na solda. A Tabela 15 apresenta a matriz de ensaios com os principais parâmetros de soldagem utilizados.

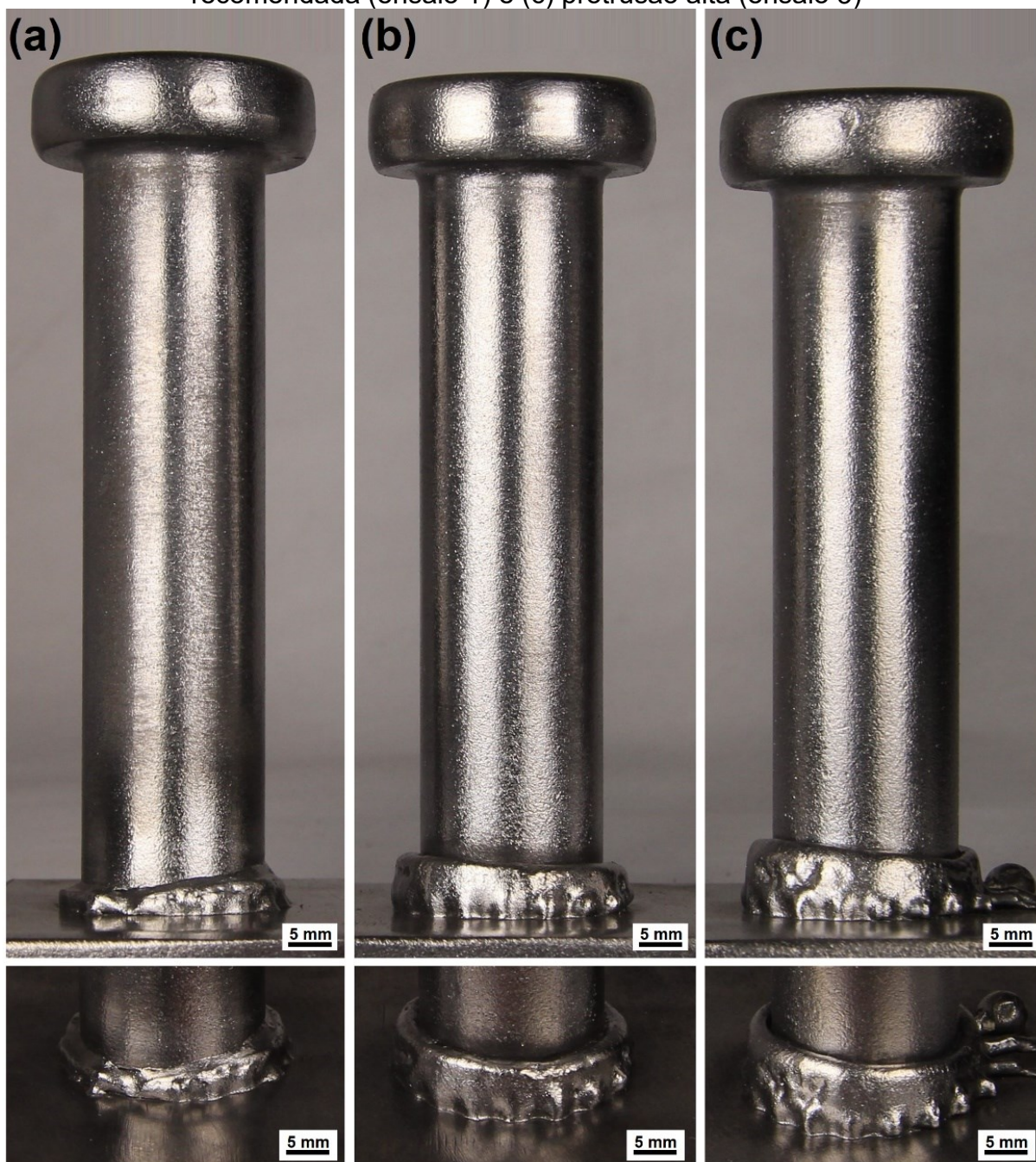
Tabela 15 – Matriz de ensaios com os parâmetros de soldagem utilizados

Parâmetro de Soldagem	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
Corrente (A)	1960	1960	1960	1960	1960
Tempo de arco (ms)	950	950	950	950	950
Recuo (mm)	4,0	4,0	4,0	0,5	7,5
Protrusão (mm)	4,0	0,5	7,5	4,0	4,0

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 56 ilustra a influência da variação do parâmetro protrusão na soldagem de pinos utilizando o processo SW por arco retraído, com o pino sendo soldado com os parâmetros elencados na Tabela 15: ensaio 2 com uma protrusão baixa (Figura 56a), ensaio 1 com uma protrusão recomendada (Figura 56b) e ensaio 3 com uma protrusão alta (Figura 56c). As imagens superiores são de uma vista frontal do pino soldado, enquanto as imagens inferiores são de um ângulo inclinado, mostrando em maior detalhe o colar.

Figura 56 – Influência da variação do parâmetro protrusão na soldagem de pinos com o processo SW por arco retraído: (a) protrusão baixa (ensaio 2), (b) protrusão recomendada (ensaio 1) e (c) protrusão alta (ensaio 3)



Fonte: elaborado pelo autor

É possível observar, através do colar da solda, exatamente o esperado conforme já apresentado no item 2.5. Na soldagem do pino com uma protrusão recomendada (Figura 56b), a penetração do pino, ao retornar ao ponto inicial ajustado, permite que a parte do metal fundido destinado à formação do colar seja a quantidade adequada para preencher o volume do anel cerâmico. Já a soldagem do pino com

uma protrusão muito baixa promove pouca penetração do pino na chapa base. Além disso, resulta em um colar com dimensões reduzidas e com falta de fusão (Figura 56a). Por outro lado, a soldagem do pino com uma protrusão demasiada promove uma penetração maior do pino na chapa base, e conseqüentemente, uma quantidade maior do que o necessário de metal fundido é fornecido para formação do colar, acarretando um colar excessivo, fazendo com que esse excesso escorra para fora da região limitada pelo anel cerâmico (Figura 56c).

Outra característica verificável qualitativamente pela Figura 56 é a relação entre o parâmetro protrusão e a penetração do pino na chapa base, evidenciada é pelo comprimento final do pino após a soldagem. Quando comparado com o pino com a protrusão recomendada (Figura 56b), o pino com uma protrusão baixa (Figura 56a) resulta numa penetração menor na chapa base e, conseqüentemente, em um comprimento maior do pino após a soldagem, enquanto um pino com uma protrusão alta (Figura 56c) penetra mais na chapa base, acarretando em um comprimento menor do pino após a soldagem.

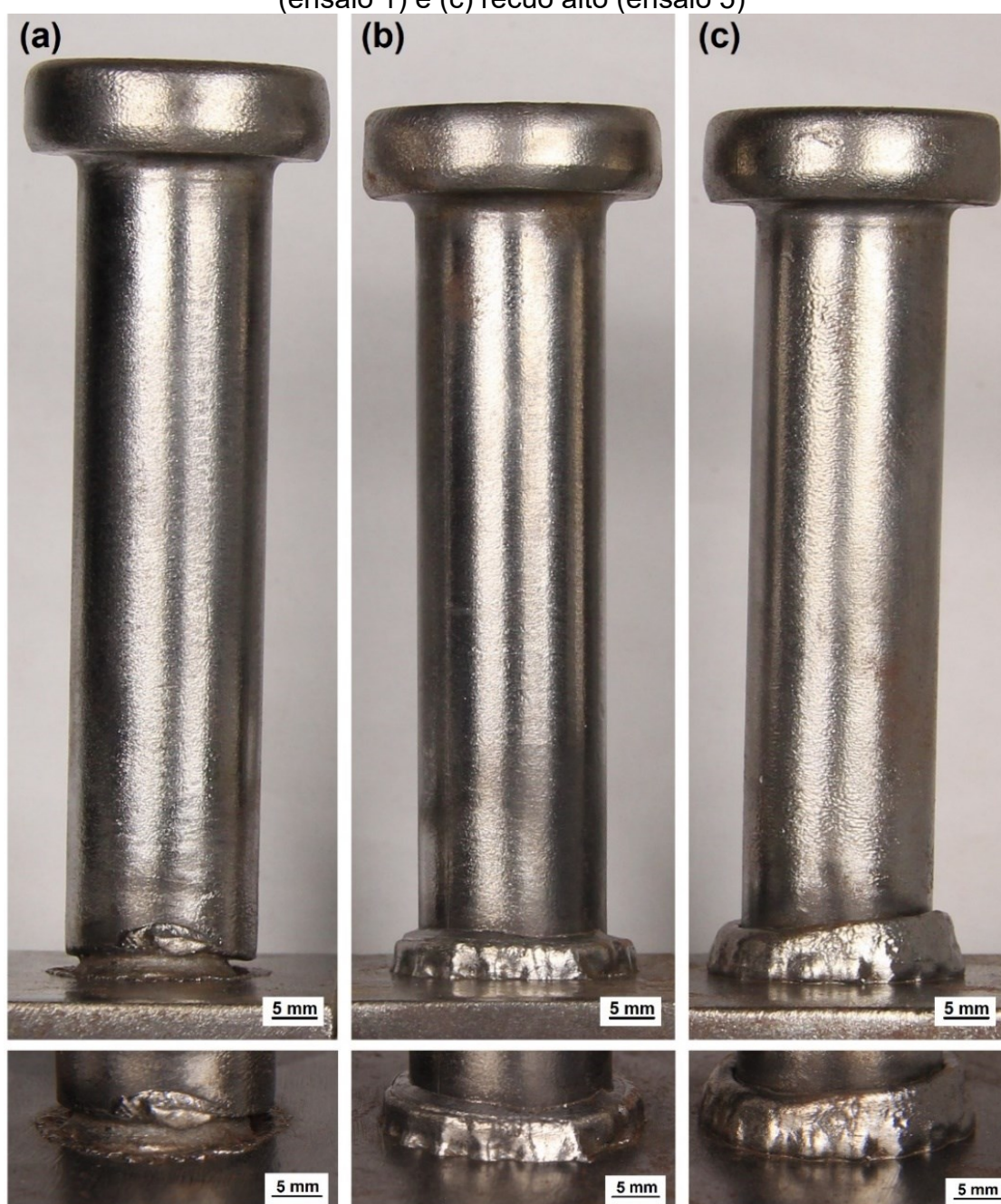
Já a Figura 57 ilustra a influência da variação do parâmetro recuo na soldagem de pinos utilizando o processo SW por arco retraído, com o pino sendo soldado com os parâmetros elencados na Tabela 15: ensaio 4 com um recuo baixo (Figura 57a), ensaio 1 com um recuo recomendado (Figura 57b) e ensaio 5 com um recuo alto (Figura 57c). Assim como apresentado na ilustração da variação do parâmetro protrusão, as imagens superiores são de uma vista frontal do pino soldado, enquanto as imagens inferiores são de um ângulo inclinado, mostrando em maior detalhe o colar de solda.

