



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

DUVÁN SÁNCHEZ QUINTANA

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS MECANISMOS DE PISTOLAS DE *STUD*  
*WELDING* E SUAS INFLUÊNCIAS SOBRE O PROCESSO E A QUALIDADE DA  
SOLDAGEM**

Florianópolis  
2025

DUVÁN SÁNCHEZ QUINTANA

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS MECANISMOS DE PISTOLAS DE *STUD*  
*WELDING* E SUAS INFLUÊNCIAS SOBRE O PROCESSO E A QUALIDADE DA  
SOLDAGEM**

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.  
Coorientador: Dr. Alisson Fernandes da Rosa

Florianópolis

2025

Quintana, Duván Sánchez

Análise exploratória dos mecanismos de pistolas de stud welding e suas influências sobre o processo e a qualidade da soldagem / Duván Sánchez Quintana ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, coorientador, Alisson Fernandes da Rosa, 2025.

150 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem de pinos. 3. Pistolas de soldagem. 4. Velocidade de avanço. 5. Análise mecânica. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves e. II. Rosa, Alisson Fernandes da. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

DUVÁN SÁNCHEZ QUINTANA

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS MECANISMOS DE PISTOLAS DE *STUD WELDING* E SUAS INFLUÊNCIAS SOBRE O PROCESSO E A QUALIDADE DA SOLDAGEM

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 28 de Maio de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

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

Prof. Rodrigo de Souza Vieira, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Tulio Fernandes dos Santos Dr. Eng.  
UFSC - Petrobras

Andrés Mauricio Moreno Uribe, Dr. Eng.  
Institute of Manufacturing and Materials Technology. Gdańsk University of Technology.

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.

Insira neste espaço a  
assinatura digital

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

Insira neste espaço a  
assinatura digital

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

Florianópolis, 2025.

*“À minha avó, Edilma Arévalo (Mamá Mima),  
cuja ausência é sentida em cada passo,  
mas cujo amor ilumina meu caminho.  
Este trabalho é, acima de tudo, para você”*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha mais profunda gratidão aos meus pais, Sandra Quintana e Javier Numa, pelo apoio incondicional e pelos ensinamentos que sempre me guiaram. Sem eles, nada disso seria possível. Sua dedicação à minha formação acadêmica foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui.

À Indhira Alvarez Lobo, agradeço imensamente pela companhia, paciência e pelas longas jornadas de trabalho dedicadas à elaboração desta dissertação. Sua presença constante e incentivo foram essenciais durante todo esse processo.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Regis H. Silva, por suas orientações precisas, pela enorme quantidade de conhecimento transmitido e pela oportunidade de fazer parte do time do LabSolda. Sua confiança e apoio foram decisivos para a conclusão deste trabalho.

Gostaria também de agradecer aos grandes amigos que esta fase da vida me trouxe. Ao Claudio Schaeffer, pelas longas conversas sobre português, soldagem e a vida, muitas delas a caminho das ondas. Às amigas Pamela de Matos e Giulia Zanella, por me acolherem com tanto carinho, por me ensinarem português e por serem sempre meu apoio incondicional durante todo este período.

Ao Alisson Rosa e ao Daniel Galeazzi, manifesto minha admiração e agradecimento pelo apoio técnico indispensável e pela amizade sincera. Agradeço também aos amigos Rubén Solarte e Carlos Pinzón por manterem viva a presença da Colômbia mesmo em terras brasileiras, trazendo um pouco de casa para perto.

Minha gratidão se estende a todos do LabSolda, especialmente ao Professor Dr. Mateus B. Schwedersky, Dr. Cleber Marques, Dr. Alberto Bonamigo, Cleber Guedes, Filipe Targino, João Wiggers, Felipe Batista, Henrique Amaral, Nicolas Portela, Leonardo Matos, Laercio Meneses e todos que fazem ou fizeram parte deste incrível time. Obrigado por me acolherem tão bem e por todo o suporte ao longo desta jornada. Finalmente, agradeço ao POSMEC, à PETROBRAS/CENPES e ao programa ANP/PRH nº 45.1 pelo apoio financeiro e institucional, sendo eles a base para a realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, deixo meu mais sincero e profundo agradecimento.

Obrigado.

*“O aspecto mais triste da vida neste momento é que a ciência reúne conhecimento mais rapidamente do que a sociedade reúne sabedoria.”*

*— Isaac Asimov, The Roving Mind (1983)*

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar mecanicamente os principais sistemas internos das pistolas comerciais de *Stud Welding*, visando compreender as diferentes variáveis operacionais, identificar componentes-chave e avaliar sua influência na qualidade do processo de soldagem. A pesquisa foi desenvolvida em quatro fases: análise teórica dos componentes, classificação dos movimentos, experimentação prática e avaliação dos resultados sobre o impacto das características da pistola e sua regulagem sobre o processo. Representantes dos principais sistemas comerciais foram estudados através de buscas e análises de patentes, análises de sistemas comerciais, oscilogramas de deslocamento vs tempo, entre outros métodos. O trabalho abrangeu pistolas para ambas as técnicas do processo, nominalmente Arco Retraído e Descarga Capacitiva. Foram classificadas as estruturas dos mecanismos com pistão rígido ou com compensação de recuo, além de sistemas amortecidos. Na fase experimental, foram avaliadas as configurações de velocidade das pistolas, mantendo constantes os parâmetros elétricos para isolar os efeitos mecânicos. As soldagens realizadas sob condições controladas foram analisadas por meio de macrografias e radiografias, identificando defeitos como porosidades e descontinuidades. A análise estatística dos dados revelou que a velocidade de impacto dos pinos exerce influência direta na geometria da zona fundida e na integridade estrutural das soldas. Os resultados indicam que ajustes precisos nos mecanismos internos podem melhorar significativamente a qualidade e a confiabilidade do processo. Confronta-se a literatura corrente quanto às faixas operacionais de velocidade do pino, e conclui-se que a otimização dos parâmetros mecânicos permite um controle mais eficaz do *Stud Welding*, reduzindo defeitos e aumentando a qualidade da soldagem.

**Palavras-chave:** *Stud Welding*, pistolas de soldagem, mecanismos internos, velocidade de avanço, análise mecânica, qualidade da soldagem.

## ABSTRACT

This study aims to mechanically characterize the main internal systems of commercial stud welding guns, with the objective of understanding operational variables, identifying key components, and evaluating their influence on weld quality. The research was conducted in four phases: theoretical analysis of components, classification of mechanical movements, practical experimentation, and assessment of how gun features and settings impact the welding process. Representative models from major commercial systems were examined through patent searches and analyses, investigations of commercial designs, displacement–time oscillograms, among other methods. The study included guns for both stud welding techniques, namely Drawn Arc and Capacitor Discharge. Mechanisms were categorized based on their structure, distinguishing rigid piston systems, recoil compensation systems, and damped mechanisms. In the experimental phase, gun velocity settings were tested while keeping electrical parameters constant to isolate mechanical effects. Welds produced under controlled conditions were analyzed using macrographs and radiographs, identifying defects such as porosity and discontinuities. Statistical analysis revealed that stud impact velocity has a direct influence on the geometry of the fusion zone and the structural integrity of the welds. Results indicate that precise adjustments to internal mechanisms can significantly improve process quality and reliability. The findings challenge current literature on the operational speed ranges of studs and conclude that optimizing mechanical parameters enables more effective control of the stud welding process, reducing defects and enhancing weld quality.

**Keywords:** *Stud Welding*, internal mechanisms, welding gun, impact speed, mechanical analysis, weld quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Tipos de Pinos.....	2
Figura 1.2 <i>Stud Welding</i> na área offshore A) Trilhos de transporte B) Anodos de sacrifício C) Ancoragens dos trilhos D) Ancoragens dos Anodos .....	3
Figura 1.3 <i>Stud Welding</i> na área A) Civil e B) Automotiva .....	4
Figura 1.4 Fluxograma da estrutura do trabalho .....	6
Figura 2.1 Primeira Patente de L.J. Steel e H. Martin (1922) .....	9
Figura 2.2 Fixação de decks de madeira sobre aço .....	10
Figura 2.3 A) Ted Nelson B) Patente do Ted Nelson (1940) .....	11
Figura 2.4 Visão geral do processo SW por arco retraído.....	13
Figura 2.5 Esquema geral do processo SW por arco retraído .....	14
Figura 2.6 Gráfico Tempo vs Corrente segundo o diâmetro do pino.....	15
Figura 2.7 A) Recuo em ponta cônica B) Recuo em ponta com esfera de alumínio C) Gráfico Diâmetro vs Recuo .....	16
Figura 2.8 Diagrama de deslocamento no processo de SW .....	17
Figura 2.9 A) Protrusão em ponta cônica, B) Protrusão em ponta com esfera de alumínio C) Gráfico Diâmetro vs Protrusão .....	18
Figura 2.10 Parâmetros Gerais do processo de Arco Retraído.....	19
Figura 2.11 Visão geral do processo SW por descarga capacitiva .....	19
Figura 2.12 Esquema geral do processo SW por descarga capacitiva .....	21
Figura 2.13 A) Manipulo de ajuste B) Indicador de compressão na mola C) Esquema da protrusão fixa.....	22
Figura 2.14 A) Esquema do Gap na DC B) Indicador de GAP regulado C) Manipulo .....	23
Figura 2.15 Gráfico de relação corrente/tempo/velocidade segundo o diâmetro .....	24
Figura 2.16 A) Esquema de sistema massa mola B) Gráfico das funções de posição e velocidade do sistema massa mola.....	29
Figura 2.17 A) Esquema do sistema massa mola aplicado a SW B) Gráfico do controle na velocidade no SW com mola .....	30
Figura 2.18 Funcionamento básico do solenoide A) Desligado B) Ligado .....	31
Figura 2.19 Comparação entre motor rotativo e motor linear .....	31
Figura 2.20 Funcionamento básico de um motor de passos.....	33
Figura 2.21 Pistão rígido A) esquema geral B) alojamento da mola .....	34

Figura 2.22 Anel de Travamento A) Sistema Desligado B) Sistema Ligado .....	36
Figura 2.23 Engate de Esferas A) Sistema Desligado B) Sistema Ligado .....	37
Figura 2.24 Batente interno nas posições máxima e mínima .....	39
Figura 2.25 Batente externo nas posições máxima e mínima .....	40
Figura 2.26 Solenoide móvel nas posições máxima e mínima .....	41
Figura 2.27 Exemplos de protrusão no bocal móvel .....	42
Figura 2.28 Exemplo de porta cerâmicas .....	43
Figura 2.29 Exemplo de protrusão nas hastes fixas .....	44
Figura 2.30 Exemplos de protrusão no bocal fixo .....	44
Figura 3.1 Sistema de supervisão e rastreamento da soldagem (3SR) .....	47
Figura 3.2 Montagem de aquisição de Recuo a) Régua potenciométrica b) Suporte na estrutura c) Suporte no pistão .....	48
Figura 3.3 ERESKO MF4 .....	49
Figura 3.4 Pinos usados nos experimentos .....	53
Figura 3.5 Equipamentos usados na bancada de experimentos A) Fontes B) Pistolas C) 3SR .....	54
Figura 3.6 Diagrama de movimento adaptado ao experimento .....	57
Figura 3.7 Disposição das Radiografias A) Pinos $\geq$ M10 B) Pinos $<$ M10 .....	58
Figura 4.1 Estrutura interna do mecanismo com mola (MDC) .....	59
Figura 4.2 Oscilograma MDC e suas etapas de movimento .....	62
Figura 4.3 Apresentação visual das etapas do movimento MDC .....	62
Figura 4.4 Faixa de operação MDC .....	63
Figura 4.5 Velocidades experimentais do mecanismo MDC .....	64
Figura 4.6 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo MDC .....	66
Figura 4.7 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo MDC .....	68
Figura 4.8 Estrutura interna do mecanismo solenoide mola (SMDC) .....	69
Figura 4.9 Oscilograma SMDC e suas etapas de movimento A) Completo B) Descida .....	71
Figura 4.10 Apresentação visual das etapas do movimento SMDC .....	72
Figura 4.11 Faixa de operação SMDC .....	73
Figura 4.12 Velocidades experimentais do mecanismo SMDC .....	74
Figura 4.13 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo SMDC .....	75
Figura 4.14 A) Arco aberto B) Descida sem arco .....	76
Figura 4.15 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo SMDC .....	77

Figura 4.16 Estrutura interna do mecanismo com mola (SMAR) .....	78
Figura 4.17 Relação do Recuo e a Protrusão sobre o <i>Drop Time</i> .....	81
Figura 4.18 Relação Drop Time sobre o Recuo .....	82
Figura 4.19 Oscilograma SMAR e suas etapas de movimento A) Completo B) Descida .....	83
Figura 4.20 Apresentação visual das etapas do movimento SMAR.....	84
Figura 4.21 Faixa de operação SMAR .....	85
Figura 4.22 Variação da tensão nas amostras dos parâmetros testados.....	86
Figura 4.23 A) Sopro magnético B) Curto-circuito.....	87
Figura 4.24 Velocidades experimentais do mecanismo SMAR e relação da energia do processo.....	89
Figura 4.25 Temperaturas nos parâmetros testados.....	90
Figura 4.26 Matriz de Parâmetros e momentos de temperatura nos testes A) Recuo Max. B) Recuo Med. C) Recuo Min. 1) Abertura do arco. 2) Temperatura Máxima. 3) 60 segundos após a abertura do arco.....	91
Figura 4.27 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAR .....	92
Figura 4.28 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAR.....	94
Figura 4.29 Estrutura interna do mecanismo solenoide mola amortecedor (SMAAR) .....	95
Figura 4.30 Faixa de operação do sistema compensador de recuo .....	98
Figura 4.31 Oscilograma SMAAR e suas etapas de movimento A) Completo B) Descida .....	99
Figura 4.32 Apresentação visual das etapas do movimento SMAAR .....	100
Figura 4.33 Faixa de operação SMAAR.....	101
Figura 4.34 Velocidades medias experimentais do mecanismo SMAAR .....	102
Figura 4.35 Distribuição normal da variação do recuo efetivo no mecanismo SMAAR .....	105
Figura 4.36 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAAR.....	108
Figura 4.37 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAAR .....	109
Figura 4.38 Estrutura interna do mecanismo com motor linear (MLAR).....	110
Figura 4.39 Oscilograma MLAR e suas etapas de movimento A) Completo B) Descida .....	113
Figura 4.40 Apresentação visual das etapas do movimento MLAR .....	113
Figura 4.41 Faixa de operação MLAR.....	115

Figura 4.42 Velocidades medias experimentais do mecanismo MLAR.....	116
Figura 4.43 Distribuição normal da variação do recuo efetivo no mecanismo MLAR .....	116
Figura 4.44 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo MLAR.....	117
Figura 4.45 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo MLAR .....	119
Figura 4.46 A) Raio-X Short-Cycle B) Macrografia Short-Cycle .....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Lista de equipamentos utilizados na filmagem de alta velocidade .....	50
Tabela 3.2 Especificações da câmera FLIR T1030SC.....	51
Tabela 3.3 Câmera e dispositivos utilizados nas macrografias.....	51
Tabela 3.4 Características das fontes utilizadas.....	52
Tabela 3.5 Composição química das chapas.....	53
Tabela 4.1 Lista de peças (MDC).....	60
Tabela 4.2 Parâmetros experimentais (MDC) .....	61
Tabela 4.3 Velocidades medias experimentais (MDC).....	64
Tabela 4.4 Teste de flexão (MDC): (✓) Aprovado, (x) Não Aprovado.....	66
Tabela 4.5 Áreas e energias experimentais (MDC).....	68
Tabela 4.6 Lista de peças (SMDC) .....	69
Tabela 4.7 Parâmetros experimentais (SMDC).....	71
Tabela 4.8 Velocidades medias experimentais (SMDC) .....	74
Tabela 4.9 Teste de flexão (SMDC): (✓) Aprovado, (x) Não Aprovado .....	75
Tabela 4.10 Código QR (Figura 4.14) .....	76
Tabela 4.11 Áreas e energias experimentais (SMDC) .....	77
Tabela 4.12 Lista de peças (SMAR).....	78
Tabela 4.13 Resultados do <i>t-student</i> .....	81
Tabela 4.14 Parâmetros experimentais (SMAR) .....	82
(Continua).....	82
Tabela 4.15 Velocidades medias experimentais (SMAR) .....	86
Tabela 4.16 Códigos QR (Figura 4.23) A) Sopro magnético B) Curto-circuito .....	88
Tabela 4.17 Teste de flexão (SMAR): (✓) Aprovado, (x) Não Aprovado .....	93
Tabela 4.18 Áreas e energias experimentais (SMAR) .....	94
Tabela 4.19 Lista de peças (SMAAR) .....	95
(Continua).....	95
Tabela 4.20 Parâmetros experimentais (SMAAR).....	99
Tabela 4.21 Velocidades medias experimentais (SMAAR) .....	103
Tabela 4.22 Velocidades medias experimentais de entrega e amortecimento .....	103
Tabela 4.23 Teste de flexão (SMAAR): (✓) Aprovado, (x) Não Aprovado .....	108
Tabela 4.24 Áreas e energias experimentais (SMAAR) .....	110
Tabela 4.25 Lista de peças (MLAR) .....	111

Tabela 4.26 Parâmetros experimentais (MLAR) .....	112
Tabela 4.27 Velocidades medias experimentais (MLAR) .....	115
Tabela 4.28 Teste de flexão (MLAR): (✓) Aprovado, (×) Não Aprovado.....	118
Tabela 4.29 Áreas e energias experimentais (MLAR) .....	120
Tabela 4.30 Resumo Comparação de Características .....	125

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.2	OBJETIVOS .....	5
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>9</b>
2.1	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO PROCESSO .....	9
2.2	INTRODUÇÃO AO ARCO RETRAÍDO (AR).....	12
<b>2.2.2</b>	<b>Fundamentos do <i>Stud Welding</i> por Arco Retraído</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Componentes Principais (AR)</b> .....	<b>13</b>
2.3	PARÂMETROS DE SOLDAGEM (ARCO RETRAÍDO).....	14
<b>2.3.1</b>	<b>Corrente de Soldagem (<i>Welding Current</i>)</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Tempo de Soldagem (<i>Welding Time</i>)</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Altura de Retração do Pino (<i>Lift</i>)</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Tempo de queda (<i>Drop Time</i>)</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Gás Protetor (<i>Shielding Gas</i>)</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Protrusão (<i>Protrusion</i>)</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Amortecimento (<i>Damper</i>)</b> .....	<b>18</b>
2.4	INTRODUÇÃO A DESCARGA CAPACITIVA (DC).....	19
<b>2.4.2</b>	<b>Fundamentos do <i>Stud Welding</i> por Descarga Capacitiva</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Componentes Principais (DC)</b> .....	<b>21</b>
2.5	PARÂMETROS DE SOLDAGEM (DESCARGA CAPACITIVA) .....	21
<b>2.5.1</b>	<b>Tensão de carga</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Pressão da mola</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Espaçamento (<i>Gap</i>)</b> .....	<b>22</b>
2.6	VELOCIDADE NO <i>STUD WELDING</i> .....	23
<b>2.6.1</b>	<b>Velocidade do Pino no Arco Retraído</b> .....	<b>23</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Velocidade do Pino na Descarga Capacitiva</b> .....	<b>25</b>
2.7	MECANISMOS APLICADOS A <i>STUD WELDING</i> .....	26
<b>2.7.1</b>	<b>Atuadores</b> .....	<b>26</b>
2.7.1.1	<i>Molas</i> .....	26
2.7.1.2	<i>Motor Linear</i> .....	31
2.7.1.3	<i>Motor de Passo</i> .....	32
<b>2.7.2</b>	<b>Sistemas de Acoplamento</b> .....	<b>34</b>

2.7.2.1	<i>Pistão Rígido</i> .....	34
2.7.2.2	<i>Compensação de recuo</i> .....	35
<b>2.7.3</b>	<b>Sistemas de Recuo</b> .....	<b>39</b>
2.7.3.1	<i>Batente de fim de curso interno</i> .....	39
2.7.3.2	<i>Batente de fim de curso externo</i> .....	40
2.7.3.3	<i>Solenóide móvel</i> .....	41
<b>2.7.4</b>	<b>Sistemas de Protrusão</b> .....	<b>42</b>
2.7.4.1	<i>Bocal móvel</i> .....	42
2.7.4.2	<i>Porta-Cerâmicas</i> .....	43
2.7.4.3	<i>Hastes fixos</i> .....	43
2.7.4.4	<i>Bocal Fixo</i> .....	44
<b>2.7.5</b>	<b>Sistemas de Amortecimento</b> .....	<b>45</b>
2.7.5.1	<i>Amortecedores Hidráulicos</i> .....	45
2.7.5.2	<i>Amortecedores Pneumáticos</i> .....	45
2.7.5.3	<i>Amortecimento Eletrônico</i> .....	45
<b>3</b>	<b>EQUIPAMENTOS E METODOS</b> .....	<b>47</b>
3.1	EQUIPAMENTOS .....	47
3.1.1	<b>3SR</b> .....	<b>47</b>
3.1.2	<b>Raio-X</b> .....	<b>49</b>
3.1.3	<b>Câmeras</b> .....	<b>49</b>
3.1.4	<b>Fontes</b> .....	<b>51</b>
3.1.5	<b>Pistolas</b> .....	<b>52</b>
3.1.6	<b>Chapas</b> .....	<b>53</b>
3.1.7	<b>Pinos</b> .....	<b>53</b>
3.1.8	<b>Bancada</b> .....	<b>54</b>
3.2	METODOLOGIA .....	55
3.2.1	<b>Análise de Patentes, Manuais, Desmontagem e Radiografias de Dispositivos</b> .....	<b>55</b>
3.2.2	<b>Estudo dos Movimentos</b> .....	<b>56</b>
3.2.3	<b>Experimentação e Análise de Soldagens</b> .....	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
4.1	MOLA (DC) .....	59
4.1.1	<b>Estrutura MDC</b> .....	<b>59</b>
4.1.2	<b>Movimento MDC</b> .....	<b>61</b>

4.1.3	<b>Efeitos da Pressão da Mola (Pré-carga)</b> .....	65
4.2	<b>SOLENOIDE MOLA (DC)</b> .....	68
4.2.1	<b>Estrutura SMDC</b> .....	68
4.2.2	<b>Movimento SMDC</b> .....	70
4.2.3	<b>Efeitos da Protrusão fixa e da relação GAP velocidade</b> .....	74
4.3	<b>SOLENOIDE MOLA (AR)</b> .....	77
4.3.1	<b>Estrutura SMAR</b> .....	77
4.3.2	<b>Movimento SMAR</b> .....	79
4.3.3	<b>Efeitos da variação da velocidade por meio da variação do recuo</b> .....	89
4.4	<b>SOLENOIDE MOLA AMORTECEDOR (AR)</b> .....	95
4.4.1	<b>Estrutura SMAAR</b> .....	95
4.4.2	<b>Movimento SMAAR</b> .....	97
4.4.3	<b>Efeitos da implementação do amortecedor e compensação de recuo</b> 107	
4.5	<b>MOTOR LINEAR (AR)</b> .....	110
4.5.1	<b>Estrutura MLAR</b> .....	110
4.5.2	<b>Movimento MLAR</b> .....	112
4.5.3	<b>Efeitos do Controle Eletrônico da velocidade e posição</b> .....	117
4.5.4	<b>Teste com <i>Short-Cycle</i></b> .....	120
4.6	<b>COMPARAÇÃO GERAL</b> .....	122
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	126
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	128
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	130

## 1 INTRODUÇÃO

No meio da Segunda Guerra Mundial surgiu um processo de soldagem que revolucionou a indústria naval e deu aos Estados Unidos uma vantagem sobre outros países, uma vez que reduziu significativamente os custos de construção naval. O processo em questão era o *Stud Welding* (SW), o qual nasceu da necessidade de fixar *decks* de madeira sobre chapas de aço. O SW só precisava de um soldador, eliminando a necessidade de pagar altos custos utilizando andaimes dentro dos navios, bem como mais trabalhadores para realizar operações de furação e aparafusamento. O processo também apresentou a possibilidade de realizar estas atividades de reparo no alto mar. Com tudo o que foi mencionado acima, estima-se que a Marinha dos EUA conseguiu economizar cerca de 50 milhões de horas-homem necessárias para estas atividades; uma vez que no final da guerra, o processo SW diversificou suas aplicações (Chambers, 2001).

O processo SW tem uma vantagem sobre outros processos de soldagem, dado seu curto tempo de execução e pequena distorção, conforme descrito por Oh (2007), além de resultar numa solda em toda a área da interface, em vez de apenas uma solda perimetral. Assim, posiciona-se como um dos processos de soldagem mais rápidos atualmente. O SW consiste em soldar um pino em uma placa metálica por arco elétrico. O operador utiliza uma pistola, a qual pode possuir diversos tipos de acionamento para movimentar o pino durante o processo, como solenoides, molas, motores lineares, motores de passo, entre outros. O pino é encaixado na pistola e voltado contra a superfície da placa. Sequencialmente, um arco elétrico é aberto entre a base do pino e a superfície da placa criando uma poça fundida, na qual o pino é então empurrado para ser fixado na posição (Nishikawa, 2003). A soldagem de pinos é agora aplicada para fixar pinos em plataformas da indústria de óleo e gás, suportes de tubos em hangares, bandejas para instalações elétricas, isolamento e fixações de madeira em componentes metálicos, bem como para soldar outros tipos de acessórios, tais como olhais, ganchos e anéis, conforme ilustra a Figura 1.1 (Eyres; Bruce, 2012).

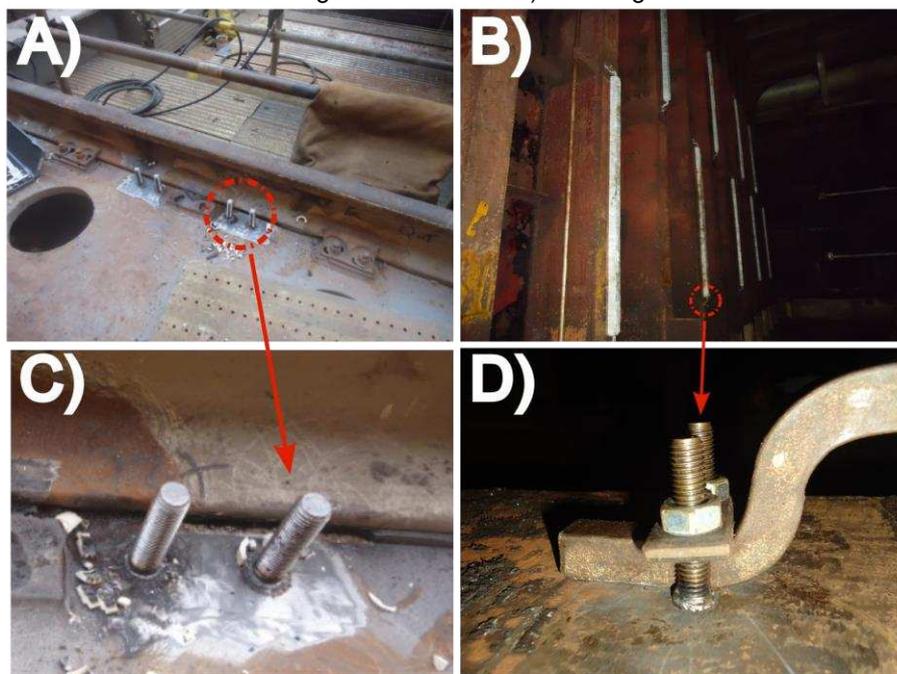
Figura 1.1 Tipos de Pinos



Fonte: adaptado de (Taylor Stud Welding, 2025)

Atualmente, em diversas atividades de manutenção industrial e offshore, o processo de fixação permanente de pinos via SW pode ser de grande utilidade, permitindo economizar considerável tempo e, conseqüentemente, reduzir custos. Isso é especialmente evidente em tarefas como paradas programadas e grandes intervenções. Durante essas operações, é comum enfrentar dificuldades ao movimentar cargas, ao remover ou reinstalar válvulas, *spools* e outros materiais pesados (Vinnem; Haugen; Okoh, 2016). Frequentemente, recorre-se a métodos de mobilização como o deslocamento aéreo através do uso de guindastes, empilhadeiras, deslizamento sobre o solo ou rotação sobre tubos além do uso de andaimes, o que implica riscos consideráveis e aumenta o tempo necessário para a manobra (Abbassi et al., 2015) o processo de *Stud Welding* se destaca por sua simplicidade e rapidez, o que o torna uma solução eficiente para a montagem e desmontagem de uma variedade de tipos de dispositivos auxiliares necessários em determinadas tarefas de manutenção. Neste contexto, a utilização de dispositivos de fixação como os pinos soldados pode simplificar enormemente o trabalho, como ilustrado na Figura 1.2. Através de pinos soldados com SW, foram fixados trilhos (Figura 1.2a) e ânodos de sacrifício (Figura 1.2b) em uma plataforma em funcionamento, reduzindo os tempos de trabalho e contribuindo para melhorar os processos de manutenção, uma prioridade para a indústria de petróleo e gás, incluindo empresas como a Petrobras.

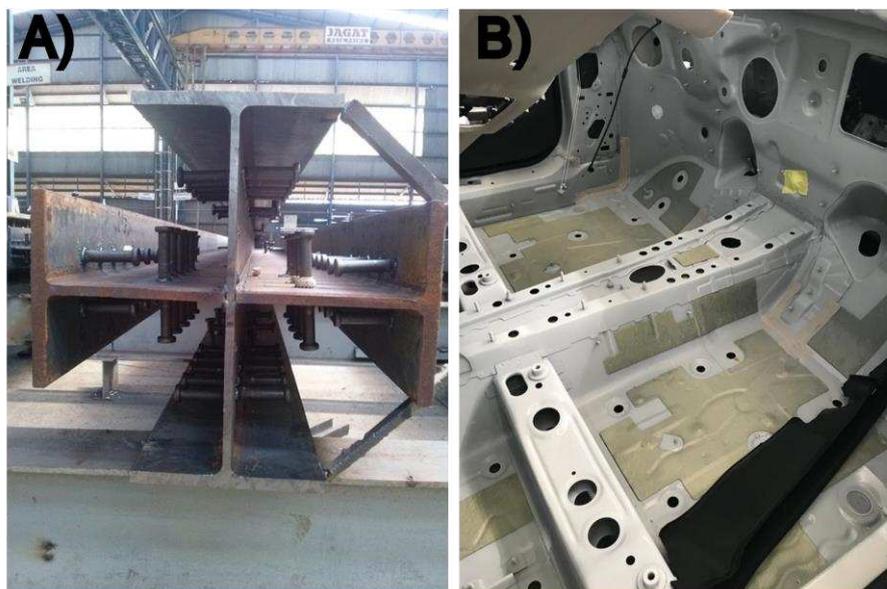
Figura 1.2 *Stud Welding* na área offshore A) Trilhos de transporte B) Anodos de sacrifício C) Ancoragens dos trilhos D) Ancoragens dos Anodos



Fonte: elaborado pelo autor

Acrescentando-se que o processo fornece agilidade na realização dos testes de carga necessários, visando o cumprimento de normas, como a ISO 13918 (2014) e ISO 14555 (2014), garantindo a qualidade estrutural da solda. Embora a soldagem de pinos não seja atualmente um processo comumente utilizado na indústria de petróleo e gás, ela é uma técnica utilizada nas indústrias automotiva (Figura 1.3b), e de construção civil (Figura 1.3a), com versatilidade em cada uma das atividades mencionadas. Sabendo isto, a expansão do uso desta técnica na indústria de petróleo e gás exige esforços de desenvolvimento em tecnologias para gerar e implementar métodos de simplificação nas atividades de manutenção e fabricação.

Figura 1.3 *Stud Welding* na área A) Civil e B) Automotiva



Fonte: elaborado pelo autor

Em síntese, há duas técnicas para realizar o processo *Stud Welding*: *Drawn Arc* (arco retraído) e *Capacitive Discharge* (descarga capacitiva). Entretanto, a própria natureza da contribuição térmica do processo causa variações microestruturais e metalúrgicas que conseqüentemente afetam as propriedades mecânicas da junta (Zhang et al., 2022).

Neste contexto, o processo requer um bom desenho dos procedimentos e equipamentos de soldagem, que convergem no momento da inspeção em resultados favoráveis, garantindo a repetitividade e confiabilidade no processo. Tudo isso culmina na justificativa de aprimorar o entendimento e os conhecimentos sobre o processo SW, já que as empresas oferecem equipamentos inflexíveis para os processos, sem possibilidades de alterar as suas variáveis essenciais.

Em resumo, pelas características apresentadas anteriormente, o processo SW é largamente viável para uso industrial e *offshore* tanto em operações de montagem como de manutenção. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma expansão do conhecimento tecnológico e científico atualmente disponível, buscando compreender o funcionamento dos principais mecanismos utilizados nas pistolas comerciais de *Stud Welding* e nacionalizar este conhecimento, que habilitará a produção de dispositivos de soldagem *Stud* brasileiros no futuro, possibilitando inovações, melhorias e customizações a aplicações e condições nacionais, uma vez que o mercado nacional é atendido hoje exclusivamente por empresas estrangeiras.