A soldagem do pino com um recuo muito baixo promove um arco com comprimento curto, acarretando um valor de tensão baixo, e conseqüentemente, a energia de soldagem será baixa e insuficiente para a soldagem do pino. Como o comprimento do arco é curto, a fusão se concentrará no centro do pino. Outra característica de um recuo muito baixo é a grande ocorrência de curtos-circuitos, sendo este outro motivo da redução da energia introduzida pelo processo, acarretando uma fusão insuficiente, com defeitos ou descontinuidades, e um colar incompleto, como é possível observar através da macrografia (Figura 57a).

Já a soldagem do pino com um recuo excessivo ocorre o oposto, com um comprimento do arco maior e, conseqüentemente, uma tensão do arco maior, aumentando, desta forma, a energia introduzida pelo processo. Essa energia

excessiva promove uma fusão demasiada, acarretando um colar exagerado, que normalmente ultrapassa os limites impostos pelo anel cerâmico, como é possível observar através da macrografia (Figura 57c). Além disso, tendo em vista que um recuo demasiado promove um comprimento de arco excessivo, aumentando assim o risco de ocorrência de sopro magnético, pode resultar em um colar incompleto, através da fusão do material concentrar apenas em um lado do pino.

Figura 57 – Influência da variação do parâmetro recuo na soldagem de pinos com o processo SW por arco retraído: (a) recuo baixo (ensaio 4), (b) recuo recomendado (ensaio 1) e (c) recuo alto (ensaio 5)



Fonte: elaborado pelo autor

Um outro fator interessante que pode ser observado, qualitativamente, através da Figura 57 é sobre a penetração do pino na chapa base, por meio do comprimento do pino após a soldagem. Como o parâmetro de recuo baixo (Figura 57a) promoveu uma energia baixa, resultando em pouco material fundido, a mola não retornou ao seu deslocamento inicial, não permitindo que o pino penetrasse satisfatoriamente na chapa base. Por outro lado, os parâmetros de recuo recomendado (Figura 57b) e recuo alto (Figura 57c) permitiram uma fusão de material suficiente para a mola retornar a sua posição inicial. Nesse aspecto, é possível observar, após a soldagem, que os pinos soldados com o recuo recomendado e com recuo alto possuem o mesmo comprimento, enquanto o pino soldado com o recuo baixo possui um comprimento maior.

APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO SW POR DESCARGA CAPACITIVA

De modo a obter a caracterização da soldagem de pinos por descarga capacitiva, foram realizados experimentos com pinos roscados de 6 mm de diâmetro (M6), que foram soldados em chapas de aço ASTM A36 de 2,65mm de espessura, na posição plana de soldagem. A fonte de soldagem utilizada em todos os testes foi uma SOYER/BMS-10N, equipada com uma pistola de soldagem SOYER/PS-3 para os experimentos da subvariação com *gap* inicial, e uma pistola de soldagem SOYER/PS-3K para os experimentos da subvariação com contato inicial.

Para os experimentos deste estudo, foram utilizadas as tensões de carga de 120 V e 140 V, tensões estas próximas ao mínimo e ao máximo da faixa de tensões sugeridas pelo próprio fabricante para soldagem de pinos com 6 mm de diâmetro. A Tabela 16 apresenta a matriz de ensaios com os principais parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 16 – Matriz de ensaios com os parâmetros de soldagem utilizados

Ensaio	Modalidade DC	Tensão de Carga (V)	Pressão da mola	Recuo	Protrusão do Pino (mm)
1	com contato inicial	140	baixa	-	1,5
2	com contato inicial	140	média	-	1,5
3	com contato inicial	140	alta	-	1,5
4	com contato inicial	120	baixa	-	1,5
5	com contato inicial	120	média	-	1,5
6	com contato inicial	120	alta	-	1,5
7	com <i>gap</i> inicial	140	-	máximo	1,5
8	com <i>gap</i> inicial	140	-	médio	1,5
9	com <i>gap</i> inicial	140	-	mínimo	1,5
10	com <i>gap</i> inicial	120	-	máximo	1,5
11	com <i>gap</i> inicial	120	-	médio	1,5
12	com <i>gap</i> inicial	120	-	mínimo	1,5

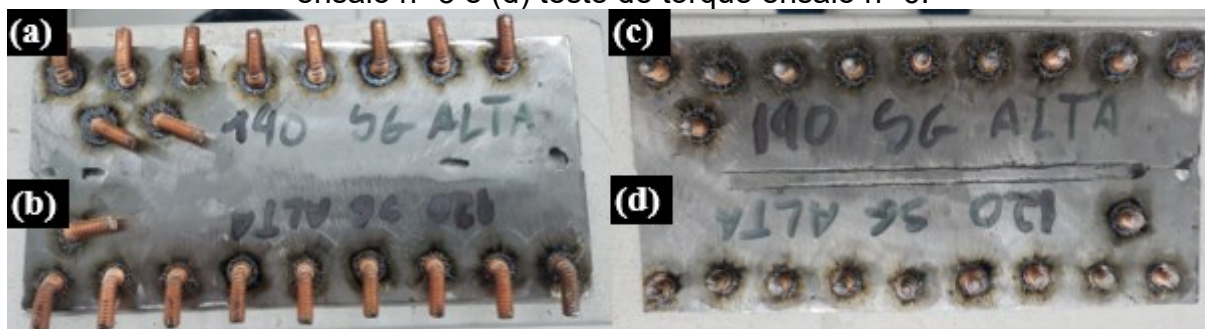
Fonte: elaborado pelo autor

Adicionalmente, foram soldados 20 pinos para cada parâmetro de ensaio, que foram submetidos a testes para qualificação do procedimento de soldagem. Apesar da norma AWS D1.1/D1.1M:2020 (2020) prever a realização de apenas 10 testes de dobramento, torque ou tração para a qualificação do procedimento de soldagem, nesse experimento foram realizados 10 testes de dobramento e mais 10 testes de torque para cada ensaio listado na Tabela 16. O teste de dobramento foi conduzido

utilizando um dispositivo manual de alavanca para submeter os pinos à força de dobramento, enquanto o teste de torque foi utilizado um torquímetro de estalo RAVEN/100200.

A norma preconiza que os testes sejam realizados até a falha/ruptura do pino, sendo o procedimento considerado aprovado e qualificado desde que esta falha/ruptura não ocorra na região da solda. A Figura 58 apresenta um exemplo do resultado dos testes de dobramento (Figuras 58a e 58b) e de torque (Figuras 58c e 58d). O resultado dos testes de dobramento e de torque de todos os ensaios estão apresentados na Tabela 17.

Figura 58 - Resultado dos ensaios para qualificação de procedimento: (a) teste de dobramento ensaio nº 3, (b) teste de dobramento ensaio nº 6, (c) teste de torque ensaio nº 3 e (d) teste de torque ensaio nº 6.



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 17 - Resultados dos testes de qualificação dos procedimentos de soldagem

Ensaio	Teste de Dobramento			Teste de Torque			Resultado Final
	Pinos Aprov.	Pinos Reprov.	Resultado	Pinos Aprov.	Pinos Reprov.	Resultado	
1	10	0	Aprovado	10	0	Aprovado	Aprovado
2	10	0	Aprovado	10	0	Aprovado	Aprovado
3	10	0	Aprovado	10	0	Aprovado	Aprovado
4	10	0	Aprovado	10	0	Aprovado	Aprovado
5	10	0	Aprovado	10	0	Aprovado	Aprovado
6	10	0	Aprovado	10	0	Aprovado	Aprovado
7	10	0	Aprovado	10	0	Aprovado	Aprovado
8	9	1	Reprovado	7	3	Reprovado	Reprovado
9	5	5	Reprovado	8	2	Reprovado	Reprovado
10	9	1	Reprovado	10	0	Aprovado	Reprovado
11	9	1	Reprovado	10	0	Aprovado	Reprovado
12	5	5	Reprovado	7	3	Reprovado	Reprovado

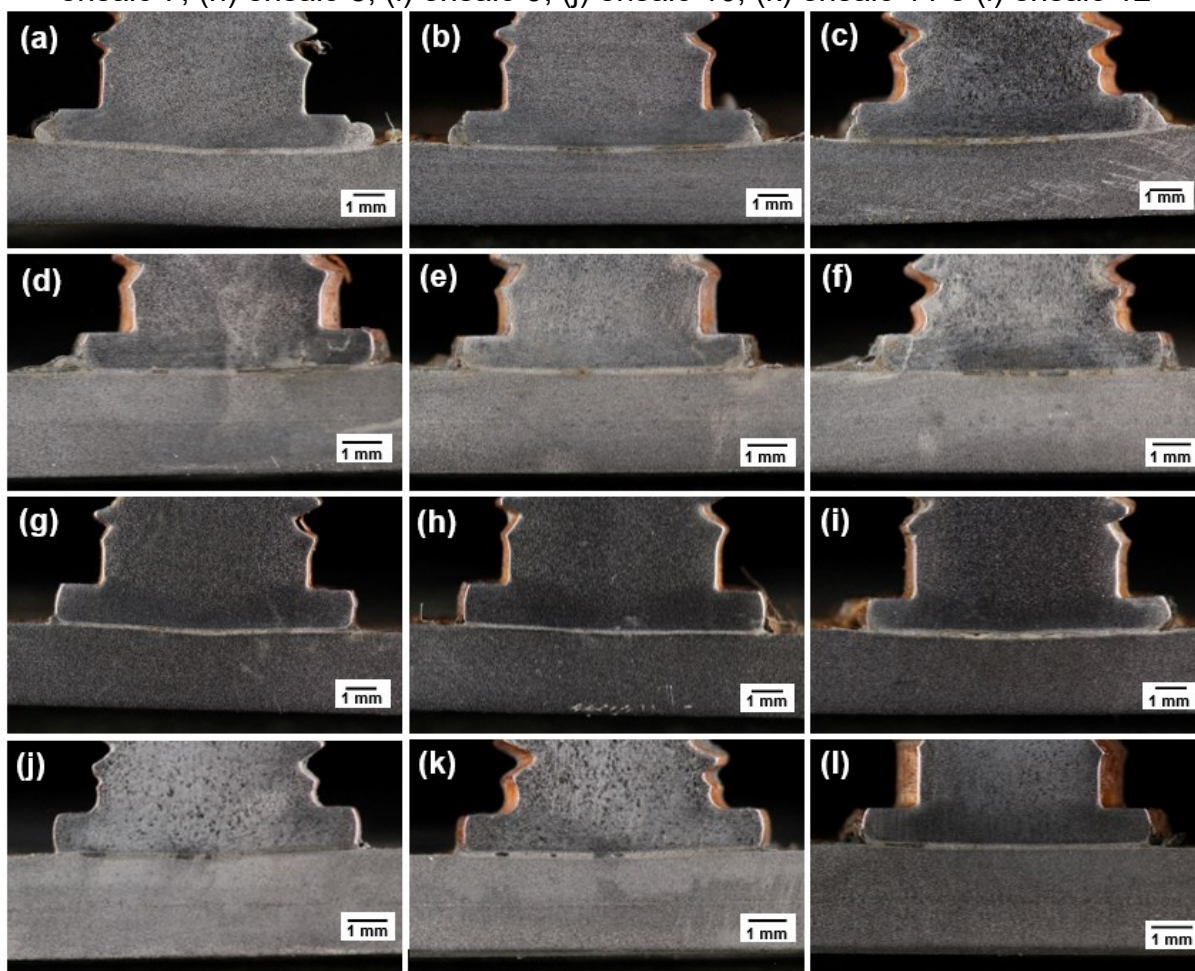
Fonte: elaborado pelo autor

Com relação aos testes mecânicos, é possível observar que os procedimentos de soldagem que utilizaram o processo DC com contato inicial (ensaios 1 a 6) foram satisfatórios e considerados aprovados, independentemente da tensão de carga (120

ou 140 V) e da pressão da mola (baixa, média ou alta). Já para o processo DC com *gap* inicial, apenas o ensaio 7 passou na qualificação, correspondente ao procedimento de tensão de carga de 140 V e recuo máximo. Ainda para o processo DC com *gap* inicial, os ensaios 10 (tensão de carga de 120 V e recuo máximo) e 11 (tensão de carga de 120 V e recuo médio) não foram qualificados pois apenas um pino não passou no teste de dobramento.

Após a realização dos testes de qualificação para os diferentes ensaios de procedimentos de soldagem, foi selecionado um pino de cada ensaio para a realização de macrografia da solda. A Figura 59 apresenta a macrografia de cada ensaio, realizada com uma câmera Canon/60D equipada com a lente Macro Canon EF 180 mm L USM.

Figura 59 – Macrografia do pino M6 soldado com os parâmetros de cada ensaio: (a) ensaio 1, (b) ensaio 2, (c) ensaio 3, (d) ensaio 4, (e) ensaio 5, (f) ensaio 6, (g) ensaio 7, (h) ensaio 8, (i) ensaio 9, (j) ensaio 10, (k) ensaio 11 e (l) ensaio 12

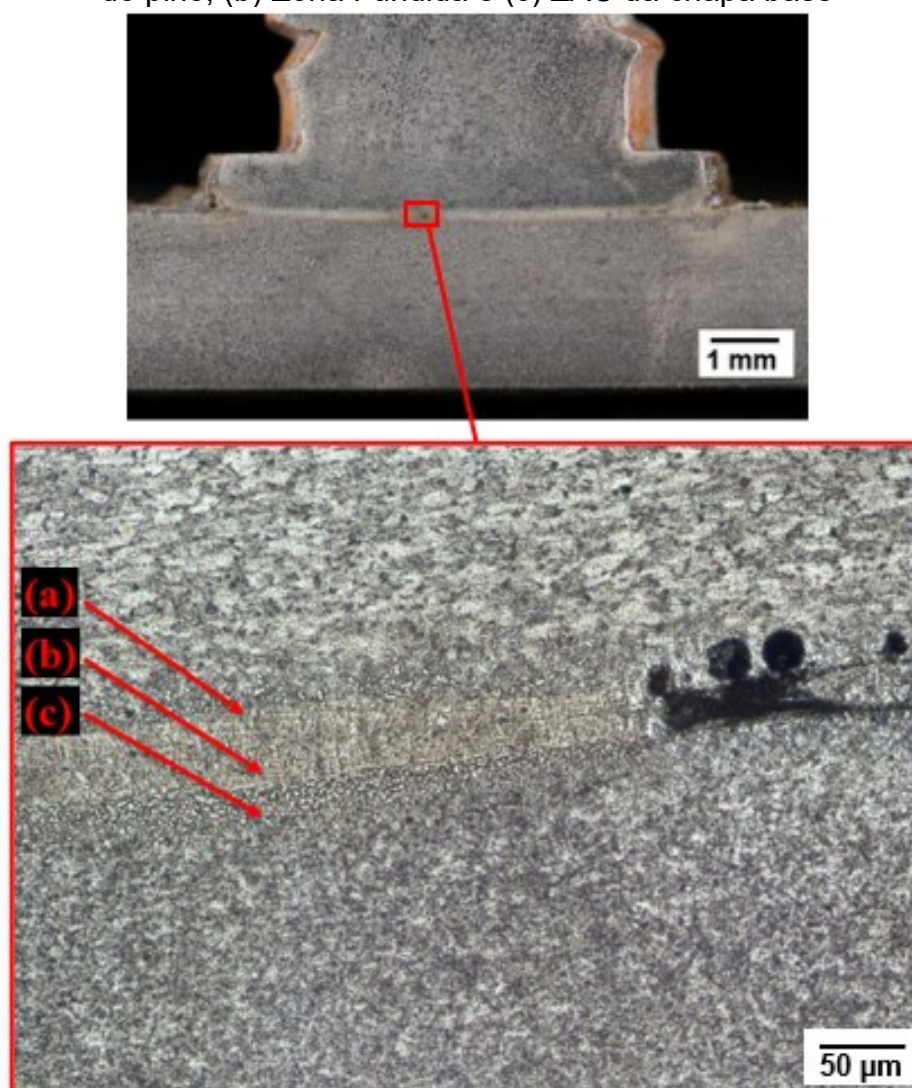


Fonte: elaborado pelo autor

É possível observar, através das macrografias, que a espessura do cordão de solda é muito pequena, principalmente se for comparada com a modalidade por arco retraído. Tal baixa espessura se justifica pelo baixo tempo de soldagem, em que o arco fica aberto por menos de 3 ms. Além disso, é possível perceber algumas descontinuidades nas zonas fundidas.

Adicionalmente, foi selecionada uma amostra de um dos pinos soldados com o processo DC com contato inicial, tendo em vista que foram os que obtiveram os melhores resultados nos testes de qualificação, para realização de micrografia, por meio do microscópio óptico CARL ZEISS/Axiolab 5. A Figura 60 mostra a micrografia realizada no pino soldado com os parâmetros do ensaio 5 (processo DC com contato, tensão de carga de 120 V e pressão da mola média).

Figura 60 – Micrografia de um pino soldado com os parâmetros do ensaio 5:(a) ZAC do pino, (b) Zona Fundida e (c) ZAC da chapa base



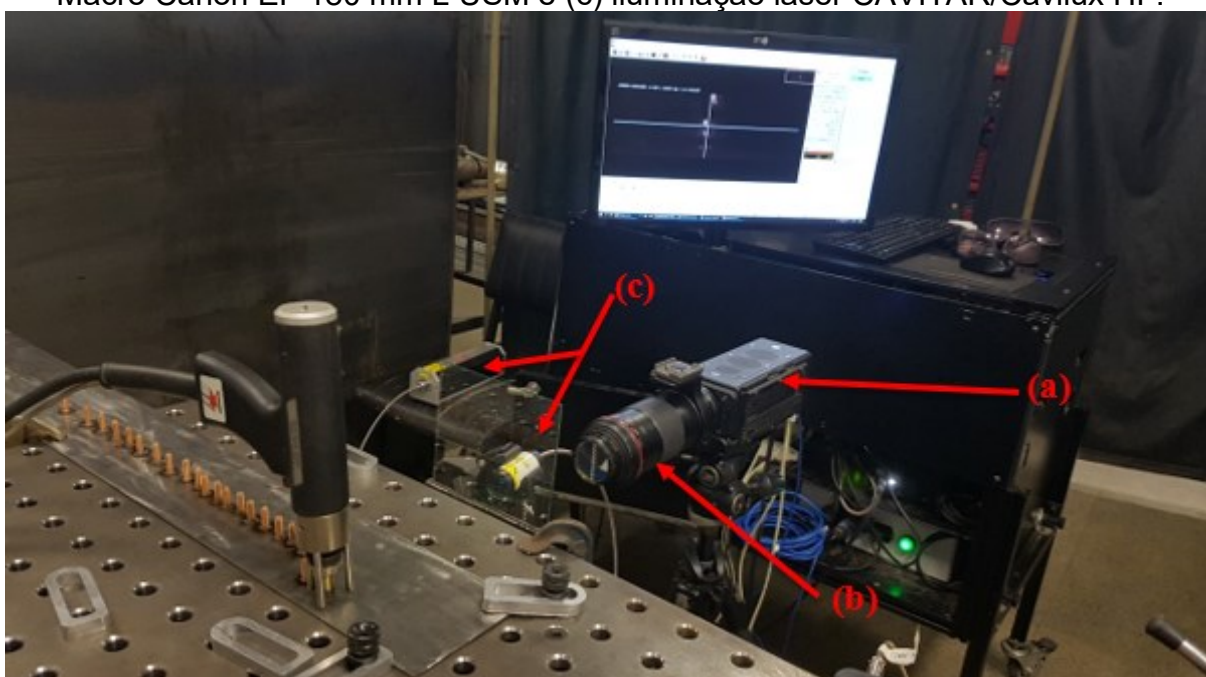
Fonte: elaborado pelo autor

Como mencionado anteriormente na análise das macrografias (Figura 59), é possível verificar algumas regiões com descontinuidades na solda. Através da micrografia apresentada na Figura 60, essa descontinuidade é mais visível, sendo ela no formato de esferas, e por isso, uma hipótese é de que podem ter ocorrido devido à formação de bolhas de gás aprisionado que não teve tempo suficiente para escapar da zona fundida, uma vez que o tempo de soldagem é bastante curto, ocorrendo em questão de menos de 3 ms.