## 1.2 OBJETIVOS

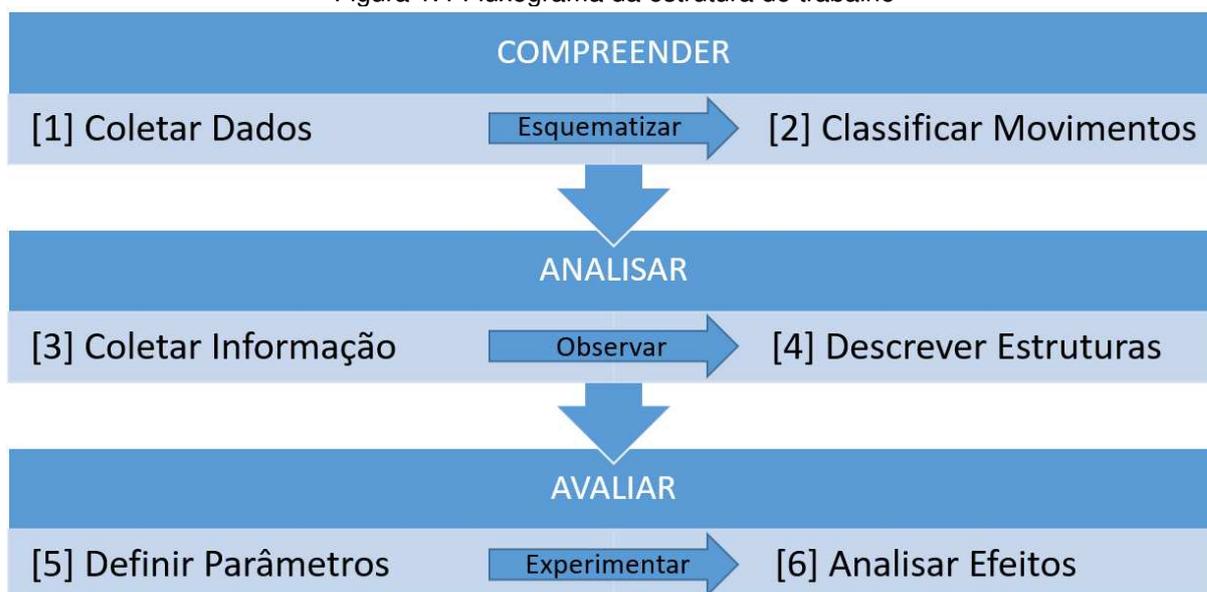
O principal objetivo deste trabalho é: caracterizar mecanicamente os principais sistemas internos presentes nas pistolas comerciais de *Stud Welding*, a fim de compreender as diferentes variáveis de operação, identificar componentes-chave e determinar sua influência na qualidade e eficiência do processo de soldagem. Para atingir o objetivo principal, alguns objetivos específicos são traçados:

- Investigar os componentes-chave e sua localização nos diferentes mecanismos internos por meio de análise de patentes, gráficos de movimento, ensaios de radiografias e inspeção visual, visando a posterior identificação e descrição detalhada dos componentes que atuam diretamente na execução do movimento e suas funções no processo de SW;
- Estudar os movimentos dos mecanismos de acionamento de diversas pistolas comerciais de *Stud Welding*, utilizando sensores de deslocamento para compreender e classificar cada uma das etapas do movimento durante o processo de soldagem;
- Examinar a influência dos parâmetros definidos na qualidade da soldagem por meio de análises experimentais e estatísticas, como macrografias e micrografias, visando aprimorar o conhecimento das variáveis mecânicas indiretas como as velocidades médias envolvidas no processo SW.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é organizada com base nos níveis de conhecimento da taxonomia de Bloom [compreender, analisar e avaliar], permitindo um desenvolvimento progressivo e lógico para atingir o objetivo principal. Cada nível possui duas etapas específicas, conectadas por atividades centrais que orientam o fluxo da pesquisa de forma clara e objetiva, na Figura 1.4 se observa a estrutura representada em um fluxograma.

Figura 1.4 Fluxograma da estrutura do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

No nível compreender, busca-se inicialmente coletar dados sobre os movimentos dos mecanismos internos das pistolas de *Stud Welding* para entender suas características e padrões. Em seguida, esses movimentos são classificados de forma detalhada. Essas etapas são ligadas pela atividade de esquematizar, que facilita a organização e a visualização das informações obtidas, permitindo uma compreensão clara dos aspectos fundamentais do movimento antes de avançar para a análise das estruturas que os produzem.

Em seguida, no nível analisar, o foco se desloca para compreender as estruturas responsáveis por gerar esses movimentos. Para isso, realiza-se a coleta de informações mais detalhadas sobre os componentes internos, seguida da descrição de suas funções e interações. Essas etapas são integradas pela atividade de observar, que possibilita identificar relações específicas entre os componentes e os movimentos observados, preparando o terreno para uma avaliação dos efeitos produzidos por cada estrutura.

Por fim, no nível avaliar, busca-se definir parâmetros experimentais para o processo de soldagem e analisar os efeitos desses parâmetros sobre a qualidade dos resultados. As etapas dessa fase são conectadas pela atividade de experimentar, que permite testar hipóteses e validar os critérios estabelecidos com base em dados experimentais e análises objetivas.

A organização deste documento segue uma ordem lógica e progressiva, iniciando com a fundamentação teórica, passando pela descrição dos equipamentos e métodos, até a apresentação dos resultados e as conclusões finais. Essa abordagem permite um entendimento gradual da presente pesquisa, assegurando que cada capítulo contribua de forma clara para o alcance dos objetivos propostos.

O capítulo, Fundamentação Teórica, é dividido em duas partes. Inicialmente, apresenta um contexto histórico que situa a evolução do *Stud Welding* e suas aplicações. Em seguida, aborda os parâmetros do processo, destacando variáveis críticas para a qualidade da soldagem. Ao final dessa seção, é apresentado um ponto essencial: uma das escassas referências existentes sobre a velocidade de avanço (*Advance Rate*) no processo, fornecendo uma base teórica indispensável para as análises subsequentes. Além disso, este capítulo inclui um detalhamento das peças que compõem os principais mecanismos estudados. Embora essa parte possa parecer parte dos resultados, sua inclusão aqui se justifica por tratar-se de uma abordagem teórica dos componentes, suas relações e aplicabilidades no contexto do *Stud Welding*.

O capítulo, Equipamentos e Métodos, também é organizado em duas partes. A primeira descreve os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, estabelecendo um entendimento claro dos recursos empregados. A segunda parte detalha os métodos adotados para alcançar os objetivos específicos, proporcionando transparência quanto às técnicas analíticas e experimentais aplicadas durante a investigação. Essa seção assegura que o leitor compreenda plenamente as bases práticas sobre as quais os resultados foram obtidos.

O capítulo de Resultados segue uma estrutura precisa, dedicada aos cinco mecanismos analisados individualmente. Cada mecanismo possui um segmento próprio, dividido em três seções específicas: a primeira se dedica a descrever o mecanismo e suas partes constituintes, oferecendo uma visão clara de sua configuração. A segunda seção analisa os movimentos inerentes a cada tipo de mecanismo, correlacionando-os com o processo de *Stud Welding*. Por fim, a terceira seção explora os efeitos produzidos pela variação da velocidade em cada sistema, utilizando análises comparativas para avaliar como essas mudanças influenciam a qualidade da soldagem. Essa organização facilita a compreensão das diferenças entre os mecanismos e a influência das variáveis operacionais.

O trabalho se encerra com o capítulo de Conclusões, onde são sintetizadas as descobertas principais, ressaltando a importância dos parâmetros estudados para a otimização do processo de *Stud Welding*. Essa seção busca não apenas responder aos objetivos específicos, mas também sugerir direções para pesquisas futuras com base nos resultados alcançados.

Essa estrutura organizada e detalhada assegura que cada parte do trabalho contribua de forma coesa para a caracterização dos sistemas internos das pistolas de *Stud Welding*, permitindo uma análise profunda tanto dos movimentos quanto dos efeitos dos parâmetros operacionais.

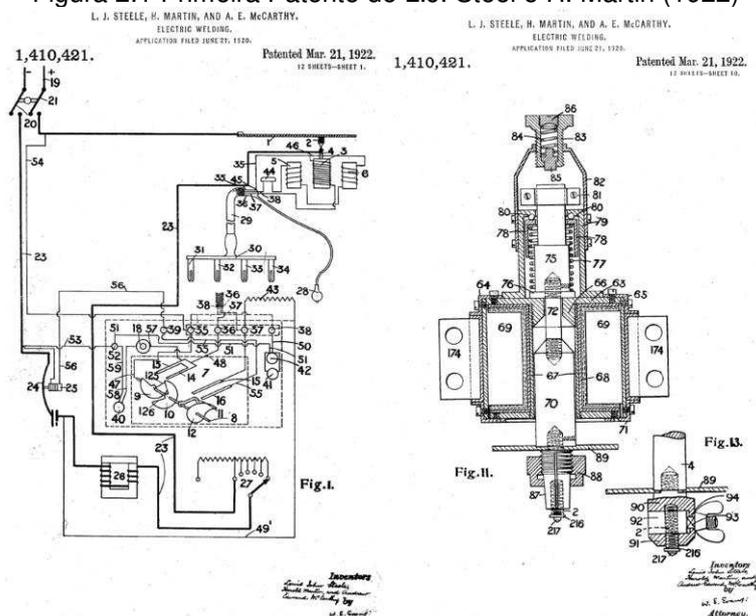
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inegavelmente, o processo de soldagem de pinos está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento industrial e militar do século XX. A técnica de soldagem de pinos, também conhecida como *Stud Welding*, surgiu como uma solução para a união automatizada de pinos a peças de trabalho por soldagem a arco, eliminando a necessidade de processos como perfuração ou rosqueamento.

### 2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO PROCESSO

Em conformidade com a bibliografia, o uso inicial de uma técnica para soldagem de pinos remonta ao ano de 1918 no estaleiro "*H.M. Shipyard*" em *Portsmouth*, onde um dispositivo de soldagem leve equipado com uma bobina eletromagnética foi utilizado para levantar os pinos inseridos. Durante esse período, L.J. Steel e H. Martin patentaram equipamentos automáticos, conforme mostrado na Figura 2.1, que soldavam pinos em placas de aço com razoável sucesso. Esta patente foi concedida em 1922 (NSW Nippon Stud Welding Co, 2024).

Figura 2.1 Primeira Patente de L.J. Steel e H. Martin (1922)

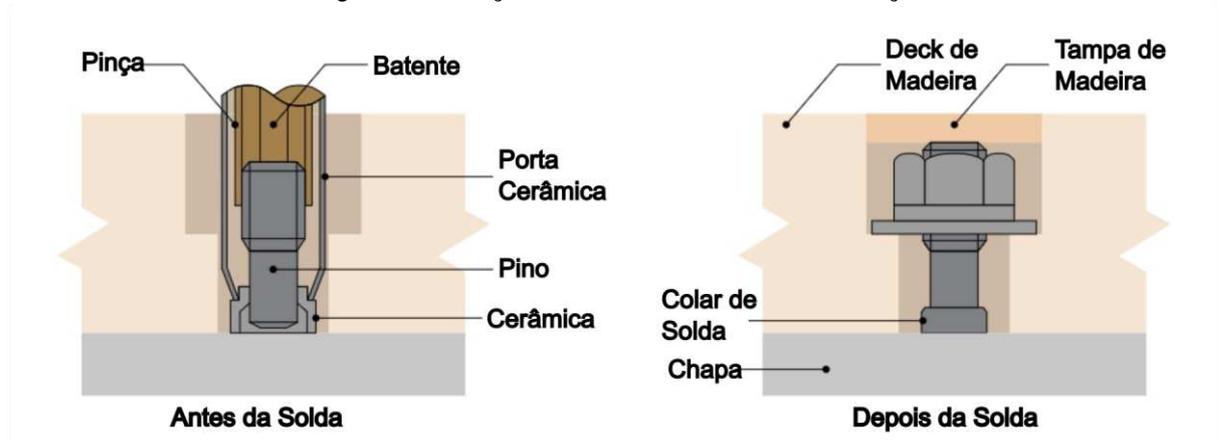


Fonte: adaptado de (Steele; Martin; Mccarthy, 1922)

Assim, na década de 1930, o *New York Navy Yard* começou a utilizar e desenvolver a soldagem de pinos para fixar madeira em aço por meio de um arranjo simples, mostrado na Figura 2.2, técnica que se mostrou vital para o esforço de guerra dos Estados Unidos. Durante esse período, a capacidade naval dos Estados Unidos

era limitada, e muitos de seus navios eram antigos e lentos. Diante da crescente atividade alemã na Europa, o país reconheceu a importância estratégica de uma frota naval e mercante moderna (Image Industries Inc., 2024).

Figura 2.2 Fixação de decks de madeira sobre aço

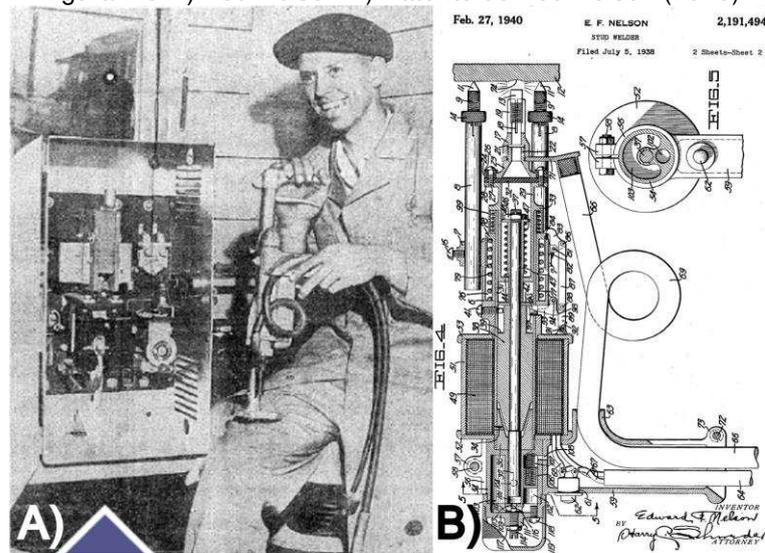


Fonte: adaptado de (NSW Nippon Stud Welding CO, 2024)

Conseqüentemente, em 1936 o Congresso dos Estados Unidos aprovou a Lei da Marinha Mercante, o que levou aos estaleiros de ambas as costas a começarem a construir novos navios tanto para fins militares quanto mercantes. Esta iniciativa lançou as bases para o monumental esforço de construir a frota naval dos Estados Unidos, que foi acelerado a partir de dezembro de 1941 (Kapler; Nowacki; Sajek, 2019).

Não obstante, a verdadeira adoção industrial da soldagem de pinos por arco ocorreu em 1939 no Arsenal Naval dos Estados Unidos, onde T. Nelson (Figura 2.3a) patenteou a pistola que mudaria o curso da guerra (Figura 2.3b) aplicando essa técnica para fixar *decks* de madeira em chapas metálicas de porta-aviões por meio da soldagem de barras redondas de metal ou pinos roscados (Figura 2.2). Desde então, a Gregory Industries Ltd. (agora Nelson *Stud Welding* Ltd.) conduziu pesquisas e desenvolvimentos que levaram a um rápido progresso na técnica (Stanley, 2022).

Figura 2.3 A) Ted Nelson B) Patente do Ted Nelson (1940)



Fonte: adaptado de (Nelson, 1940)

Certamente, a soldagem de pinos desempenhou um papel integral na construção de navios de guerra durante este período. As uniões soldadas por pinos eram duráveis e, ao eliminar a necessidade de peças sobrepostas, reduziam o peso total do navio, tornando-o mais leve, rápido e manobrável. No interior do navio, os pinos soldados foram usados para fixar paredes, pisos, tetos, escotilhas, cozinhas, banheiros e centenas de outros componentes de forma segura às estruturas do navio (Stanley, 2022).

Em síntese, durante a Segunda Guerra Mundial, mais de 5.000 navios construídos com soldagem de pinos transportaram milhões de passageiros e toneladas de carga para mais de 325 portos internacionais entre 1941 e 1945. O processo também ofereceu a capacidade de realizar essas atividades de reparo em alto mar. Com tudo o que foi mencionado acima, estima-se que a Marinha dos EUA conseguiu economizar cerca de 50 milhões de horas-homem necessárias para essas atividades (Trillmich; Welz, 2016). Esta técnica consolidou-se como uma inovação vital na indústria naval e de fabricação do século XX, demonstrando sua eficácia e versatilidade, diversificando suas aplicações (Chambers, 2001).

Já na indústria automotiva, com o crescimento da demanda por veículos mais leves e a necessidade de aumentar a eficiência nas linhas de montagem, a soldagem de pinos foi gradualmente incorporada ao setor automotivo a partir da segunda metade do século XX. Sua principal vantagem residia na capacidade de unir suportes, guias, cliques e componentes elétricos diretamente à carroceria ou ao chassi do veículo, sem perfurações e com alto grau de automatização. O processo passou a ser

empregado na fixação de sistemas de escapamento, escudos térmicos, módulos eletrônicos, isolamentos acústicos e térmicos, além de suportes para sistemas de iluminação e chicotes elétricos (Norfas, 2020).

Três variantes principais do processo se destacam na indústria automotiva, cada uma adaptada a diferentes condições de aplicação. A soldagem por descarga capacitiva é amplamente utilizada para fixação em chapas metálicas finas, comuns nas carrocerias, pois permite uma união rápida e com mínima deformação térmica. Já a soldagem por arco retraído empregada em componentes de maior diâmetro e estruturas que exigem maior resistência, como suportes estruturais ou pontos de ancoragem. Por fim, a soldagem de ciclo curto (*short cycle*) combina características de ambos os processos, sendo usada em ambientes industriais de alta velocidade onde o tempo de soldagem precisa ser reduzido sem comprometer a qualidade da junta (Stanley, 2022)

A evolução tecnológica da soldagem de pinos acompanhou o avanço da automação industrial. O processo foi integrado a células robotizadas com controle adaptativo, sensores de posicionamento, medição de força e monitoramento da qualidade em tempo real. Essa integração garantiu maior repetitividade, rastreabilidade e redução de falhas nas linhas de produção. Com a chegada dos veículos elétricos e híbridos, a aplicação da soldagem de pinos se expandiu ainda mais, incluindo fixação de elementos de baterias, conexões de aterramento e componentes eletrônicos sensíveis, onde a integridade elétrica e térmica da junta é crítica (Taylor Stud Welding, 2025)

Assim, a soldagem de pinos permanece como uma tecnologia central na fabricação de automóveis modernos, tanto por sua eficiência operacional quanto por sua adaptabilidade a novos materiais e arquiteturas veiculares. Em um cenário de crescente complexidade tecnológica e busca por maior sustentabilidade nos processos produtivos, sua importância tende a se manter e crescer.

## 2.2 INTRODUÇÃO AO ARCO RETRAÍDO (AR)

O *Stud Welding* por arco retraído é um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico para unir um pino a uma superfície base. A característica distintiva deste processo é a formação do arco elétrico ao retraindo o pino e, em seguida, pressioná-lo contra a superfície base fundida, permitindo a soldagem de pinos com grandes

diâmetros e em diversos materiais (Nishikawa, 2003) uma representação geral do processo é mostrado na Figura 2.4.



## 2.2.2 Fundamentos do *Stud Welding* por Arco Retraído

O processo de *Stud Welding* por arco retraído (AR) começa com o pino sustentado por uma pistola de soldagem especial que é colocado em contato com a superfície da peça de trabalho, que deve estar limpa e livre de contaminantes.