Outra característica que é possível observar através da imagem da micrografia é a delimitação das regiões da soldagem: zona fundida, ZAC do pino e ZAC da chapa base. A zona fundida é muito pequena, da ordem de 50 μm , e que a ZAC, tanto do pino quanto da chapa base, possui um valor menor ainda, o que se justifica pelo tempo de arco aberto ser muito pequeno no processo DC.

Por último, foi realizada a filmagem de alta velocidade para ambos os processos DC, com *gap* inicial e com contato inicial, para melhor entendimento e caracterização das subvariações do processo DC, além de possíveis análises de diferenças entre eles. Para a obtenção das filmagens de alta velocidade, foi utilizada uma câmera IDT/Y4S2 com uma lente Macro Canon EF 180 mm L USM e com iluminação laser CAVITAR/Cavilux HF, conforme *set-up* apresentado na Figura 61.

Figura 61 – *Set-up* da filmagem de alta velocidade: (a) Câmera IDT/Y4S2, (b) Lente Macro Canon EF 180 mm L USM e (c) iluminação laser CAVITAR/Cavilux HF.



Fonte: elaborado pelo autor

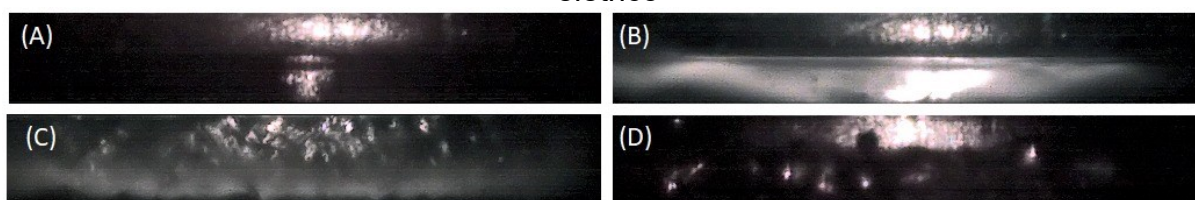
Cabe destacar que o princípio de funcionamento básico de uma câmera de alta velocidade envolve a captura de imagens em uma taxa de quadros extremamente alta. Ao contrário das câmeras convencionais, que normalmente gravam em 24 a 60 quadros por segundo (fps), as câmeras de alta velocidade podem capturar até milhares de quadros por segundo.

Para o processo DC com contato inicial, a câmera foi regulada a uma taxa de aquisição de 41.666 quadros por segundos, de modo a assegurar que todos os eventos fossem capturados. Foi também necessário ampliar a região de foco da câmera, deixando o foco mais próximo da região do arco, tendo em vista que o pino não apresenta movimento de recuo. Sem esse ajuste do foco, não seria possível ver com clareza a movimentação do pino.

Já para o processo DC com *gap* inicial, ao contrário, a região de interesse é maior devido a movimentação de elevação do pino. Com isso, foi necessário afastar ligeiramente o foco, e conseqüentemente, por motivo de limitação da câmera, a taxa de aquisição teve de ser reduzida para 25.000 quadros por segundo.

A Figura 62 mostra alguns quadros da filmagem do processo DC com contato inicial em diferentes momentos da soldagem. No quadro apresentado na Figura 62a, é possível verificar que o pino se encontra posicionado sobre a chapa base, em contato através da *tip* do pino. A Figura 62b apresenta o momento em que ocorre a abertura do arco e que é possível observar que a ponta *tip* foi fundida instantaneamente. A Figura 62c apresenta o processo durante o arco aberto, em que é possível observar a fusão no pino e na chapa base. A Figura 62d mostra o final do processo, com o pino já soldado na chapa base.

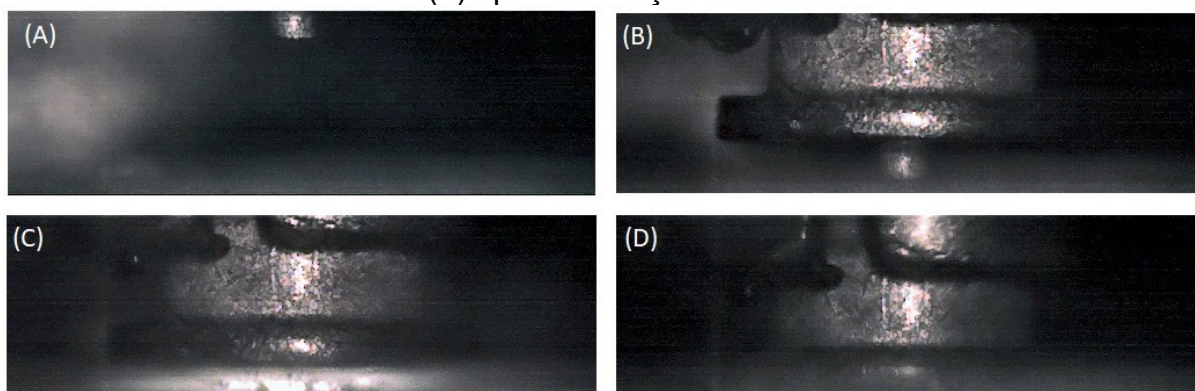
Figura 62 – Quadros da filmagem de alta velocidade (41.666 quadros por segundo) do processo DC com contato inicial: (a) antes da abertura do arco, (b) instante da abertura do arco elétrico, (c) durante o arco aberto e (d) após a extinção do arco elétrico



Fonte: elaborado pelo autor

Já a Figura 63 ilustra os quadros da filmagem de alta velocidade do processo DC com *gap* inicial.

Figura 63 - Quadros da filmagem de alta velocidade (25.000 quadros por segundo) do processo DC com *gap* inicial: (a) pino na posição de elevação devido à atuação do solenoide, (b) instante antes da abertura do arco, (c) instante da abertura do arco elétrico e (d) após a extinção do arco elétrico



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 63a, o pino já se encontra na posição de elevação com a atuação do solenoide. Após a atuação do solenoide, a mola é liberada e empurra o pino em direção à chapa base. A Figura 63b mostra o momento em que o pino se encontra em deslocamento contra a chapa base, instantes antes de acontecer o contato da *tip* do pino na chapa base. Quando o pino encosta na chapa base (Figura 63c), através da *tip*, o arco elétrico é aberto e a *tip* é fundida instantaneamente. Com a descarga da corrente elétrica exatamente neste momento, uma possível interrupção no movimento do pino ao tocar a peça, aparentemente, não acontece, e o pino continua em deslocamento com uma certa velocidade, sendo empurrado pela mola da pistola. A Figura 63d ilustra o final do processo, já com o pino soldado na chapa base.

Nas filmagens de alta velocidade, foi possível verificar que no processo DC com *gap* inicial o arco elétrico é aberto no momento que a *tip* encosta na chapa base, e desta forma, fecha-se o contato elétrico e o banco de capacitores descarrega a energia armazenada.

Além disso, foi possível utilizar a filmagem de alta velocidade para a obtenção de informações como o tempo de deslocamento, distância percorrida pelo pino e velocidade média do pino. Para tal, o instante inicial considerado foi o do momento da abertura do arco e o instante final foi o do momento da extinção do arco. Com esses dois instantes, foi possível saber o tempo de deslocamento do pino, pela subtração

do quadro do final pelo inicial. A medição da distância foi realizada por meio do *software* de tratamento de imagens *ImageJ*, onde é possível efetuar medições calibrando o sistema de medição do *software* com uma distância conhecida, que nesse caso, foi utilizado o diâmetro do próprio pino como referência (6mm). De posse da distância percorrida pelo pino e o respectivo tempo de deslocamento, foi possível calcular a velocidade média. Essas informações estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados das medições realizadas com as filmagens de alta velocidade

Ensaio	Modalidade DC	Tensão de Carga (V)	Pressão da mola	Distância (mm)	Tempo (ms)	Velocidade Média (m/s)
1	com contato inicial	140	baixa	0,6	1,7	0,37
2	com contato inicial	140	média	0,6	1,4	0,44
3	com contato inicial	140	alta	0,7	1,5	0,45
4	com contato inicial	120	baixa	0,7	1,4	0,49
5	com contato inicial	120	média	0,6	1,2	0,47
6	com contato inicial	120	alta	0,7	1,3	0,50
7	com <i>gap</i> inicial	140	baixa	0,7	0,9	0,73
8	com <i>gap</i> inicial	140	média	0,7	1,1	0,61
9	com <i>gap</i> inicial	140	alta	0,7	1,6	0,42
10	com <i>gap</i> inicial	120	baixa	0,6	1,0	0,60
11	com <i>gap</i> inicial	120	média	0,7	1,5	0,45
12	com <i>gap</i> inicial	120	alta	0,7	1,4	0,47

Fonte: elaborado pelo autor

Assim sendo, é possível verificar que a distância percorrida pelo pino em todos os ensaios foi praticamente a mesma, na ordem entre 0,6 e 0,7 mm, o que se justifica que o momento de abertura do arco acontece, para todos os processos DC, com a *tip* encostada na chapa base, e esse deslocamento se dá até que a parte sólida do pino encontre a parte sólida da chapa base.

Já o tempo de deslocamento do pino é cerca de 13,6% maior para o processo DC com contato inicial (valor médio de 1,42 ms) quando comparado com o processo DC com *gap* inicial (valor médio de 1,25 ms). Consequentemente, a velocidade média para o processo DC com *gap* inicial é cerca de 22,2% maior (valor médio de 0,55 m/s) quando comparado com o processo DC com contato inicial (valor médio de 0,45 m/s). Isso se justifica na questão de que o pino no processo DC com *gap* inicial já está com uma certa velocidade no momento de abertura do arco, o que não acontece com o processo DC com contato inicial, em que o pino inicia o movimento do repouso quando ocorre a abertura do arco elétrico.

A norma ISO 14555:2014(E) (2014), apresenta valores de velocidade de mergulho do pino como sendo entre 0,5 e 0,7 m/s para o processo DC com contato inicial e entre 0,5 e 1,5 m/s para o processo DC com *gap* inicial. Sendo assim, os valores de velocidade média do pino encontrados nesse estudo para o processo DC com contato inicial, que foi na ordem entre 0,4 e 0,5 m/s, está um pouco abaixo da faixa de valores apresentados na norma. Já para o processo DC com *gap* inicial, os valores encontrados de velocidade média, na ordem entre 0,4 e 0,7 m/s estão um pouco abaixo ou dentro da faixa de valores apresentados na referida norma.

Além disso, as pistolas usadas possuem acionamentos por molas, sendo estas molas distintas. Durante o experimento, fica perceptível que o operador, ao posicionar a pistola sobre a chapa base, precisa fazer uma força maior para vencer a protrusão do pino para manusear a pistola de soldagem SOYER/PS-3K, o que indica que as molas são distintas, e que a força da mola desta pistola é maior quando comparada com a pistola de soldagem SOYER/PS-3, contribuindo para uma comparação injusta entre as subvariações.

APÊNDICE D – ESTUDO DE EXEQUIBILIDADE DO PROCESSO SW POR DESCARGA CAPACITIVA EM CHAPAS ESPESSAS

De modo a obter uma avaliação quanto à viabilidade e exequibilidade da soldagem de pinos em chapas de maior espessura utilizando o processo DC, de modo que se possa suprir essa carência na literatura, foram soldados pinos roscados de 8 mm de diâmetro (M8) em chapas de aço carbono ASTM A36 de 12,7mm e 63,5 mm de espessura.

A fonte de soldagem utilizada foi uma SOYER/BMS-10N, equipada com uma pistola de soldagem de pinos SOYER/PS-3K, ou seja, foi utilizada a subvariação do processo DC com contato inicial. Os principais parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos que possuem relevância para este estudo estão descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Principais parâmetros de soldagem utilizados

Parâmetro de Soldagem	Valor
Tensão de Carga (V)	150
Pressão da mola	Médio
Protrusão do pino (mm)	1,5

Fonte: elaborado pelo autor

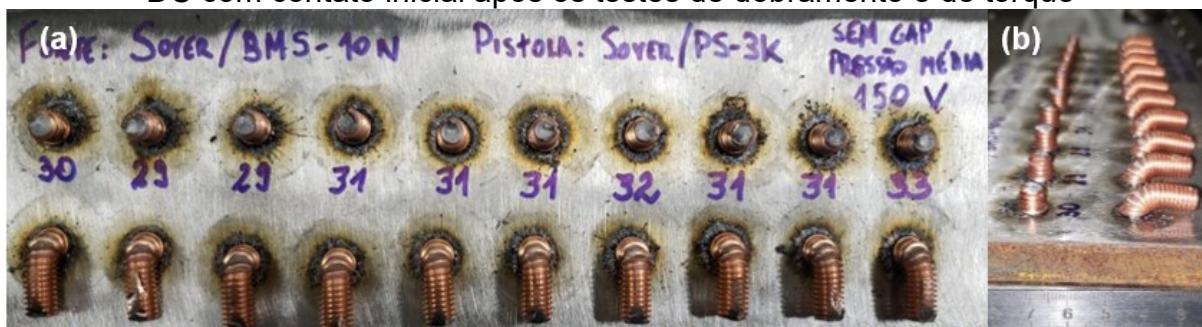
Para avaliar a qualidade da solda, foi realizado a qualificação do procedimento de soldagem. Apesar da norma AWS D1.1/D1.1M:2020 (2020) prever a realização de apenas 10 testes de dobramento, torque ou tração para a qualificação do procedimento de soldagem, nesse experimento foram realizados 10 testes de dobramento e mais 10 testes de torque. O teste de dobramento foi conduzido utilizando um dispositivo manual de alavanca para submeter os pinos à força de dobramento, enquanto o teste de torque foi utilizado um torquímetro de estalo RAVEN/100200.

A norma preconiza que os testes sejam realizados até a falha/ruptura do pino, sendo o procedimento considerado aprovado e qualificado desde que esta falha/ruptura não ocorra na região da solda.

A Figura 64a apresenta em vista superior e a Figura 64b em vista lateral os 20 pinos M8 soldados em uma chapa de 12,7mm de espessura, com o processo SW por descarga capacitiva, após terem sido submetidos aos testes de qualificação do

procedimento e a Tabela 20 apresenta os resultados dos testes de qualificação de procedimento em cada pino.

Figura 64 – Pinos M8 soldados na chapa de 12,7 mm de espessura com o processo DC com contato inicial após os testes de dobramento e de torque



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 20 – Resultados dos testes de dobramento e de torque dos pinos M8 soldados na chapa de 12,7 mm

Pinos	Teste de Dobramento		Teste de Torque		
	Local da falha	Resultado	Torque máximo sem falha (N.m)	Local da falha	Resultado
Pino 1	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 2	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 3	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 4	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 5	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 6	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 7	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 8	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 9	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 10	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 11	-	-	29	Pino	Aprovado
Pino 12	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 13	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 14	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 15	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 16	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 17	-	-	31	Pino	Aprovado
Pino 18	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 19	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 20	-	-	32	Pino	Aprovado

Fonte: elaborado pelo autor

É possível observar que todos os 20 pinos M8 soldados na chapa de 12,7 mm obtiveram o resultado de aprovado. Para verificar se o mesmo procedimento de soldagem seria também viável e exequível em uma chapa ainda mais espessa, o mesmo ensaio foi realizado em uma chapa de aço ASTM A36 de 63,5 mm. A Figura 65 apresenta os 20 pinos M8, soldados em chapa de 63,5 mm de espessura, após terem sido submetidos aos testes de qualificação de procedimento e a Tabela 21 apresenta os resultados dos testes de qualificação de procedimento em cada pino.

Figura 65 – Pinos M8 soldados na chapa de 63,5 mm de espessura após os testes de dobramento e de torque



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 21 – Resultados dos testes de dobramento e de torque dos pinos M8 soldados na chapa de 63,5 mm

Pinos	Teste de Dobramento		Teste de Torque		
	Local da falha	Resultado	Torque máximo sem falha (N.m)	Local da falha	Resultado
Pino 1	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 2	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 3	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 4	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 5	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 6	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 7	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 8	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 9	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 10	Pino	Aprovado	-	-	-
Pino 11	-	-	26	Pino	Aprovado
Pino 12	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 13	-	-	26	Pino	Aprovado
Pino 14	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 15	-	-	30	Pino	Aprovado
Pino 16	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 17	-	-	28	Pino	Aprovado
Pino 18	-	-	29	Pino	Aprovado
Pino 19	-	-	31	Pino	Aprovado
Pino 20	-	-	31	Pino	Aprovado

Fonte: elaborado pelo autor

Assim como no resultado em chapa de 12,7 mm de espessura, é possível observar que todos os 20 pinos M8 soldados na chapa de 63,5 mm de espessura obtiveram o resultado de aprovado.

Embora a literatura encontrada não mencione uma espessura máxima para a chapa base que seja recomendado efetuar a soldagem de um pino utilizando o processo SW por descarga capacitiva, a experiência prática tem mostrado apenas aplicações do referido processo em chapas finas. Desta forma, os resultados apresentados são promissores e sugerem que a utilização deste processo de soldagem SW por descarga capacitiva é viável e exequível mesmo para chapas de maior espessura, sendo aprovado na qualificação de procedimento de soldagem conforme preconizado em norma técnica.

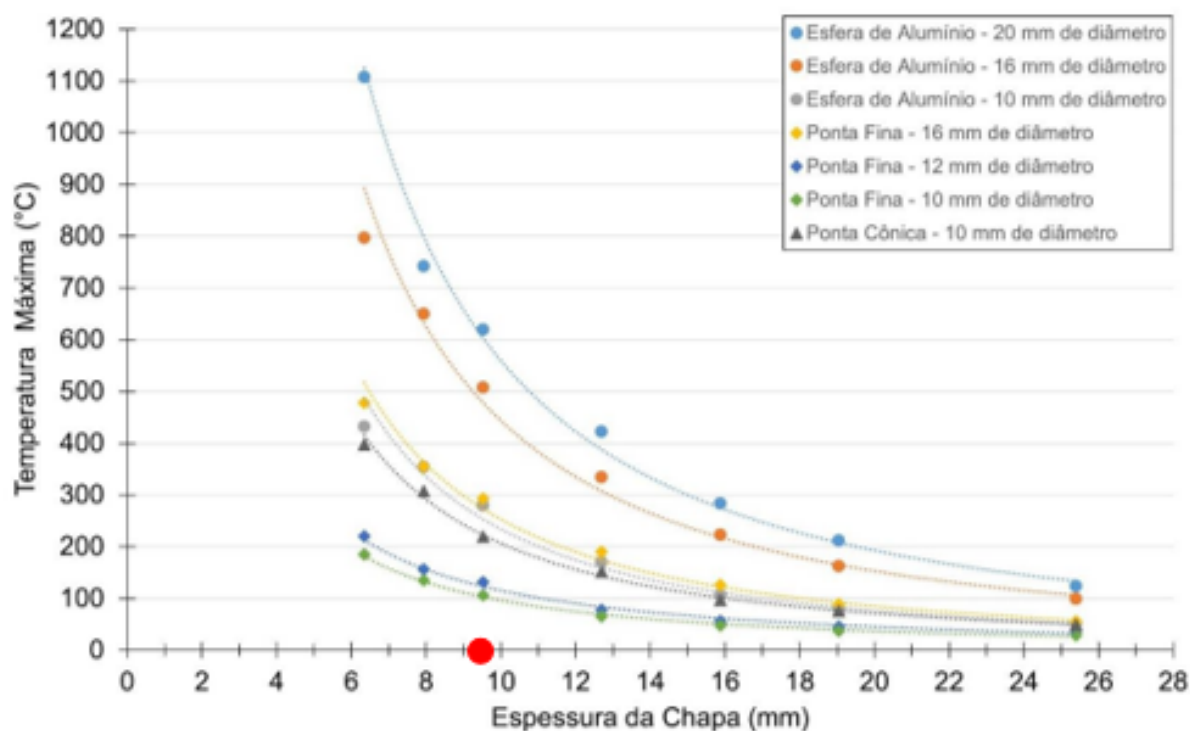
APÊNDICE E – EXEMPLO PRÁTICO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA

De modo a facilitar o entendimento de como utilizar a ferramenta para subsidiar a escolha do diâmetro do pino ou parametrização do processo SW, será realizada uma simulação prática de aplicação da ferramenta.

Supondo que em uma aplicação prática, em que pinos serão soldados em uma chapa de aço carbono ASTM A36 de 9,5 mm de espessura. Outro requisito imposto é que só tem disponibilidade em estoque de pinos com ponta de esfera de alumínio. O material presente no verso dessa chapa possui risco de inflamabilidade ao atingir temperaturas superiores a 350°C. Assim, será apresentado a seguir um passo a passo de como utilizar a ferramenta.

- 1) Requisito de espessura da chapa: como o pino será soldado em chapa de 9,5 mm de espessura, a espessura da chapa é marcada no gráfico no eixo das abscissas, conforme é apresentado na Figura 66.

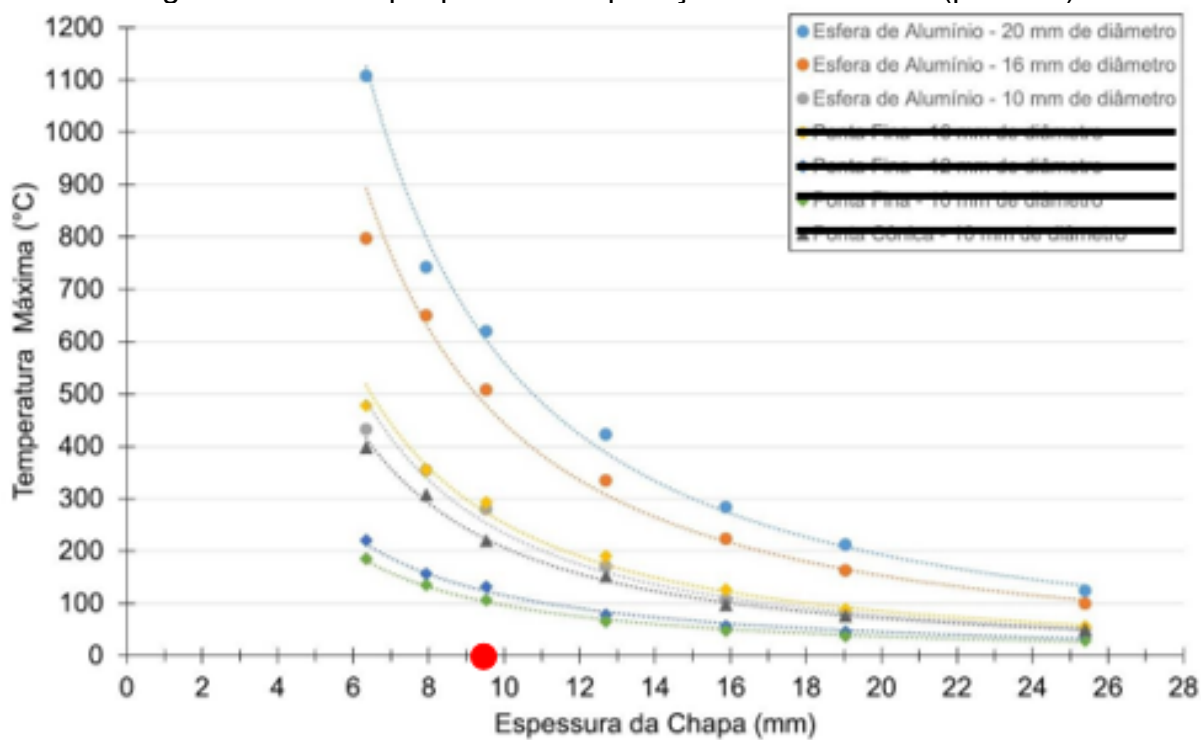
Figura 66 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 1)



Fonte: elaborado pelo autor

2) Requisito de disponibilidade de pinos em estoque: como a disponibilidade de pinos em estoque é somente para pinos com geometria da ponta de esfera de alumínio, os pinos com geometria de ponta diferentes são eliminados, conforme é apresentado na Figura 67

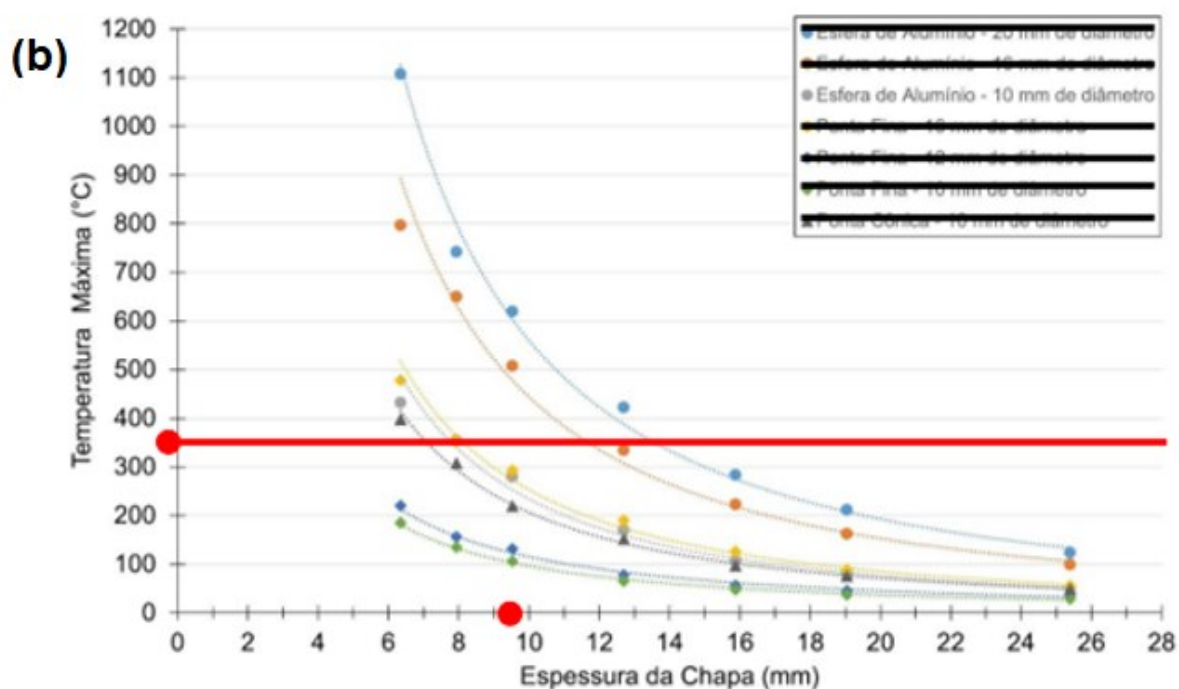
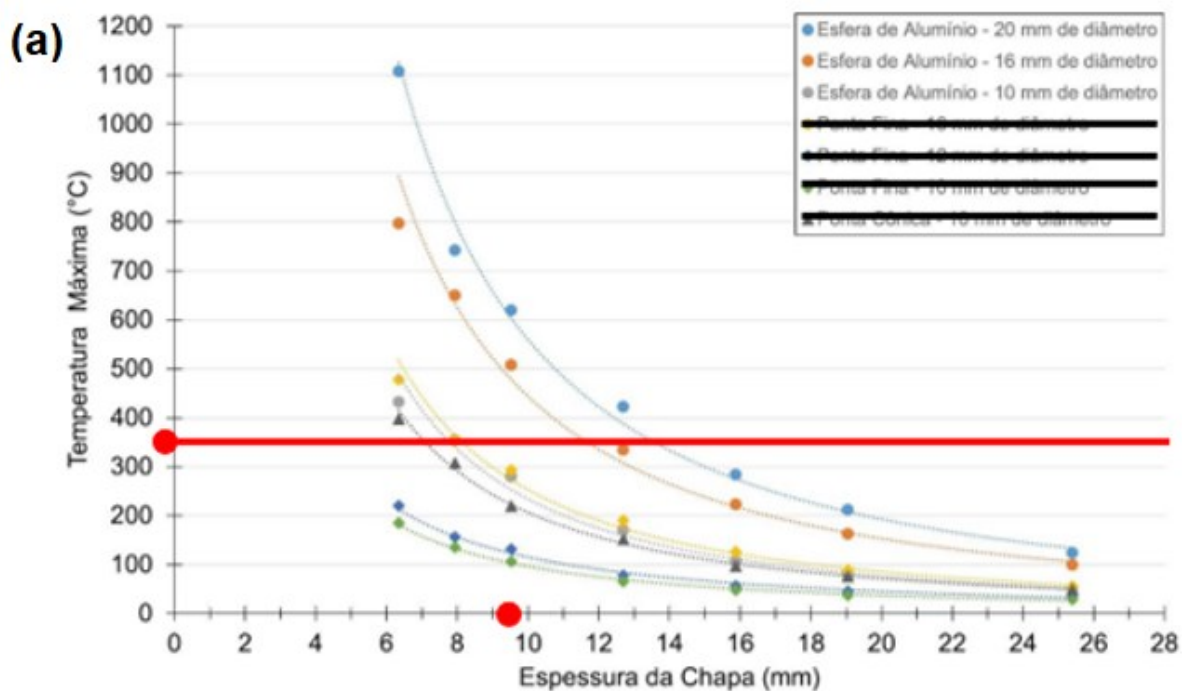
Figura 67 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 2)