Uma vez em posição, um arco elétrico é iniciado ao retraindo ligeiramente o pino da superfície após o circuito começar a aplicar a corrente. Este arco, gerado pela fonte de energia do equipamento de soldagem, funde tanto a extremidade do pino quanto uma pequena área da superfície base. A pistola de soldagem não só sustenta o pino, mas também controla seu movimento durante o processo.

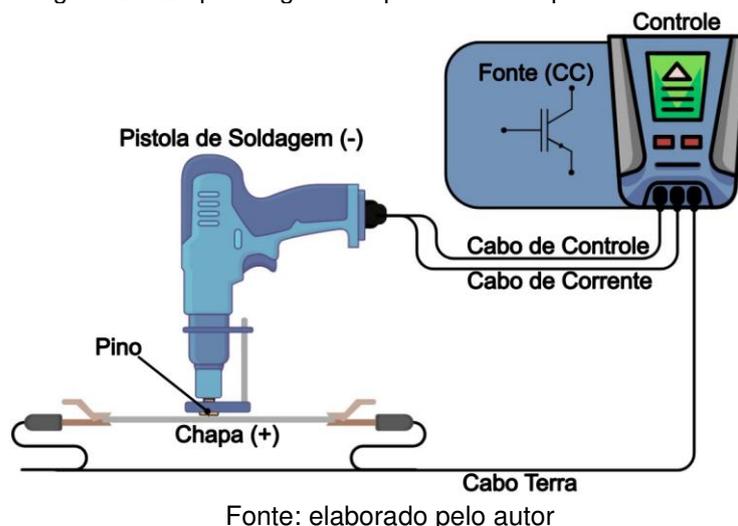
Com o material fundido, o pino é pressionado na poça de metal fundido. Este movimento é controlado por um pistão dentro da pistola de soldagem, garantindo a imersão da extremidade fundida do pino na poça de fusão.

Uma vez que o pino está no lugar, a corrente de soldagem é cortada, permitindo que o metal fundido se solidifique rapidamente. Este processo de solidificação forma a união final entre o pino e a superfície base. Os sistemas de controle na fonte de energia e na pistola de soldagem asseguram que todos estes passos sejam realizados na sequência adequada (Weman, 2012).

## 2.2.3 Componentes Principais (AR)

Os principais componentes do processo de *Stud Welding* por arco retraído são mostrados na Figura 2.5 e incluem (Nishikawa, 2003):

Figura 2.5 Esquema geral do processo SW por arco retraído



- Fonte de Energia: Proporciona a corrente elétrica necessária para gerar o arco, regulam a corrente, o tempo de soldagem e a sequência do processo.
- Pistola de Soldagem: Sustenta o pino, controla seu movimento e maneja o processo de retração e inserção.

## 2.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM (ARCO RETRAÍDO)

### 2.3.1 Corrente de Soldagem (*Welding Current*)

Igual que com outros processos de soldagem, a corrente de soldagem é uma variável crítica no processo de soldagem de pinos. A intensidade da corrente determina a quantidade de calor gerada durante a soldagem, afetando diretamente a fusão entre o pino e o material base. Deve-se ajustar a corrente corretamente para assegurar uma boa penetração sem sobreaquecer o material, evitando defeitos como porosidade ou inclusões de escória. A corrente adequada varia conforme o tipo e diâmetro do pino em uma faixa de 80 até 90 [A] por [mm] seguindo as indicações da norma ISO 14555 (2014b) com as equações (1) e (2), existem autores como Trillmich (2016) que ampliam essa faixa desde 70 até 90 [A]. Portanto, é importante seguir as especificações do procedimento de soldagem (EPS) e realizar ajustes com base em testes preliminares e experiência operacional dado que se tem uma faixa de variação inicial do parâmetro que se deve de ajustar de acordo as condições de trabalho.

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

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

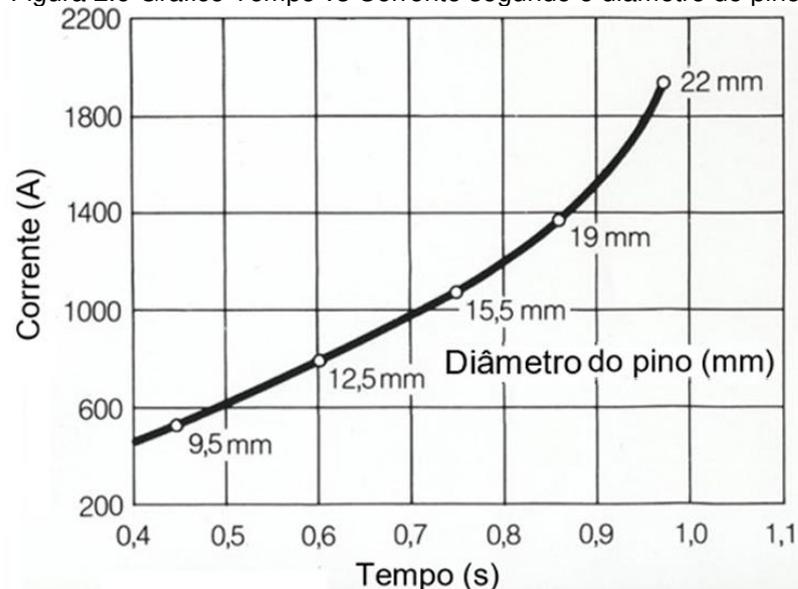
### 2.3.2 Tempo de Soldagem (*Welding Time*)

O tempo de soldagem é o período durante o qual a corrente de soldagem é aplicada. Este parâmetro deve ser controlado, pois um tempo insuficiente pode resultar em uma soldagem fraca, enquanto um tempo excessivo pode causar defeitos como queimaduras e distorção da peça de trabalho. A duração do tempo de soldagem deve ser ajustada de acordo com o tipo de processo de soldagem utilizado e diâmetro do pino, a norma ISO 14555 (2014b) fornece as equações (3) e (4) para a seleção do parâmetro, mas, com variações do processo, o fabricante dos equipamentos pode sugerir valores mais adequados. A otimização do tempo de soldagem é fundamental para obter uma fusão completa e uma soldagem robusta que atenda aos critérios de aceitação especificados na norma. Na Figura 2.6 se mostra um diagrama da relação Corrente vs Tempo segundo o diâmetro do pino.

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

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

Figura 2.6 Gráfico Tempo vs Corrente segundo o diâmetro do pino



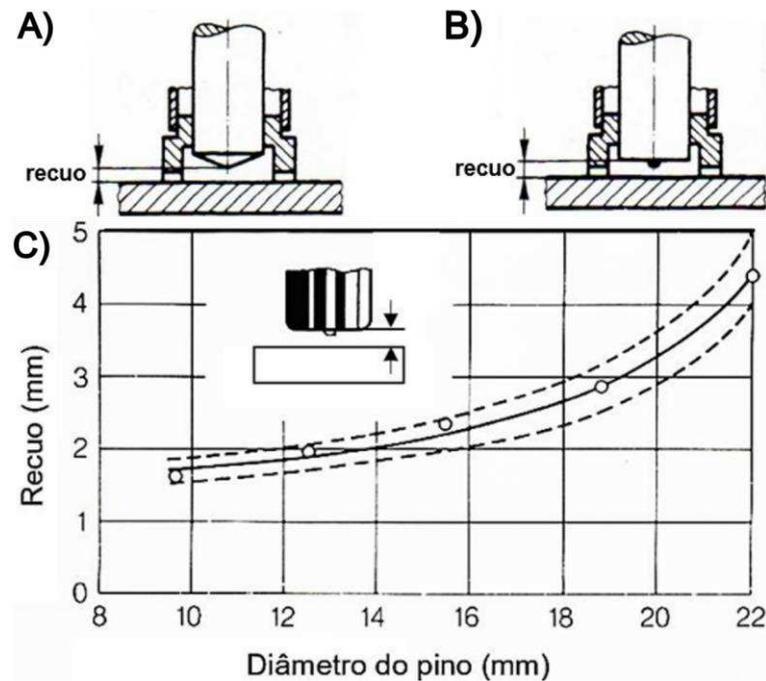
Fonte: adaptado de (Soyer, 2006)

### 2.3.3 Altura de Retração do Pino (*Lift*)

A altura de retração do pino (*Lift*) ou recuo é a distância que o pino se afasta da peça de trabalho no momento de iniciar o arco elétrico como mostrado na Figura 2.7a e Figura 2.7b. Este parâmetro garante o espaço suficiente para a formação do arco e da poça de fusão. O recuo deve ser adequado para o tipo de pino devido a que

influencia diretamente no comprimento do arco e conseqüentemente na potência aplicada pela fonte devido as variações de tensão. Ajustes incorretos podem levar a defeitos na soldagem, como falta de fusão ou respingos excessivos, devido a isso os fabricantes fornecem tabelas do parâmetro sugerido contendo uma faixa aceitável de regulagem (Figura 2.7c).

Figura 2.7 A) Recuo em ponta cônica B) Recuo em ponta com esfera de alumínio C) Gráfico Diâmetro vs Recuo

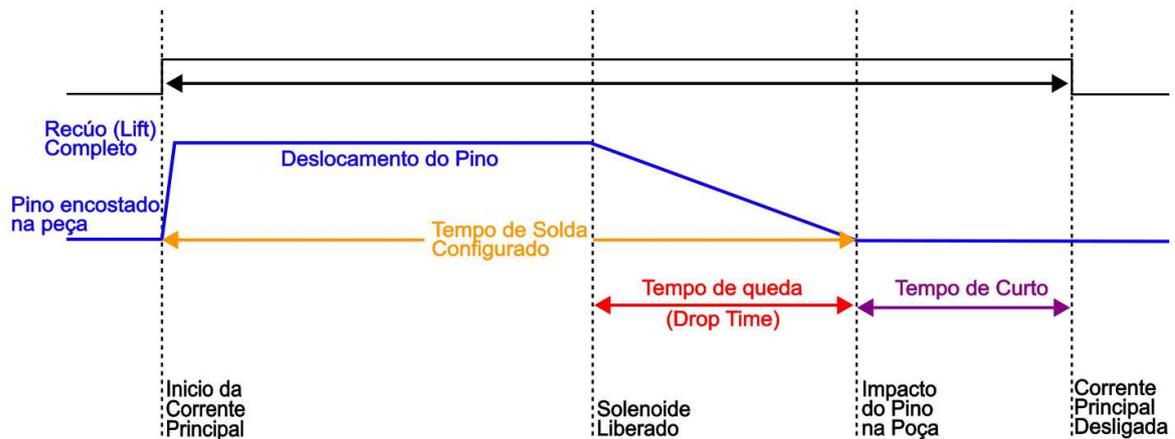


Fonte: Adaptado de (Soyer, 2006)

### 2.3.4 Tempo de queda (*Drop Time*)

O *drop time* é o tempo que o pino de solda leva para descer de sua posição elevada até entrar em contato com a peça de trabalho. Esse parâmetro está diretamente relacionado ao recuo, que é a distância percorrida pelo pino ao ser elevado, já que a velocidade alcançada pela mola do equipamento determina o tempo necessário para percorrer essa distância, lembrando que o tempo de queda é medido sem solda. Nesse contexto, o parâmetro mencionado corresponde ao tempo medido, enquanto o recuo representa a distância percorrida. Algumas marcas utilizam esse parâmetro como referência para configurar um recuo adequado, garantindo um ajuste preciso entre os dois parâmetros e otimizando o processo de soldagem. A Figura 2.8 mostra um diagrama traduzido de um manual da Nelson *Stud Welding*, Inc onde se observa este parâmetro.

Figura 2.8 Diagrama de deslocamento no processo de SW



Fonte: adaptado de (Nelson, 2016)

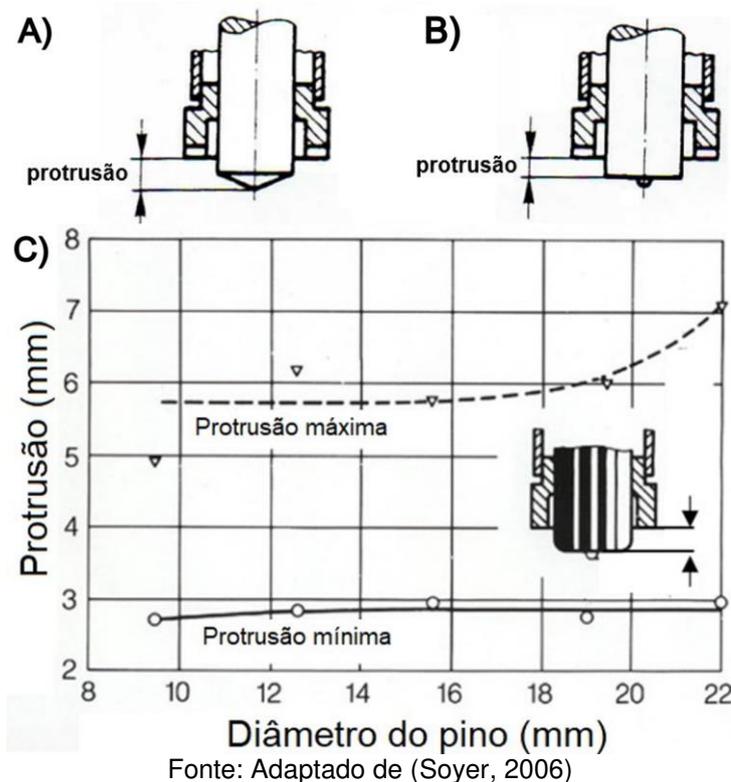
### 2.3.5 Gás Protetor (*Shielding Gas*)

O uso de gás protetor é uma variável relevante no *Stud Welding*, especialmente em processos de maior duração que requerem proteção contra a contaminação do ar, devido ao longo tempo de exposição. O gás protetor, como o argônio ou uma mistura de gases incluindo CO<sub>2</sub>, é utilizado para proteger o local de soldagem do oxigênio e outros contaminantes que podem afetar a qualidade da solda. O uso adequado do gás protetor minimiza a porosidade e outros defeitos relacionados com a contaminação atmosférica.

### 2.3.6 Protrusão (*Protrusion*)

A protrusão é a distância entre a ponta do pino e a superfície de suporte da pistola de soldagem antes de iniciar o processo como mostrado na Figura 2.9a e a Figura 2.9b. Este parâmetro garante quanto o pino vai mergulhar na hora de apagar o arco e inserir o mesmo na poça de fusão. Uma protrusão correta ajuda a evitar defeitos como falta de fusão ou perda de espessura do pino por colar estreito, para dito parâmetro também existem gráficos para a sua correta regulagem (Figura 2.9c).

Figura 2.9 A) Protrusão em ponta cônica, B) Protrusão em ponta com esfera de alumínio C) Gráfico Diâmetro vs Protrusão



### 2.3.7 Amortecimento (*Damper*)

O amortecimento refere-se à resistência aplicada pelo equipamento de soldagem para controlar a velocidade de imersão do pino no material fundido após o arco se apagar. Este parâmetro garante uma fusão uniforme e uma distribuição adequada do material fundido. Um controle adequado do amortecimento evita que o pino seja introduzido muito rápido ou muito devagar, o que poderia causar defeitos como porosidade, falta de fusão ou perda do material que forma o colar.

O amortecimento deve ser ajustado de acordo com o tipo de equipamento de soldagem e as especificações do fabricante. O objetivo é obter uma velocidade de imersão controlada que garanta uma fusão adequada sem causar defeitos. A configuração do amortecimento pode variar significativamente entre diferentes equipamentos e aplicações.

Os parágrafos anteriores fornecem uma visão detalhada de cada uma das variáveis de soldagem para o processo de *Stud Welding* por arco retraído mencionadas na ISO 14555 (2014b), destacando as considerações-chave para o ajuste e controle do processo, um bom resumo de parâmetros gerais no processo é a tabela fornecida pela Soyer (2013) apresentada na Figura 2.10

Figura 2.10 Parâmetros Gerais do processo de Arco Retraído

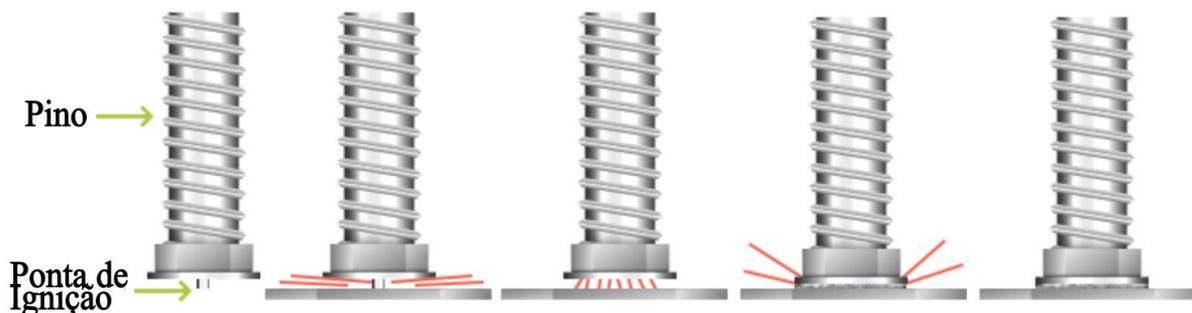
		Para pinos de acordo com a norma DIN EN ISO 13918									
		6		8		10		12		14	
		~2.5	~3	~2.7	~3.5	~2.8	~4	~3	~4.2	~3.2	~4.5
		~1.5	~1	~1.6	~1.2	~2	~1.3	~2.3	~1.5	~2.6	~1.8
 Tempo =ms		~ 120		~ 200		~ 250		~ 350		--	
		~ 200		~ 250		~ 350		~ 500		~ 600	
 Corrente =A		~ 450		~ 550		~ 800		~ 1000		--	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

Fonte: Adaptado de (Soyer, 2006).