Fonte: elaborado pelo autor

3) Requisito de temperatura no verso da chapa: como o material presente no verso da chapa possui risco de inflamabilidade em temperaturas superiores a 350° C, a temperatura máxima de 350°C é marcada no gráfico no eixo das ordenadas, conforme é apresentado na Figura 68a. Os pinos que não atendem ao requisito são eliminados, como é apresentado na Figura 68b

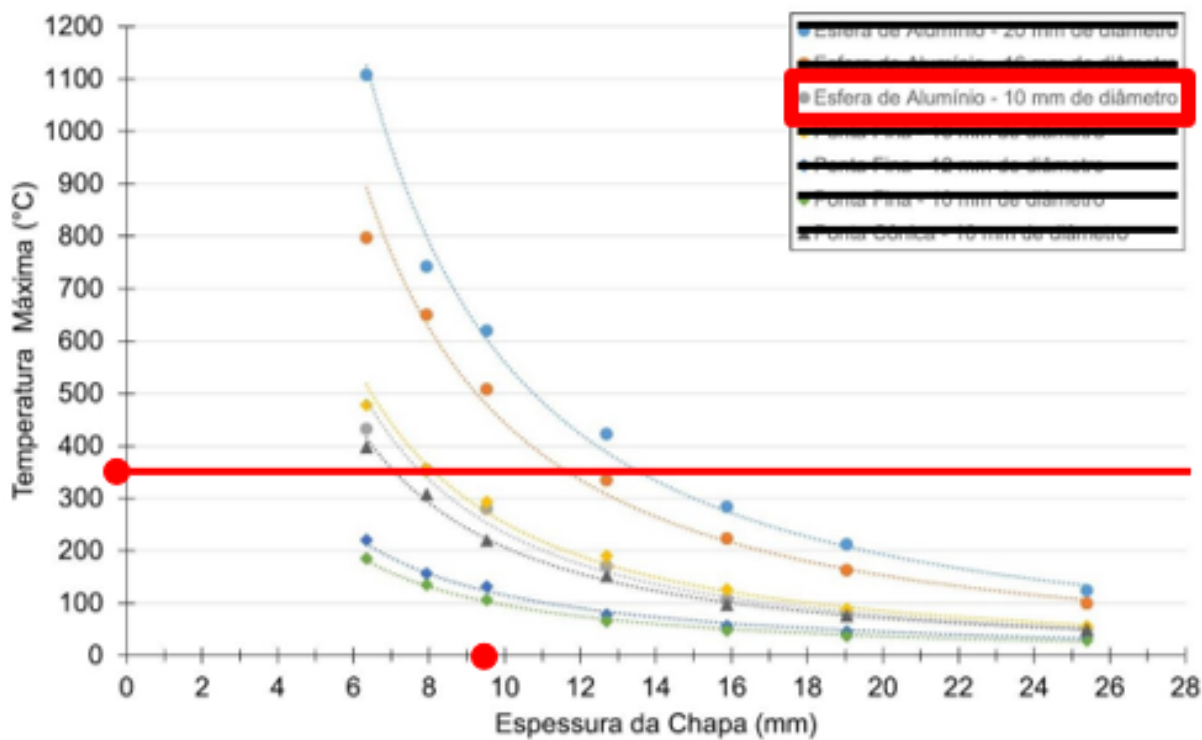
Figura 68 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 3)



Fonte: elaborado pelo autor

4) Seleção dos pinos que atendem a todos os requisitos: por último, são selecionados os pinos que atendem a todos os requisitos impostos, conforme é apresentado na Figura 69.

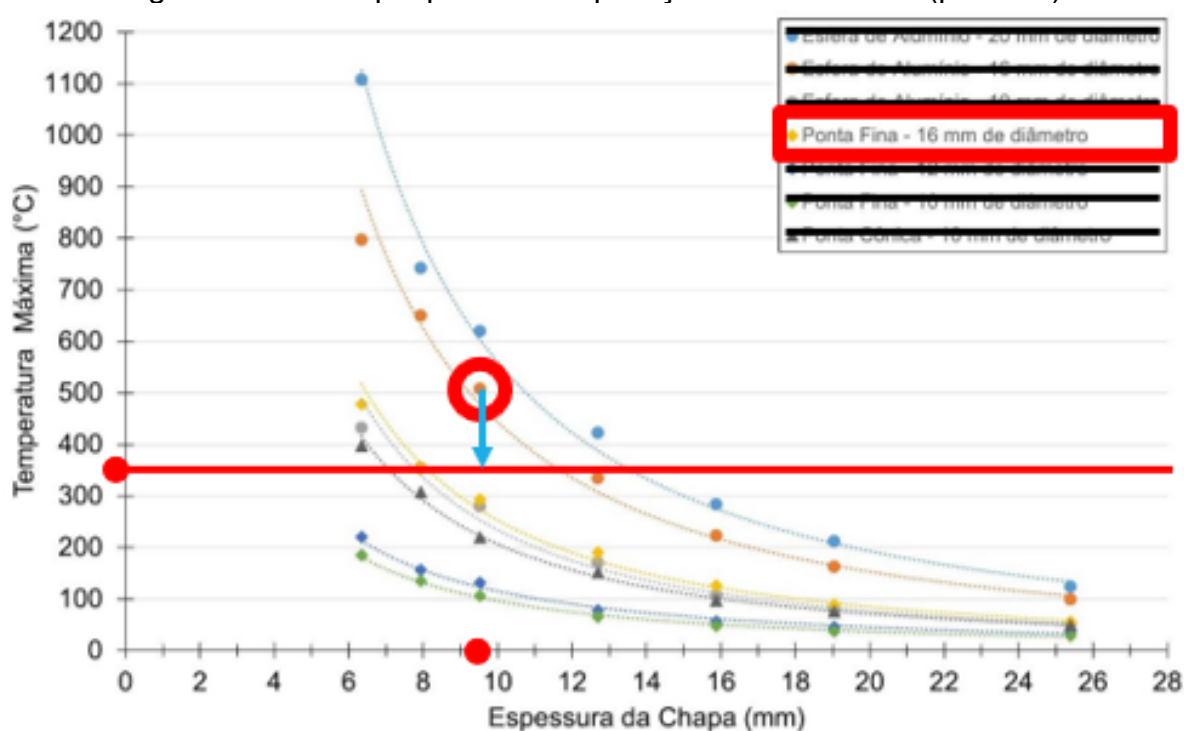
Figura 69 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 4)



Neste exemplo de aplicação prática, o pino de 10 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio foi o único que atendeu a todos os requisitos.

5) Requisito adicional: caso existisse um requisito de utilizar obrigatoriamente um pino de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio, seja pelo fato de disponibilidade em estoque, ou por questão de requisito de projeto, a utilização desse pino seria inexecutável com os parâmetros utilizados nesse estudo, uma vez que a temperatura máxima atingida no verso da chapa com esse pino é de cerca de 500°C, e o requisito do material presente no verso é de 350°C. Assim, haveria a necessidade de redução dessa temperatura, conforme é apresentado na Figura 70.

Figura 70 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 5)

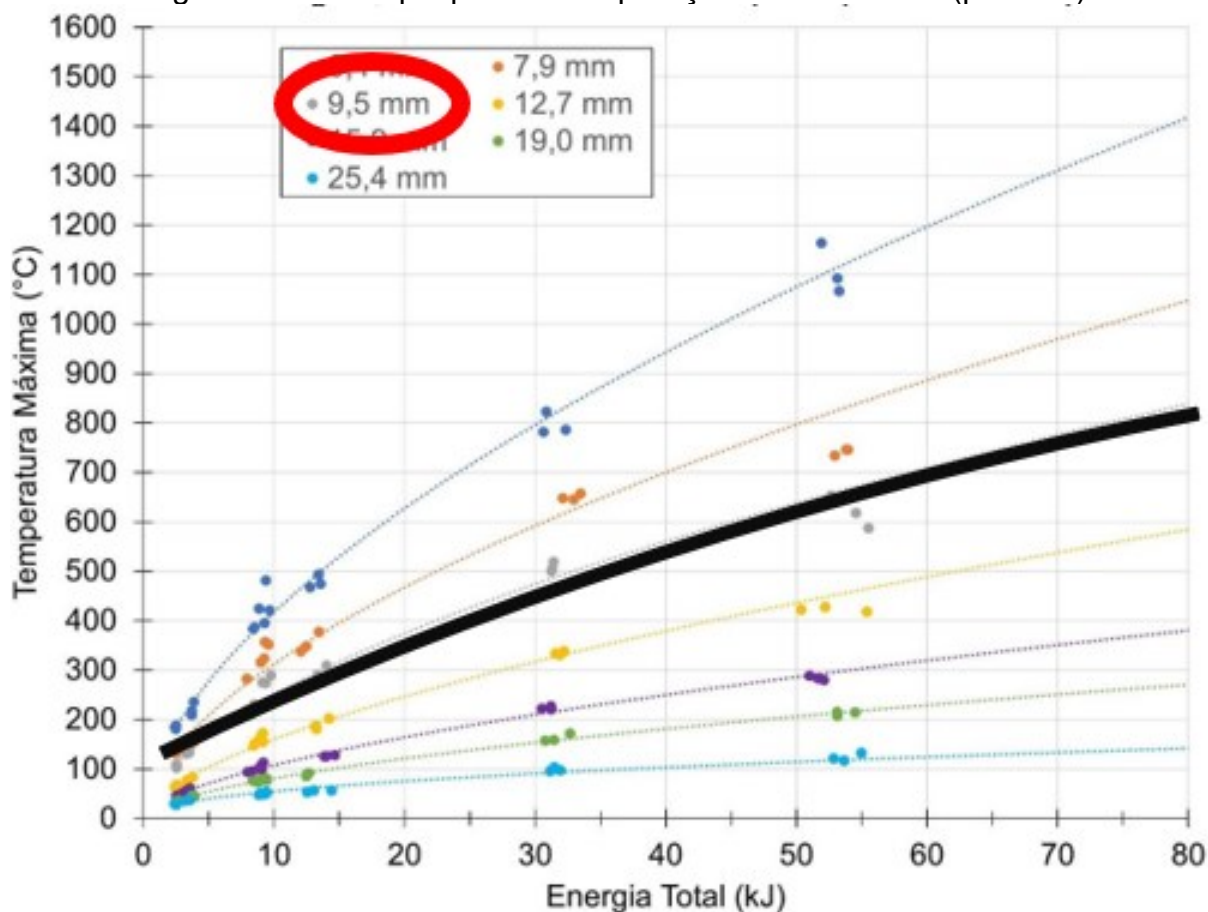


Fonte: elaborado pelo autor

Para efetuar essa redução de temperatura, é necessário reduzir a energia de soldagem imposta pelo processo. Nesse sentido, o outro gráfico de Temperatura máxima X Energia total será utilizado.

6) Seleção da espessura da chapa: como o pino será soldado em chapa de 9,5 mm de espessura, a curva que representa essa espessura é selecionada, conforme é apresentado na Figura 71.

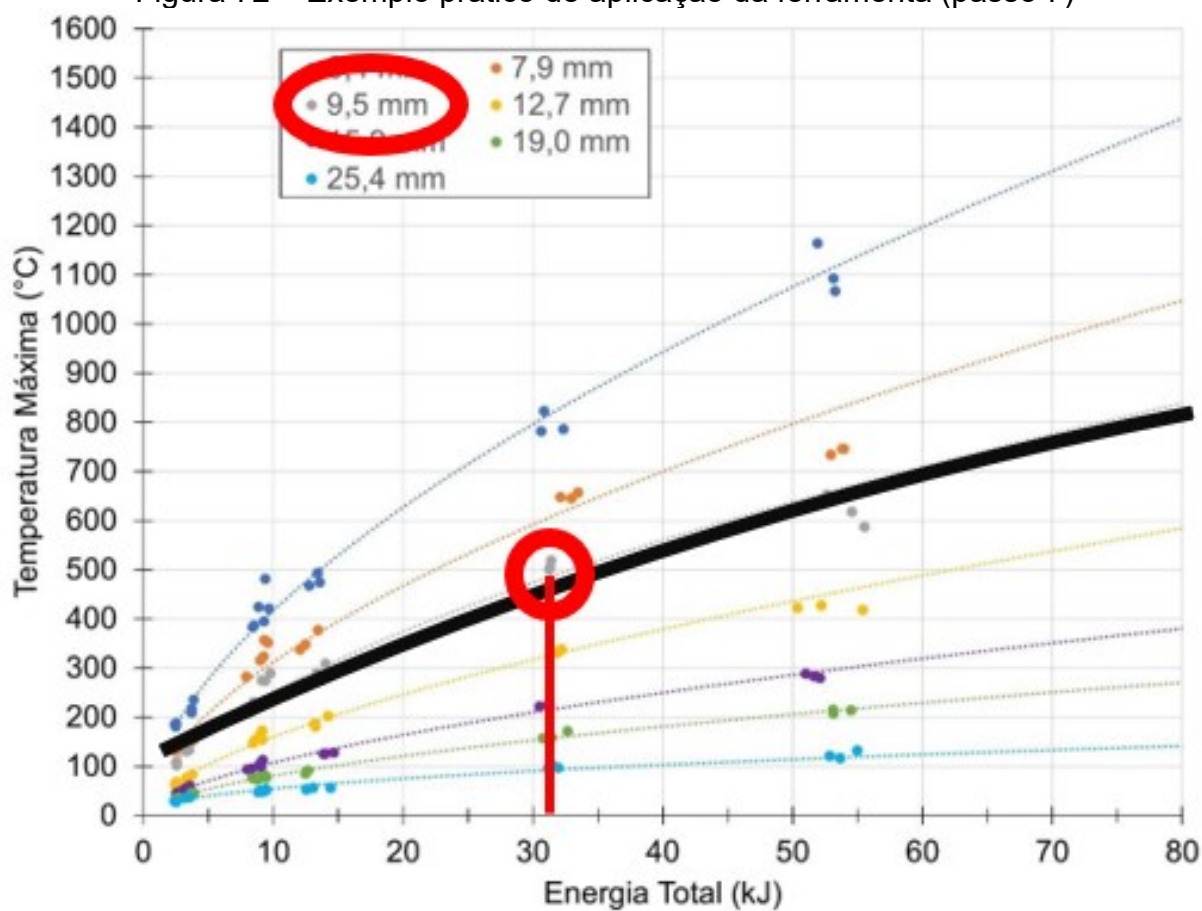
Figura 71 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 6)



Fonte: elaborado pelo autor

7) Identificação da energia total: para um pino de 16 mm de diâmetro e ponta de esfera de alumínio soldado em chapa de aço ASTM A36 de 9,5 mm de espessura, com os parâmetros utilizados no presente estudo, a energia total introduzida é da ordem de 32 kJ, conforme é apresentado na Figura 72.

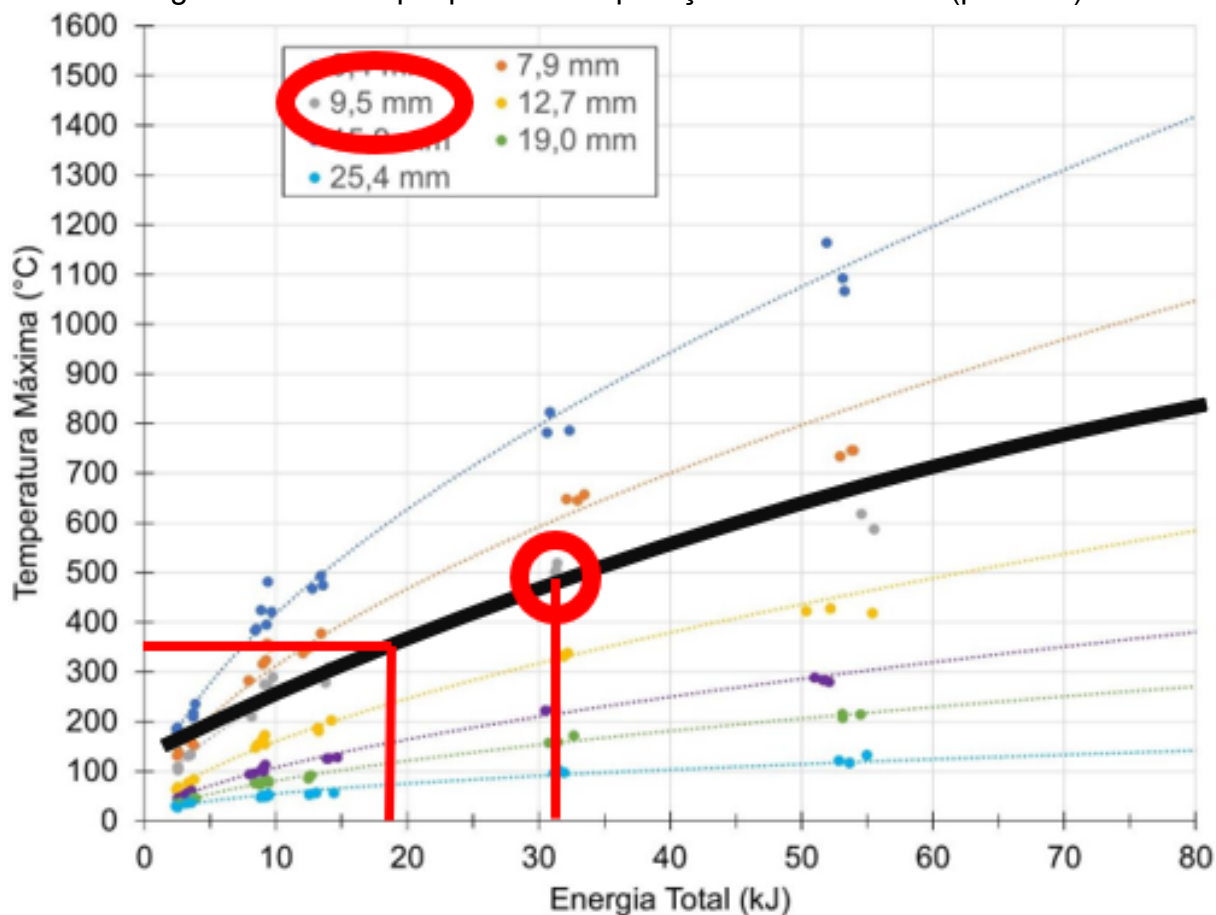
Figura 72 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 7)



Fonte: elaborado pelo autor

8) Identificação da energia total pelo requisito da temperatura: como o requisito de temperatura máxima no verso da chapa é de 350°C, busca-se a energia total introduzida no processo que acarretará o alcance dessa temperatura no verso da chapa de espessura 9,5 mm, conforme é apresentado na Figura 73, encontrando a energia total na ordem de 18 kJ.

Figura 73 – Exemplo prático de aplicação da ferramenta (passo 8)



Fonte: elaborado pelo autor

Assim, é preciso reduzir a energia de soldagem de 32kJ para 18kJ, o que pode ser conseguido escolhendo parâmetros de soldagem diferentes dos que os utilizados no presente estudo. Nesse sentido, pode-se reduzir, por exemplo, a corrente de soldagem, o tempo de soldagem, o recuo do pino, ou uma combinação deles. É preciso ressaltar que a ferramenta apenas subsidia o usuário na parametrização do processo SW, devendo os pinos soldados com os novos parâmetros serem submetidos aos procedimentos de qualificação preconizados nas normas técnicas.