## 2.4 INTRODUÇÃO A DESCARGA CAPACITIVA (DC)

A soldagem de pinos por descarga capacitiva (DC) é um processo de soldagem que utiliza a descarga rápida de energia armazenada em um banco de capacitores para unir um pino a uma superfície base (Figura 2.11). Este processo consiste em carregar um banco de capacitores a uma alta voltagem e depois descarregar essa energia através do pino, que possui uma pequena protuberância na base para iniciar o arco, essa pequena protuberância é denominada ponta de ignição. A duração do arco é curta quando comparado com outros processos de *Stud Welding*, minimizando a dispersão do calor. A característica principal deste processo é justamente o tempo de arco, de apenas alguns milissegundos, permitindo a soldagem em superfícies finas sem afetar o material circundante ou a superfície tratada ou acabada no lado oposto da chapa (Oh; Lee; Yoo, 2007).

Figura 2.11 Visão geral do processo SW por descarga capacitiva



Fonte: adaptado de (Peter Germanese, 2023)

#### **2.4.2 Fundamentos do *Stud Welding* por Descarga Capacitiva**

O processo de soldagem de pinos por descarga capacitiva começa com o pino, projetado com uma ponta de ignição na base para facilitar a ignição do arco, dito pino é colocado em uma pistola de soldagem projetada para o processo. A superfície base deve estar limpa e livre de contaminantes para garantir a união (Nishikawa, 2003).

A pistola de soldagem está conectada a um sistema de capacitores que é carregado com uma tensão de até 200 V na maioria dos sistemas comerciais de fontes (Existindo alguns com uma faixa de carga dos capacitores de até 220 V correspondentes a tensão de alimentação da fonte). Quando o gatilho da pistola é ativado, a energia armazenada nos capacitores é descarregada rapidamente através do pino, evaporando a ponta de ignição e criando um arco elétrico de curta duração no espaço da ponta. Este arco, que dura apenas alguns milissegundos, funde tanto a extremidade do pino quanto uma pequena área da superfície base criando a poça de fusão (Magda; Burca; Lego, 2018).

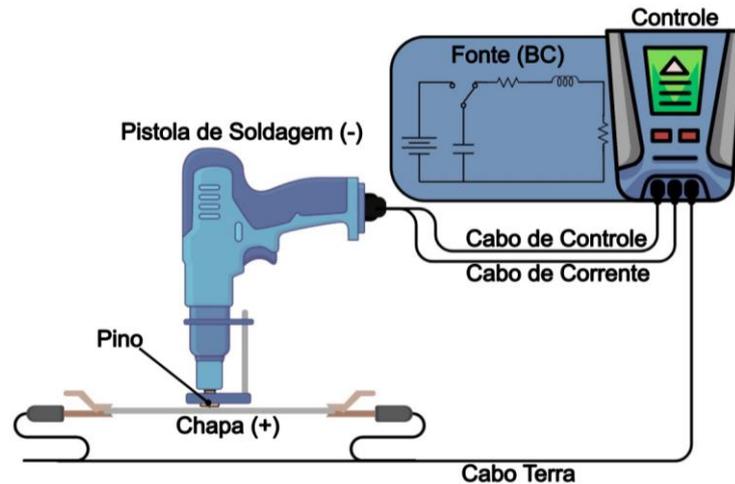
A pistola de soldagem controla o processo de ignição e descarga, garantindo que a energia seja liberada de forma precisa e uniforme. Uma vez que o material está fundido, o pino é pressionado para contra a poça de fusão na peça de trabalho, formando a união. Dado que a duração do arco é curta em comparação com o processo de arco retraído, minimiza-se a dispersão de calor, permitindo a soldagem em superfícies finas de até 1/10 do diâmetro do pino sem danificar o material circundante ou a superfície tratada ou acabada no lado oposto da chapa (Oh; Lee; Yoo, 2007).

Apesar de ser amplamente empregada para a fixação de pinos em chapas finas, a soldagem por descarga capacitiva apresenta limitações técnicas significativas quando aplicada em chapas grossas. Isso ocorre devido ao curto tempo de descarga e à baixa energia térmica disponível no processo, o que resulta em fusão superficial insuficiente da base metálica. Em materiais com elevada massa térmica, como chapas espessas, a dissipação rápida do calor impede a formação adequada da poça de fusão, comprometendo a integridade da união. Dessa forma, o processo não garante penetração satisfatória nem resistência mecânica adequada, tornando-se inadequado para aplicações estruturais em substratos de maior espessura e diâmetros de pino de 10 mm aproximadamente.

### 2.4.3 Componentes Principais (DC)

Os principais componentes do processo de soldagem por descarga capacitiva mostrados na Figura 2.12 incluem:

Figura 2.12 Esquema geral do processo SW por descarga capacitiva



Fonte: elaborado pelo autor

- Banco de Capacitores (BC): Fornece a energia armazenada necessária para a descarga rápida.
- Pistola de Soldagem: Sustenta o pino, controla seu movimento e maneja o processo de ignição e descarga.
- Sistemas de Controle: Regulam a carga do capacitor, o tempo de soldagem e a sequência do processo.

## 2.5 PARÂMETROS DE SOLDAGEM (DESCARGA CAPACITIVA)

### 2.5.1 Tensão de carga

A tensão de carga é a tensão à qual o capacitor é carregado antes da soldagem. Uma tensão maior aumenta a energia disponível para a soldagem, o que garante a fusão do pino com a peça de trabalho. A tensão deve ser ajustada de acordo com a energia necessária para determinado diâmetro de pino, conforme a capacitância, visto que é um parâmetro intrínseco da fonte. A partir disso, calcula-se a tensão que deve ser usada, partindo da fórmula (5), onde  $C$  é a capacitância e  $U$  é a tensão de carga, dita fórmula é encontrada na norma ISO 14555 (2014a). A capacitância é um parâmetro fixo da fonte e é projetada para garantir que haja energia suficiente para uma soldagem eficaz sem exceder as capacidades do sistema.

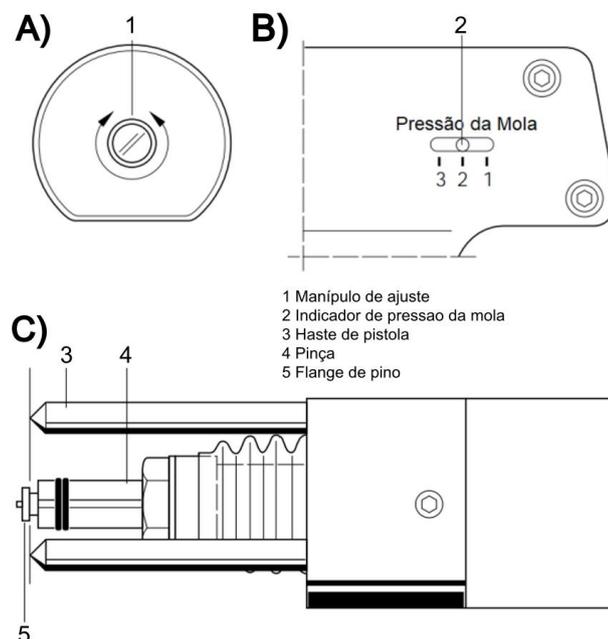
$$E = 0,5 \times C \times U^2 \quad \dots (5)$$

Por outro lado, para uso rápido do processo, pode-se seguir as recomendações do fabricante do equipamento de soldagem, onde faixas de tensões de carga recomendadas são tabeladas de acordo com o diâmetro do pino (Oh; Lee; Yoo, 2007).

### 2.5.2 Pressão da mola

A pressão da mola controla a força com que o pino é empurrado contra a peça de trabalho após a descarga do arco. É essencial que essa pressão seja adequada para garantir que o pino penetre no material fundido a uma velocidade controlada, o que é fundamental para evitar defeitos como falta de fusão ou porosidade. A pressão da mola é ajustada de acordo com as especificações do fabricante do equipamento e a aplicação específica, a forma de regular é mostrado na Figura 2.13a e na Figura 2.13b, dita regulagem opera em conjunto com uma protrusão fixa sempre apresentada na Figura 2.13c.

Figura 2.13 A) Manipulo de ajuste B) Indicador de compressão na mola C) Esquema da protrusão fixa



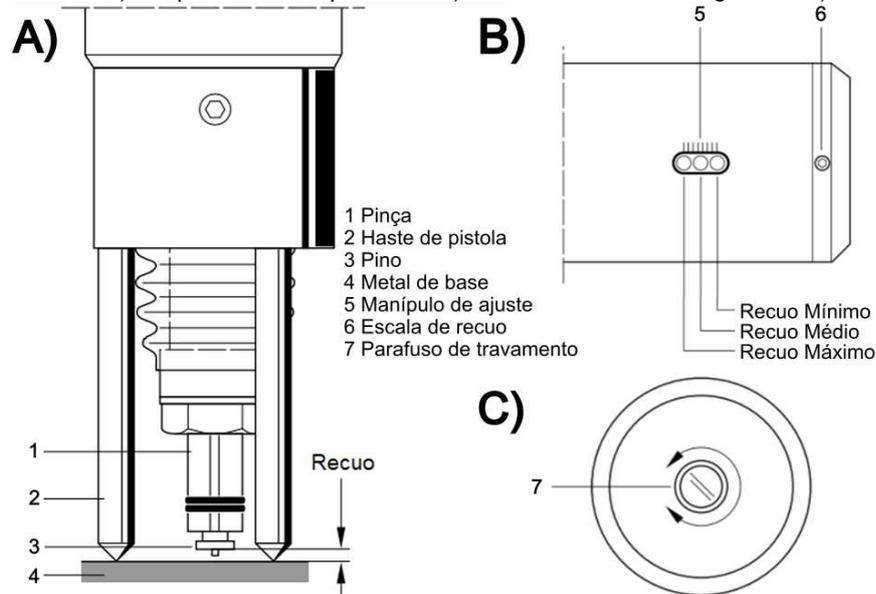
Fonte: Adaptado de (Soyer, 1995)

### 2.5.3 Espaçamento (Gap)

O Gap é a distância inicial entre a ponta do pino e a superfície da chapa antes de iniciar a descida na descarga capacitiva (Figura 2.14a). Este parâmetro ajuda a estabelecer um arco partindo de uma velocidade inicial e não do repouso como no processo de descarga capacitiva com contato. Um Gap adequado garante que o pino

atinja a velocidade suficiente para a soldagem, permitindo uma fusão uniforme. O Gap deve ser ajustado conforme a aplicação para evitar problemas de qualidade na soldagem, o ajuste é mostrado na Figura 2.14a e Figura 2.14b.

Figura 2.14 A) Esquema do Gap na DC B) Indicador de GAP regulado C) Manipulo



Fonte: Adaptado de (Soyer, 1995)

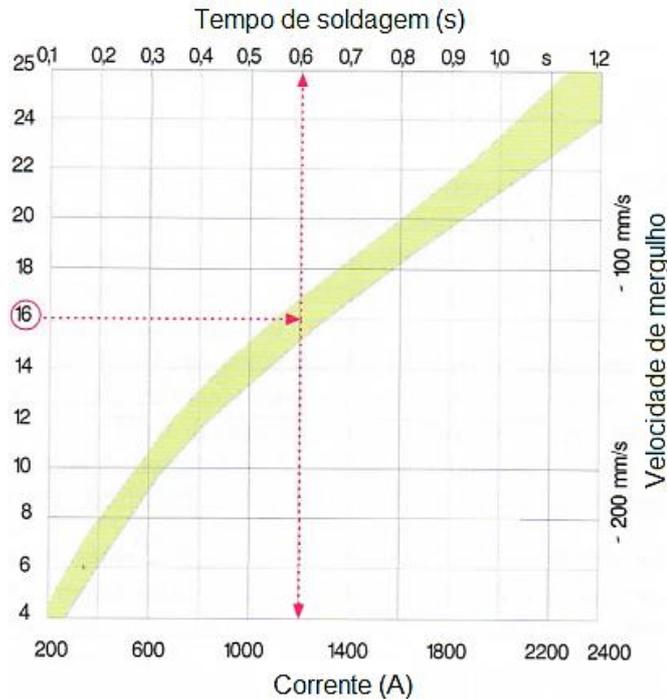
## 2.6 VELOCIDADE NO *STUD WELDING*

### 2.6.1 Velocidade do Pino no Arco Retraído

Na soldagem de pinos com arco retraído, a velocidade com que o pino se move em direção à poça de fusão após ser levantado é um fator significativo para garantir uma soldagem adequada. Essa velocidade, nomeada como velocidade de avanço (Advance Rate) no contexto do presente trabalho, deve ser controlada para evitar defeitos.

A velocidade de avanço recomendada varia de acordo com o tamanho do pino. Para pinos de até 14 mm de diâmetro, a velocidade sugerida é de aproximadamente 200 mm/s. Esse valor favorece que o pino mergulhe de maneira controlada na poça de fusão até fazer contato com a parte sólida da peça de trabalho, ou seja, o fundo da poça de fusão. Geralmente, as pistolas comerciais de *Stud Welding* são projetadas para operar em uma faixa de velocidade fixa, permitindo trabalhar com limitados diâmetros de pino. A Figura 2.15 não é conclusiva, mas apresenta uma ideia da velocidade no processo (Trillmich; Welz, 2016).

Figura 2.15 Gráfico de relação corrente/tempo/velocidade segundo o diâmetro



Fonte: adaptado de (Trillmich; Welz, 2016)

Porém, para pinos de diâmetro superior a 14 mm, a velocidade de avanço deve ser reduzida para cerca de 100 mm/s, já que uma velocidade mais lenta permite uma imersão mais suave e evita a formação de defeitos ou perda de material. Para atingir essa velocidade reduzida, muitos sistemas de soldagem utilizam amortecedores hidráulicos ou pneumáticos, que moderam a velocidade de avanço do pino, evitando uma imersão rápida na poça de fusão (Trillmich; Welz, 2016).

Para esses pinos de grande diâmetro (Até 24 mm), a solidificação durante a descida é um fator crítico que pode afetar a integridade da união. Durante o processo, o pino deve atingir o mais rápido possível a poça de fusão enquanto o arco ainda está aberto, garantindo que o metal continue fundido. Se o arco se apagar antes ou durante a descida, a poça pode solidificar uma fina película de material antes que o pino faça contato adequadamente, resultando em uma fusão incompleta, o que compromete a resistência da soldagem e favorece a criação de discontinuidades (Trillmich; Welz, 2016).

Para evitar esses problemas, alguns sistemas implementam um controle de velocidade no qual o pistão realiza um movimento rápido até fazer contato com a poça de fusão e, em seguida, reduz a velocidade, controlando assim a perda de material por impacto. Esse método é especialmente importante para pinos de maior diâmetro, pois, ao contrário dos pinos menores de 14 mm, a inserção é limitada pela

profundidade da protrusão, evitando o contato com o fundo sólido e reduzindo a possibilidade de perda de material.

Em uma parte dos sistemas atuais, a velocidade de avanço pode ser controlada eletronicamente, permitindo ajustes precisos em tempo real conforme as condições do processo. Essa tecnologia melhora a repetitividade e a consistência da soldagem, adaptando-se automaticamente às variações nos parâmetros do processo, eliminando a necessidade de ajustes mecânicos constantes.

### **2.6.2 Velocidade do Pino na Descarga Capacitiva**

Na soldagem de pinos por descarga capacitiva, a velocidade do processo está diretamente relacionada com a rapidez da descarga de energia armazenada nos condensadores, que funde o pino com a peça de trabalho o que mostra que tem uma relação direta entre a velocidade e o tempo de arco. Esse processo é extremamente rápido, com tempos de descarga que normalmente variam entre 0,6 e 4,5 milissegundos, permitindo uma fusão quase instantânea do pino com o material base o que conduz a utilizar velocidades maiores em comparação com o processo de arco retraído (Trillmich; Welz, 2016).

A velocidade de avanço nesse tipo de soldagem é controlada diretamente pela compressão da mola. Além disso, esse processo utiliza molas maiores devido à rapidez do procedimento, exigindo maior velocidade para levar o pino até a poça de fusão antes da solidificação. Diferente do processo de arco retraído, projetado para operar com uma velocidade fixa mesmo com variação de recuo, estes dispositivos conseguem ajustar a velocidade adicionando uma pré-carga ou variando minimamente o recuo. Outro fator importante é o uso de uma protrusão fixa de cerca de 5 mm, mantendo o controle da velocidade baseado exclusivamente no recuo ou pré-carga da mola.

Na soldagem por descarga capacitiva com contato, a velocidade de avanço recomendada para garantir uma fusão adequada deve ser superior a 400 mm/s, idealmente entre 500 e 700 mm/s, o que assegura que o pino interaja corretamente com o metal fundido sem problemas de solidificação prematura. Se a velocidade ultrapassar 700 mm/s, a poça de fusão pode solidificar muito rapidamente ou ocorrer um rebote durante essa fase, comprometendo a qualidade da união (Trillmich; Welz, 2016).

Na soldagem por descarga capacitiva com gap, o pino é levemente levantado antes da descarga, o que oferece mais espaço de percurso o que permite que a velocidade de avanço seja atingida com molas menores em comparação com a soldagem por contato. A velocidade de avanço ideal permanece entre 500 e 700 mm/s para garantir que o pino feche o gap a tempo e consiga se unir adequadamente com o metal fundido. No entanto, se a velocidade for muito baixa, abaixo de 450 mm/s, o pino pode não alcançar a poça de fusão antes da solidificação, resultando em falta de fusão. Em velocidades superiores a 800 mm/s, o pino pode impactar rapidamente, desligando o arco e reduzindo a entrada de energia, além de causar respingos ou solidificação prematura antes da fusão completa do pino com a superfície. Além do supracitado o processo com *GAP* pode ser mais sensível a perdas de velocidade por atritos internos no mecanismo (Trillmich; Welz, 2016).

Esse processo é ideal para trabalhar com materiais finos ou sensíveis ao calor, pois a rapidez minimiza a entrada de calor na peça de trabalho, evitando deformações e danos. A alta velocidade controlada proporciona maior eficiência em produção em série, onde a redução do tempo de ciclo é crucial sem comprometer a qualidade da soldagem.

## 2.7 MECANISMOS APLICADOS A *STUD WELDING*

### 2.7.1 Atuadores

No contexto do *Stud Welding*, os atuadores mecânicos são dispositivos que convertem energia (seja elétrica, pneumática, hidráulica ou de outra forma) em movimento mecânico. Esses atuadores são utilizados para realizar tarefas específicas, como mover o pino para cima ou para baixo durante as fases de elevação (*lift*) e imersão (*plunge*), controlando a posição do pino.

#### 2.7.1.1 Molas

As molas de compressão funcionam armazenando energia quando são comprimidas e liberando-a ao retornar à sua forma original. Para projetá-las, é necessário considerar vários aspectos:

- Material: O material influencia a resistência e a durabilidade da mola.
- Diâmetro do Arame: Afeta a rigidez da mola. Um arame mais grosso torna a mola mais rígida, enquanto um arame mais fino aumenta a flexibilidade.

- Número de Espiras: Determina a flexibilidade da mola. Mais espiras resultam em maior flexibilidade.
- Comprimento Livre: Refere-se ao comprimento da mola sem carga, garantindo que ela se encaixe corretamente no espaço disponível.
- Rigidez (Constante da Mola): Relaciona a força necessária para comprimir a mola até um determinado deslocamento, influenciada pelo material, diâmetro do arame e número de espiras.
- Resistência à Fadiga: É crucial para evitar falhas prematuras, especialmente em aplicações com ciclos repetidos de compressão.

Esses fatores devem ser equilibrados para assegurar que a mola funcione adequadamente dentro do espaço disponível e atenda às especificações da aplicação.

Na soldagem de pinos, as molas desempenham a função principal no movimento do pino durante o processo de soldagem, principalmente no descenso e na imersão. As molas são implementadas para aplicar uma velocidade baseada em uma força controlada, que movimenta o pino em direção à peça de trabalho uma vez que o arco tenha fundido ambos os materiais, garantindo que o pino se insira corretamente na poça de fusão.

Sobre a relação da velocidade com a força. Ao finalizar o tempo de soldagem no caso do arco retraído, o dispositivo de elevação (solenoide) é desativado, e a mola comprimida se expande. No caso da descarga capacitiva com contato, essa expansão ocorre quando o arco é aberto e cria o espaço para a descida ao evaporar a ponta de ignição. A velocidade e a força com que o pino é empurrado dependem das características da mola, como sua rigidez e o grau de compressão ao qual foi submetida. Essa relação entre a força calculada da mola e a velocidade é explicada através do movimento harmônico simples, considerando seu estado mais básico, um sistema massa-mola, onde é considerada somente a rigidez da mola de trabalho e a massa do pino. A seguinte análise é baseada no livro vibrações mecânicas (Rao, 2011).

Na fórmula:

$$F = m \cdot a = -k \cdot x \quad \dots (6)$$

Temos que:

$F$  é a força do sistema,  
 $m$  é a massa do pino,  
 $a$  é a aceleração do pino,  
 $k$  é a rigidez da mola,  
 $x$  é a compressão da mola (recuo).

Expressa de outra forma, temos:

$$k \cdot x + m \cdot \ddot{x} = 0 \quad \dots (7)$$

A solução geral para este sistema é:

$$X(t) = A \cdot \cos(\omega t) \quad \dots (8)$$

Onde  $A$  é nosso recuo máximo e  $\omega$  é a frequência natural do sistema, que se obtém pela equação:

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad \dots (9)$$

Finalmente, a velocidade linear do nosso sistema é dada pela equação:

$$X'(t) = -A \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad \dots (10)$$

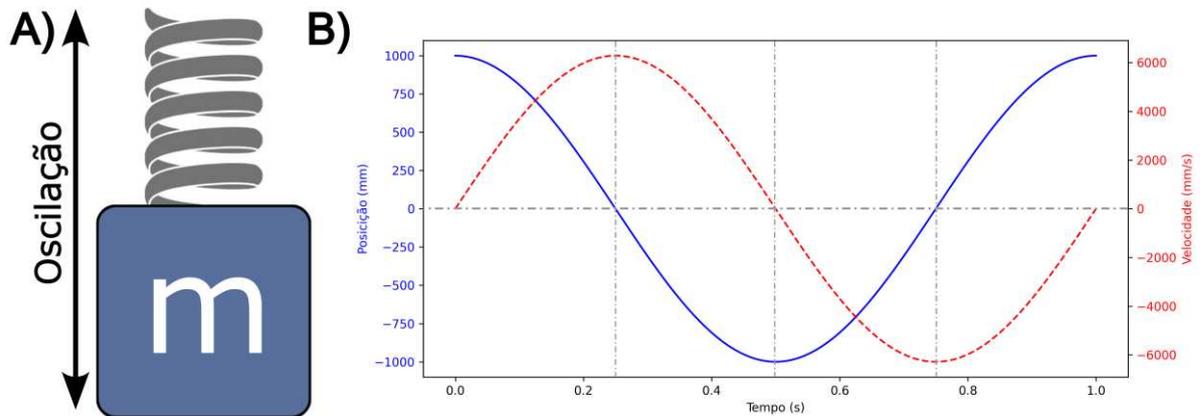
Realizando uma análise simples de otimização, observa-se que, para obter a velocidade máxima do sistema, a função seno deve estar em seu valor máximo, que é '1'. Considerando que o sinal negativo indica apenas a direção do movimento (contra a compressão da mola), a equação de velocidade do nosso sistema fica da seguinte forma:

$$X'(t) = A \cdot \omega \quad \dots (11)$$

A fórmula (11) oferece uma base para calcular e projetar dispositivos de *Stud Welding*. A partir dessa equação e utilizando as velocidades sugeridas pela literatura, é possível obter a rigidez " $k$ " e, a partir dela, dimensionar a mola, considerando que a equação apresentada se refere a um sistema ideal ilustrado na Figura 2.16. Para um sistema real, outros fatores e variáveis devem ser considerados, como o peso da

pinça, o peso do pistão, além da fricção no rolamento. Também é necessário levar em conta as dimensões do espaço disponível para os elementos e as folgas.

Figura 2.16 A) Esquema de sistema massa mola B) Gráfico das funções de posição e velocidade do sistema massa mola

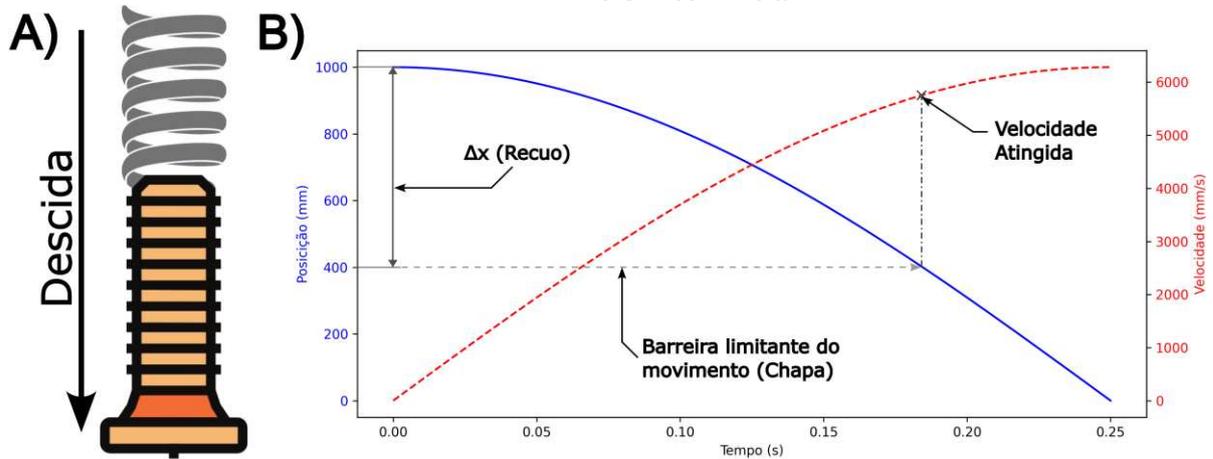


Fonte: elaborado pelo autor

Já no controle de velocidade. E com base no explicado anteriormente, consegue-se inferir que a velocidade de avanço está diretamente relacionada com a quantidade de compressão da mola. No processo de *Stud Welding*, podemos relacionar isso com a quantidade de recuo que o pino terá durante o processo. Em dispositivos projetados para soldar diferentes tipos e tamanhos de pinos, é necessário contar com métodos para restringir a velocidade, proporcionando ao dispositivo uma maior faixa de trabalho.

Devido à natureza de funcionamento das molas, a solução mais eficiente é calcular esse elemento com base na maior carga de trabalho, ou seja, na maior velocidade requerida e conseguir atingi-la no primeiro quarto do ciclo de oscilação. Em seguida, implementar uma barreira física que limite o movimento de recuo, conseguindo assim uma faixa de velocidades de trabalho ajustáveis para cada componente a ser soldado, partindo da restrição do recuo no processo, a explicação é complementada com a Figura 2.17.

Figura 2.17 A) Esquema do sistema massa mola aplicado a SW B) Gráfico do controle na velocidade no SW com mola

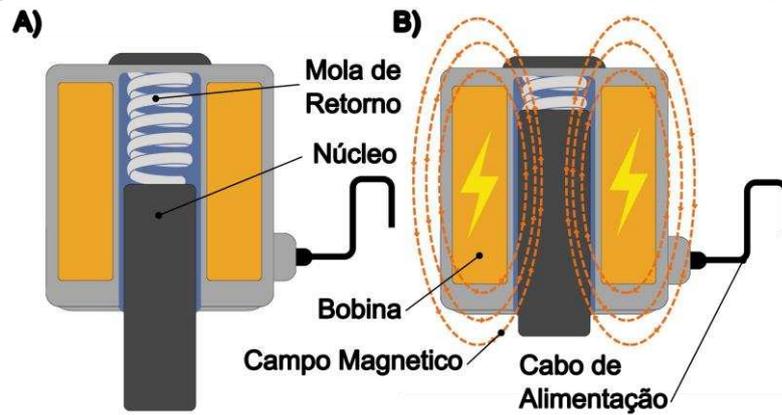


Fonte: elaborado pelo autor

Este tipo de solução se torna ainda mais relevante e eficaz quando o processo é complementado com a implementação de solenoides para direcionar a compressão. Isso ocorre porque o solenoide atuará sobre a mola, comprimindo-a até encontrar um limite físico que restrinja seu movimento. Dessa forma, é possível controlar a velocidade de avanço numa faixa determinada, garantindo a adequação do processo para diferentes pinos e situações de soldagem.

Já como complemento direto da mola nestes sistemas encontra-se o solenoide. Lembrando que, segundo Fitzgerald (2004), um solenoide funciona transformando energia elétrica em energia mecânica por meio do uso de campos magnéticos. Quando uma corrente elétrica passa pela bobina enrolada, gera um campo magnético em seu interior. Esse campo atrai um núcleo móvel de material ferromagnético em direção ao centro da bobina, criando um movimento linear (Figura 2.18). A força e o deslocamento dependem da intensidade da corrente elétrica e do número de espiras do solenoide.

Figura 2.18 Funcionamento básico do solenoide A) Desligado B) Ligado

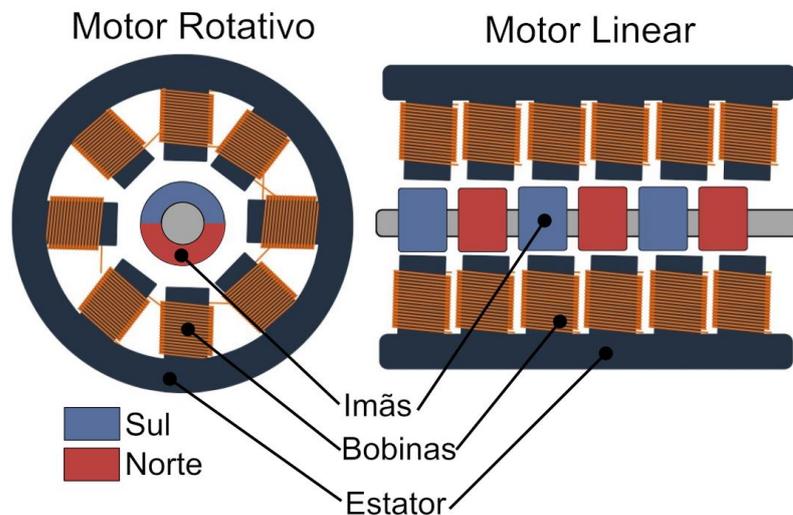


Fonte: elaborado pelo autor

### 2.7.1.2 Motor Linear

Um motor linear é um tipo de motor elétrico que produz movimento em linha reta, em vez de movimento rotativo, como nos motores convencionais. Ele opera sob o mesmo princípio de um motor elétrico rotativo, mas seu design é "desenrolado" para produzir movimento linear (Figura 2.19).

Figura 2.19 Comparação entre motor rotativo e motor linear



Fonte: elaborado pelo autor

Em um motor linear, o estator (parte estacionária) é composto por um conjunto de bobinas através das quais circula corrente elétrica, gerando um campo magnético deslizante ao longo de seu eixo. A parte móvel (ou induzido), geralmente composta por ímãs permanentes ou um condutor, interage com este campo magnético. A corrente induzida no condutor ou a interação direta com os ímãs gera uma força eletromagnética linear que move o componente ao longo do estator. Diferentemente

dos motores rotativos, o deslocamento produzido é diretamente linear, sem a necessidade de mecanismos adicionais para converter uma rotação em linear (Andolz, 2003).

Na soldagem de pinos, os motores lineares podem ser utilizados para controlar com precisão o movimento do pino durante as fases de elevação (reco) e imersão. Devido à sua capacidade de proporcionar movimentos rápidos, precisos e controlados, os motores lineares são adequados para aplicações em que se exige um controle exato da posição e da velocidade do pino, com grande repetitividade, possibilitando realizar um volume significativo de soldagens em linhas de produção.

O motor linear pode ser integrado na pistola de soldagem para substituir sistemas mecânicos tradicionais, como solenoides e molas, oferecendo um controle direto e menos sujeito a desgaste mecânico. Este motor pode ajustar a posição do pino com alta precisão devido às suas configurações e programações em conjunto com seus respectivos drivers de controle, o que é importante em aplicações de alta velocidade ou onde é necessário um controle fino do processo.

Além disso, um motor linear permite mudanças rápidas na configuração do processo sem a necessidade de ajustes mecânicos complexos, podendo variar parâmetros mecânicos e elétricos entre soldagens. Essa característica é especialmente útil em linhas de produção com alimentação automática de pinos, onde se pode variar o tipo e o diâmetro do pino entre soldagens.

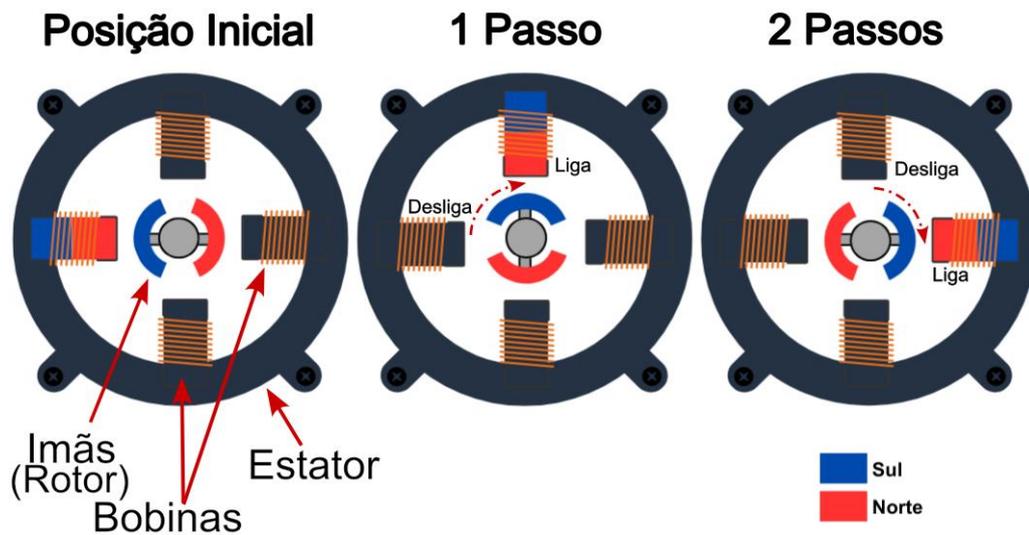
### *2.7.1.3 Motor de Passo*

Na soldagem de pinos, os motores de passos podem ser utilizados para ajustar com precisão a posição do pino, assim como para controlar outros movimentos do sistema, como o ajuste da protrusão ou a altura do reco, de maneira similar aos motores lineares. Basicamente, eles cumprem a mesma função e atendem às mesmas necessidades.

Segundo Fitzgerald (2004), um motor de passos funciona através da excitação sequencial das bobinas eletromagnéticas no estator, gerando campos magnéticos que atraem os polos do rotor de forma controlada. Esse processo permite que o rotor se mova em incrementos discretos (passos) como mostrado na Figura 2.20, garantindo um controle preciso da posição e da velocidade sem a necessidade de sensores externos. A precisão do movimento depende do número de polos do rotor e da configuração das bobinas, permitindo ajustes finos na rotação.

Devido à sua capacidade de se mover em passos muito pequenos e à facilidade de controle por meio de sinais digitais, um motor de passos é facilmente implementado em aplicações que exigem alta repetitividade. Isso os torna uma escolha boa e simples para processos em que o controle da posição e a robustez são necessários.

Figura 2.20 Funcionamento básico de um motor de passos



Fonte: elaborado pelo autor

Nesta aplicação, um motor de passos pode ser utilizado para controlar o recuo e a imersão, assim como um motor linear. No entanto, ao contrário de um motor linear, o motor de passos não gera movimento linear de maneira direta, pois sua operação é baseada em movimento rotativo. Para transformar esse movimento rotativo em linear, é necessário um sistema adicional de transmissão.

O método mais comum para essa conversão é o uso de um sistema de fuso e porca. Nesse sistema, o motor de passos gira o fuso, e a porca, acoplada a ele, se desloca linearmente, realizando os movimentos necessários para o processo. Outros métodos de transmissão, como correias, cremalheiras ou sistemas de pinhão e cremalheira, também podem ser utilizados, dependendo das especificações do equipamento e das necessidades do processo.

Essa flexibilidade no uso de sistemas de transmissão torna os motores de passos uma solução versátil para diversas aplicações, oferecendo a precisão necessária e controle no movimento linear para o *Stud Welding*.

## 2.7.2 Sistemas de Acoplamento

Os sistemas de acoplamento são mecanismos que conectam dois ou mais componentes mecânicos para transmitir movimento, força ou energia entre eles, permitindo que funcionem de maneira sincronizada ou conjunta. No contexto do *Stud Welding*, os sistemas de acoplamento são utilizados para conectar e coordenar diferentes partes do equipamento, como o pistão, o solenoide, garantindo que o movimento do pino seja adequado e controlado durante o processo de soldagem.

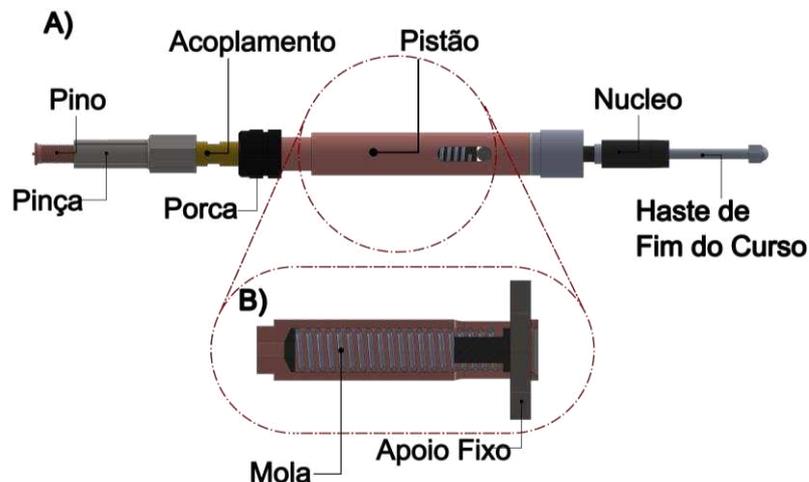
Esses sistemas podem ser rígidos, permitindo uma conexão firme sem movimento relativo entre os componentes, ou flexíveis, absorvendo pequenos desalinhamentos ou variações.

### 2.7.2.1 Pistão Rígido

O mecanismo de pistão rígido (Figura 2.21) na soldagem de pinos é um sistema projetado para controlar o movimento do pino durante o processo de soldagem por meio de um eixo principal, mantendo as peças como um sistema rígido, garantindo que se mantenha uma longitude de arco constante e que o pino desça até a poça de fusão de maneira controlada.

Em sua configuração mais básica apresentada na Figura 2.21, o mecanismo consiste em um pistão rígido que possui uma pinça em sua extremidade frontal, a qual prende o pino. Na extremidade traseira do pistão, encontra-se o núcleo que faz parte do solenoide que, quando ativado, levanta o pistão (e o pino), afastando-o da superfície de trabalho contra a força da mola de trabalho.

Figura 2.21 Pistão rígido A) esquema geral B) alojamento da mola



Fonte: elaborado pelo autor

A função principal do pistão rígido é garantir que o pino percorra uma distância exata, primeiro ao levantá-lo para formar o arco e, em seguida, ao mergulhá-lo na poça de fusão. Esse controle é alcançado por meio da interação entre o pistão, a mola de trabalho e o solenoide. Em alguns *designs* avançados, o pistão rígido pode estar equipado com um batente ajustável para limitar o levantamento, permitindo manter o controle do processo mesmo quando há variações nas condições da superfície de trabalho, na longitude ou no diâmetro do pino.

A relação entre o curso total do pistão, o levantamento e a protrusão do pino são expressos na fórmula (12).

Na fórmula:

$$S = L + P \quad \dots (12)$$

Onde:

S representa a carreira total do pistão,

L é o levantamento do pino, e

P é a protrusão do pino.

Esse tipo de sistema adiciona uma limitação ao processo, pois a protrusão será subtraída da carreira total ao realizar a compressão inicial do processo, limitando, conseqüentemente, a quantidade de recuo disponível no momento da soldagem.

Além disso, um desafio nesses mecanismos é o desgaste por fricção, que pode afetar a precisão do movimento ao longo do tempo. Por essa razão, em alguns sistemas, são implementados mecanismos de compensação de comprimento para contrabalançar qualquer variação devido ao desgaste ou à irregularidade na posição do pistão. Esses mecanismos ajudam a manter a consistência e a precisão do processo de soldagem, mesmo após um uso prolongado.

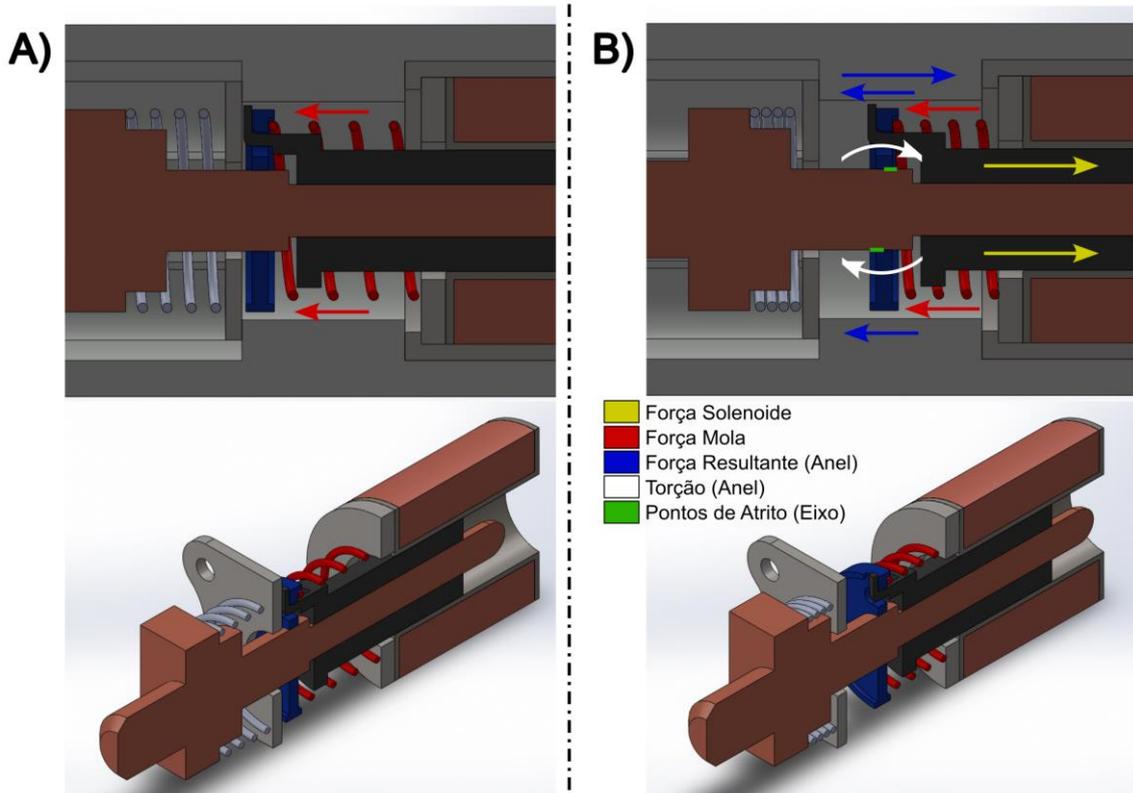
#### 2.7.2.2 *Compensação de recuo*

A compensação de recuo na soldagem de pinos é uma estratégia que ajusta automaticamente a posição do pino em relação ao solenoide para manter uma distância de arco constante, independentemente da protrusão e da pré-carga da mola podendo ser aplicada a través de diferentes tipos de mecanismos, alguns deles são apresentados a continuação. Essa abordagem compensa variações no comprimento do pino, desgaste de componentes ou irregularidades na superfície de trabalho. Isso

é alcançado por meio de mecanismos independentes para os movimentos de recuo e descida, engatando-os no momento justo, garantindo uma soldagem eficaz, independentemente das variações que possam ocorrer durante o processo. Algumas das soluções são as seguintes.

Um dos mecanismos que fazem desta abordagem possível é o sistema de anel de travamento (Figura 2.22) é um mecanismo de bloqueio ou acoplamento utilizado para assegurar temporariamente dois componentes em uma posição fixa relativa entre si. Esse tipo de sistema geralmente opera por meio de um anel ou colar que se desloca ou se inclina para engrenar com uma superfície, bloqueando assim o movimento dos componentes conectados.

Figura 2.22 Anel de Travamento A) Sistema Desligado B) Sistema Ligado



Fonte: elaborado pelo autor

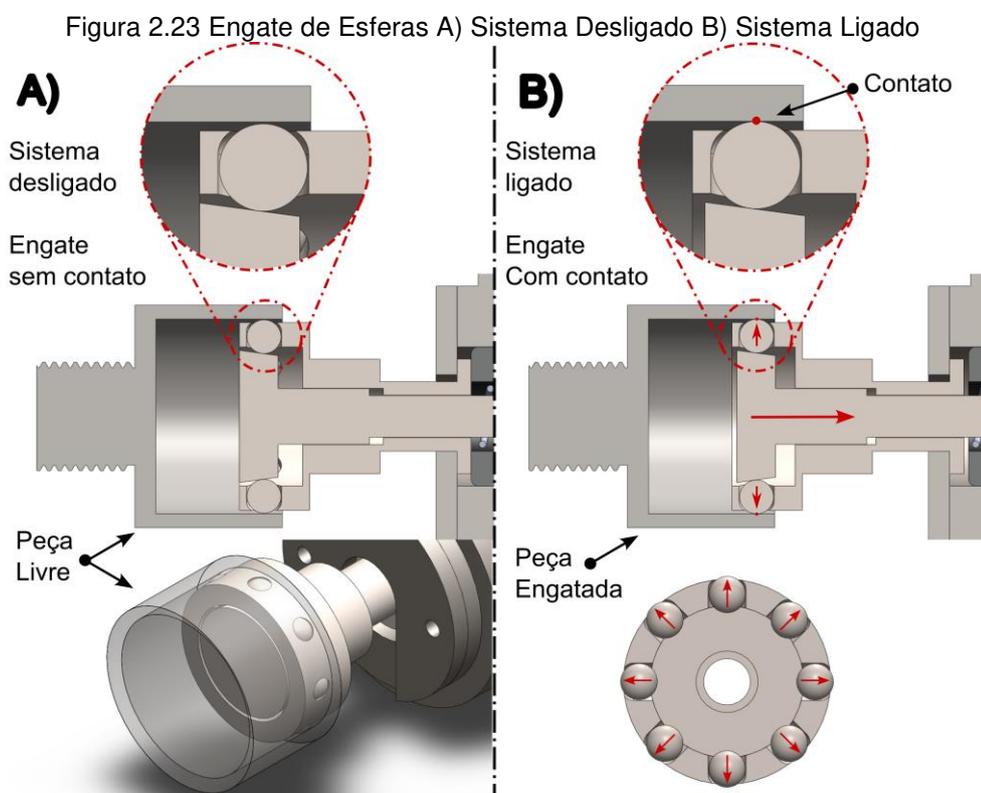
No processo de soldagem de pinos, o sistema opera com um anel montado com um pouco de folga sobre o eixo do pistão, eixo que atua de forma rígida com a pinça e o pino. Quando o solenoide é ativado, ele puxa o núcleo que possui um gancho acoplado a uma ranhura do anel. Nesse ponto, o movimento de levantamento começa, e o anel se inclina, o que faz com que o acoplamento com o pistão seja travado, unindo as duas partes (o lado do pino e o lado do solenoide). Esse acoplamento permite que

o pistão e o pino se movam juntos durante o recuo, garantindo que o pino seja retraído à altura correta para iniciar a formação do arco.

Uma vez que o solenoide deixa de estar ativo, uma pequena força de uma mola auxiliar separa novamente as duas partes, permitindo que o pistão se desloque independentemente do pino por ação da mola de trabalho. Esse mecanismo é crucial para evitar o desgaste prematuro e assegurar a repetitividade do processo de soldagem.

Em resumo, um sistema de anel de travamento é um método eficaz para o bloqueio temporário e controlado de peças móveis, proporcionando estabilidade e precisão em aplicações como o *Stud Welding*.

Uma outra abordagem é o sistema de engate por esferas (Figura 2.23) é um tipo de mecanismo de acoplamento ou desconexão rápida que é utilizado para unir dois componentes de maneira temporária e segura. Este sistema se baseia no uso de esferas (geralmente de aço) que se encaixam em ranhuras, rebaixos ou superfícies lisas em um dos componentes, mantendo-os juntos pela força de uma mola ou outro mecanismo de retenção.



Fonte: elaborado pelo autor

### *Componentes Principais:*

- **Corpo do Engate (Macho):** É o componente que possui as esferas incrustadas, além do mecanismo de ativação que neste caso é um eixo com ponta cônica que empurra as esferas radialmente.
- **Elemento de Acoplamento (Fêmea):** Este componente em forma de copo ou vaso tem uma superfície lisa onde as esferas exercem pressão quando o engate está ativado.
- **Esferas:** São pequenas bolas metálicas que se movem dentro de um alojamento no corpo do engate.
- **Mecanismo de Ativação:** Neste caso, o mecanismo de ativação é um solenoide que está fixo ao eixo com ponta cônica, que empurra as esferas para fora, exercendo força sobre a superfície de contato do componente de acoplamento.

### *Funcionamento:*

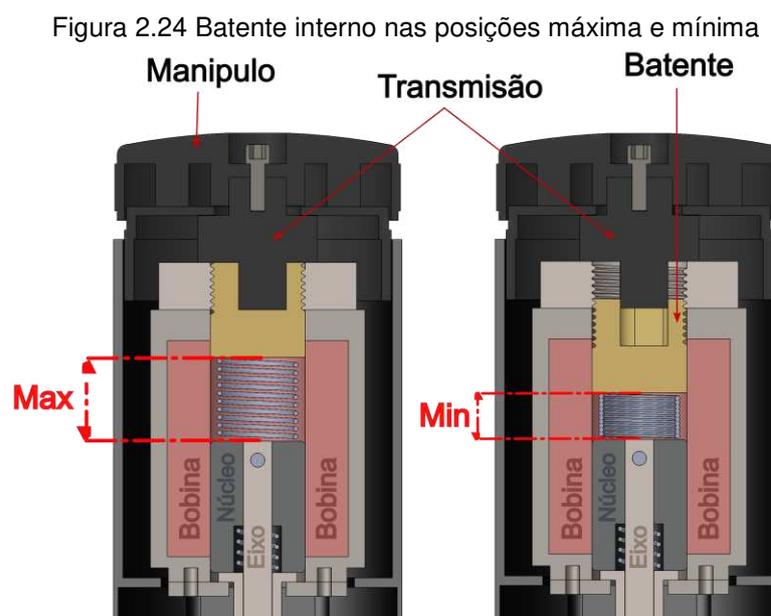
- **Conexão:** Para aplicações como a soldagem de pinos, o corpo do engate permanece o tempo todo dentro do elemento de acoplamento, sendo este último o que determina a faixa de trabalho da protrusão.
- **Bloqueio:** Uma vez realizada a compressão inicial, determinando o ponto de acoplamento, o solenoide é ativado, puxando o eixo de ponta cônica, forçando a expansão das esferas, que fazem contato com a superfície interna do elemento de acoplamento. As esferas se fixam por pressão no contato, bloqueando os componentes, criando a união e, assim, esses dois componentes independentes atuam como um corpo sólido e rígido de maneira confiável.
- **Desconexão:** Para desconectar os componentes, a energia do solenoide é retirada, o que descomprime uma mola auxiliar entre o corpo do engate e o eixo de ponta cônica, retraindo as esferas para o interior do corpo, liberando-as da pressão na superfície de contato do componente de acoplamento. Uma vez liberadas as esferas, os componentes podem ser facilmente separados devido à ação das molas.

### 2.7.3 Sistemas de Recuo

Compreender e controlar a altura de recuo do pino (*Lift*) ajuda na eficiência do processo atuando diretamente na entrada de energia no processo. Para regular este parâmetro, existem diversos mecanismos projetados para ajustar a distância de recuo antes de iniciar o arco elétrico. Entre os métodos mais utilizados estão o batente interno, os batentes externos e o solenoide móvel. Cada um desses sistemas oferece soluções específicas para controlar o dito retrocesso, adaptando-se às diferentes condições de trabalho e requisitos operacionais. A seguir, esses mecanismos serão descritos em detalhe.

#### 2.7.3.1 Batente de fim de curso interno

Comercialmente, uma das formas mais eficazes de regular esse movimento é por meio da implementação de uma barreira física como um batente. Esse batente funciona como um mecanismo de restrição que limita o deslocamento do pino, ajustando a distância de recuo dentro de um intervalo predefinido. O batente interno se caracteriza por sua integração direta com o dispositivo de soldagem, utilizando uma peça fixa externa conectada a um mecanismo de ajuste interno (Figura 2.24). Esse ajuste é geralmente realizado através de um sistema rosqueado, onde o movimento rotativo de um parafuso é transmitido modificando a posição das peças internas responsáveis pelo fim do curso do pino.



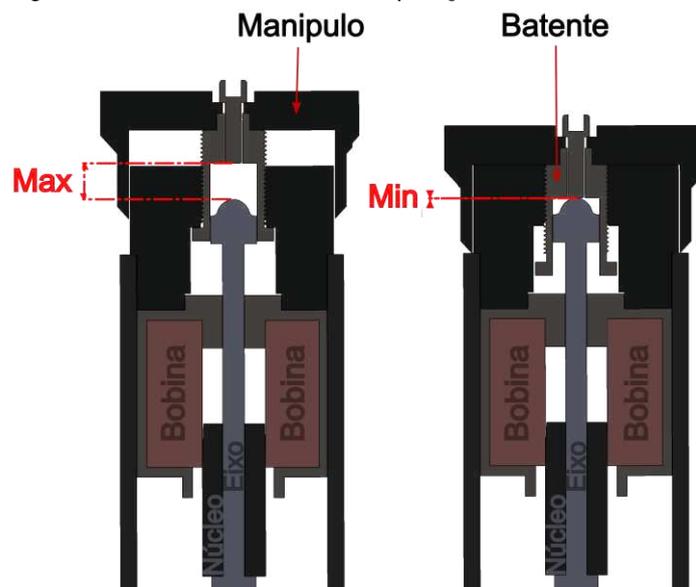
Fonte: elaborado pelo autor

À medida que o parafuso é rotado, altera-se o espaço disponível para o movimento interno das peças, restringindo fisicamente a quantidade de recuo que o pino pode realizar. Essa abordagem não apenas garante que o pino recue a distância parametrizada, mas também proporciona um controle constante sobre a tensão e energia no processo de soldagem.

### 2.7.3.2 Batente de fim de curso externo

O batente externo funciona com o mesmo princípio básico de restrição física que o batente interno, mas se diferencia pelo fato de essa barreira estar localizada na parte externa do dispositivo de soldagem, permitindo que o usuário interaja diretamente com ela para ajustar o fim do curso (Figura 2.25). Esta peça atua como um fundo móvel que pode ser deslocado para frente ou para trás na parte traseira do dispositivo, regulando assim o espaço disponível para o movimento interno do mecanismo.

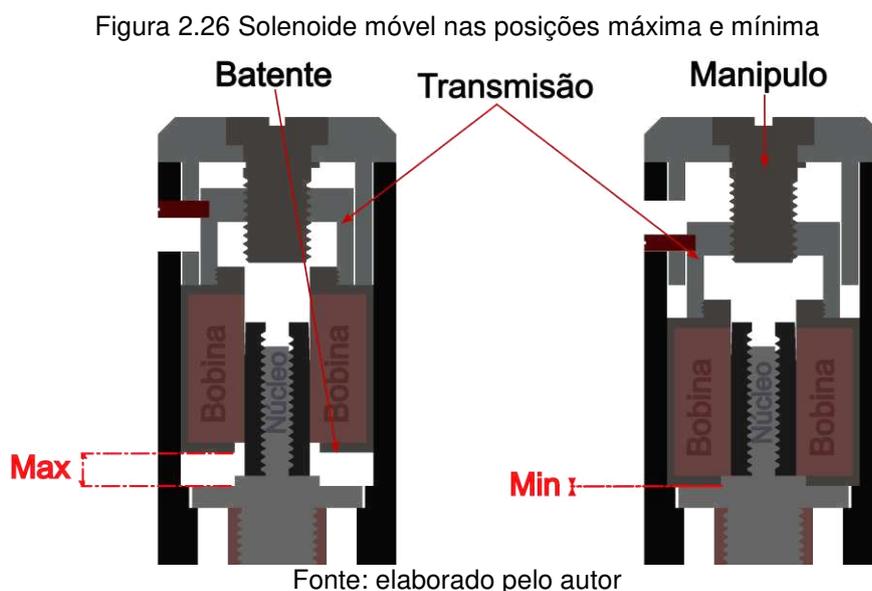
Figura 2.25 Batente externo nas posições máxima e mínima



O ajuste do batente externo é comumente realizado por meio de um sistema rotativo rosqueado, onde o usuário pode girar a peça, causando seu avanço ou recuo para reduzir ou aumentar o espaço interno conforme necessário. Este tipo de ajuste é prático, pois permite modificar a configuração do dispositivo de maneira rápida, sem necessidade de ferramentas adicionais. A sensibilidade deste ajuste depende do passo de rosca mecanizado; um passo mais fino permitirá ajustes mais precisos, enquanto um passo mais grosso ocasionará grandes mudanças na tensão e, conseqüentemente, na energia do processo.

### 2.7.3.3 Solenoide móvel

No caso do solenoide móvel (Figura 2.26), observa-se que ele também é baseado no princípio da barreira física, assim como as soluções anteriores. Neste sistema, no eixo principal ou pistão móvel do dispositivo, é incorporada uma seção com uma superfície em forma de prato que atua como barreira física ao fazer contato direto com a superfície externa do solenoide. Nesse contexto, o solenoide funciona como o limitador do curso de recuo do pino.



O controle da posição do solenoide, e, portanto, do recuo, é alcançado por meio de um regulador externo que transmite o movimento através de um eixo rosqueado. Esse eixo permite transmitir o movimento e, assim, ajustar a posição do solenoide, produzindo um avanço ou retrocesso linear do componente dentro do mecanismo, o que altera a posição da superfície de batente. Dessa forma, pode-se modificar a distância de retração do pino de forma consistente.

Embora seja uma abordagem menos convencional em comparação com outros métodos apresentados anteriormente, o solenoide móvel oferece uma solução robusta para controlar o recuo. Seu design permite um ajuste simples com poucos recursos mecânicos internos, adaptando-se aos parâmetros do processo para o qual foi projetado.

Essas soluções mecânicas apresentadas não só garantem que o pino recue na distância correta, mas também proporcionam um controle constante e confiável sobre o processo de soldagem. Em alguns dispositivos, como os que utilizam um pistão rígido, esse tipo de ajuste permite manter um controle rigoroso sobre o movimento do

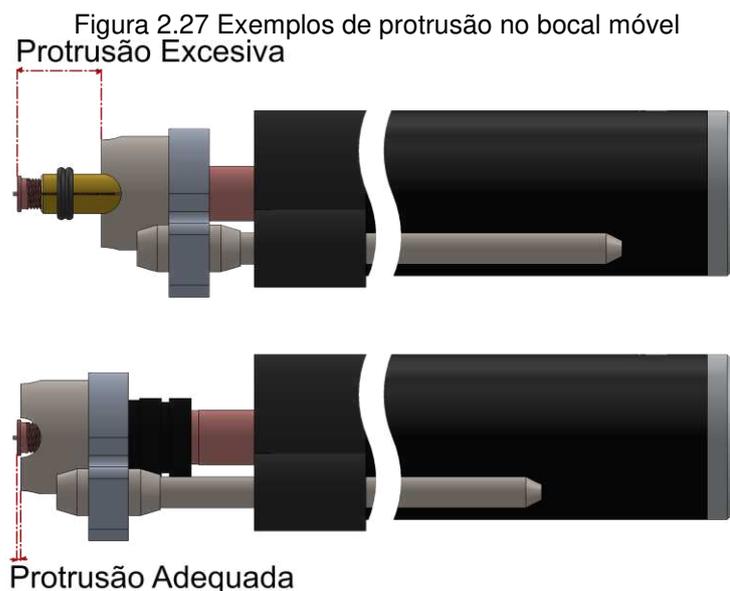
pino criando a mencionada barreira física, assegurando que o arco permaneça no comprimento configurado e sem variações durante o processo de soldagem, o que garante uma entrega de potência adequada.

#### 2.7.4 Sistemas de Protrusão

A protrusão do pino, que é a distância que o pino se sobressai em relação ao plano de trabalho, é um parâmetro que deve ser regulado no processo de soldagem de pinos. A seguir, são descritas várias metodologias para ajustar essa protrusão, dependendo do tipo de dispositivo de soldagem e do processo específico.

##### 2.7.4.1 Bocal móvel

Em muitos dispositivos de soldagem de pinos, a protrusão é regulada utilizando um bocal móvel. Este bocal está fixado a uma placa (*plate*) que possui duas hastes ou eixos que se inserem em orifícios na estrutura externa da pistola de soldagem. Essas hastes permitem um movimento linear suave da placa e, conseqüentemente, do bocal, facilitando o posicionamento do bocal em relação ao pino (Figura 2.27). Uma vez que a protrusão desejada é ajustada, o movimento das hastes é bloqueado por meio de parafusos, garantindo assim uma estrutura sólida e mantendo a protrusão na posição correta.

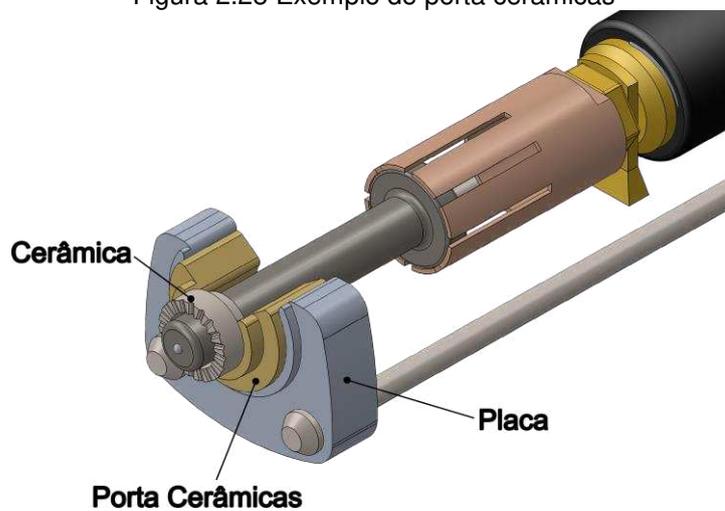


Fonte: elaborado pelo autor

#### 2.7.4.2 Porta-Cerâmicas

Em processos que utilizam proteção cerâmica, a protrusão é ajustada utilizando um porta-cerâmicas móvel (Figura 2.28). Este dispositivo, assim como o bocal, está fixado a uma placa (*plate*) com hastes que permitem seu deslocamento linear. Ao posicionar corretamente o porta-cerâmicas, os eixos são bloqueados para manter a protrusão estável. Esse método garante que a cerâmica esteja corretamente alinhada e forneça a proteção adequada durante a soldagem.

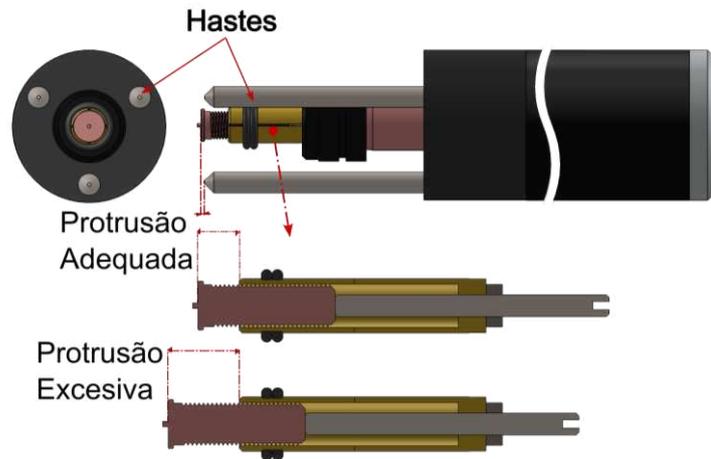
Figura 2.28 Exemplo de porta cerâmicas



#### 2.7.4.3 Hastes fixos

Em alguns processos de soldagem, como aqueles que utilizam descarga capacitiva, os suportes para a protrusão têm um tamanho predefinido, o que limita a capacidade de ajuste. Nesses casos, o ajuste da protrusão é realizado através de um batente na pinça que sustenta o pino, adaptando assim a protrusão dentro dos limites preestabelecidos do dispositivo (Figura 2.29). Esta abordagem é mais rígida e depende da precisão do design inicial do suporte.

Figura 2.29 Exemplo de protrusão nas hastes fixas

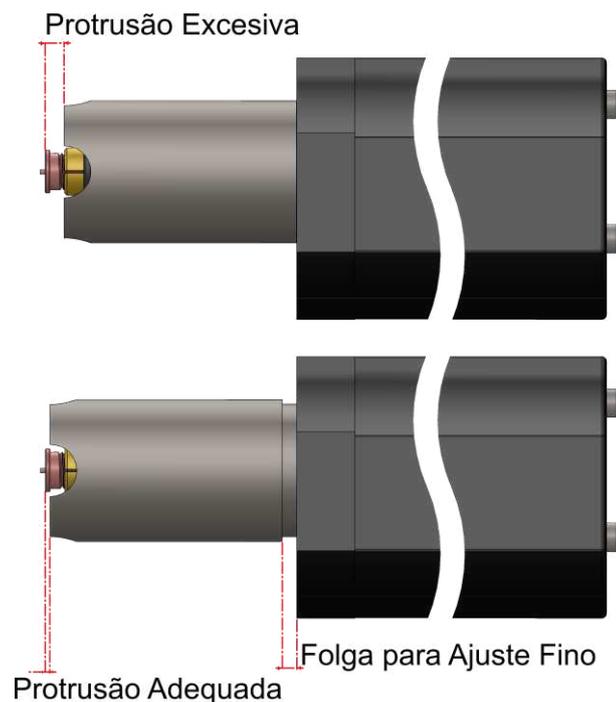


Fonte: elaborado pelo autor

#### 2.7.4.4 Bocal Fixo

Em sistemas mais avançados com controle eletrônico, a protrusão do pino é mínima, pois o dispositivo ajusta eletronicamente a posição do pino no momento da soldagem. Nesses casos, são utilizados bocais fixos que, embora tenham um alcance limitado de movimento (aproximadamente 5 mm), permitem um ajuste fino (Figura 2.30). Essa pequena margem de ajuste é suficiente para otimizar o processo de soldagem.

Figura 2.30 Exemplos de protrusão no bocal fixo



Fonte: elaborado pelo autor

## 2.7.5 Sistemas de Amortecimento

O amortecimento é responsável por moderar a velocidade de avanço do pino, garantindo que ele se mova de maneira controlada em direção à poça de fusão. Isso é alcançado utilizando elementos como amortecedores hidráulicos ou pneumáticos, que aplicam uma resistência controlada ao movimento do pistão que empurra o pino, além de sistemas eletrônicos e eletromecânicos que ainda considerados estratégias de controle e não diretamente sistemas de amortecimento, atuam diretamente no controle direto da velocidade.

### 2.7.5.1 Amortecedores Hidráulicos

Em muitos sistemas de soldagem de pinos, o amortecimento é implementado por meio de amortecedores hidráulicos. Esses dispositivos estão conectados de forma paralela ao pistão que age diretamente no movimento do pino. Quando o pistão começa a se mover para atingir a peça de trabalho, o amortecedor hidráulico aplica uma resistência controlada ao movimento, desacelerando o pino de maneira gradual e controlada. Este sistema é eficaz para pinos de maior diâmetro, onde a quantidade de metal fundido é considerável e uma imersão rápida poderia causar salpicos significativos e conseqüentemente perda de material gerando defeitos na solda.

### 2.7.5.2 Amortecedores Pneumáticos

Embora menos comuns atualmente, alguns sistemas ainda utilizam amortecedores pneumáticos. Eles funcionam de maneira semelhante aos hidráulicos, mas em vez de utilizar um fluido, empregam ar comprimido para criar resistência. No entanto, oferecem uma curva de amortecimento progressiva, o que pode ser benéfico em aplicações onde é necessário um controle preciso da velocidade de avanço.

### 2.7.5.3 Amortecimento Eletrônico

Em sistemas atuais, pode-se utilizar o amortecimento eletrônico. Embora não seja um sistema de amortecido como tal e sim uma estratégia de monitoração e controle da velocidade, realiza uma diminuição na velocidade de avanço do pino. Esses sistemas empregam sensores e atuadores controlados eletronicamente para ajustar a velocidade de avanço em tempo real. O controle eletrônico permite uma resposta mais rápida e precisa, adaptando-se às condições mutáveis do processo de soldagem. Esses sistemas são ideais em ambientes onde se requer alta repetitividade

e precisão extrema, como na fabricação automatizada. Também existem propostas alternativas como a utilização de pulsos de corrente de alta frequência no solenoide antes do impacto do pino com o fim de diminuir e controlar a velocidade de avanço, dito sistema foi proposto por Schmitt e Knetsch (1990) como solução para a Emhart Inc.

### 3 EQUIPAMENTOS E METODOS

#### 3.1 EQUIPAMENTOS

Para a condução dos experimentos e a coleta de dados nesta investigação, uma variedade de equipamentos e materiais especializados foram empregados. Estes dispositivos, incluem sistemas especializados de aquisição de dados, equipamentos de radiografia, câmeras de alta velocidade, fontes de soldagem, pistolas de soldagem, materiais de base e consumíveis. A seguir, serão descritos detalhadamente os principais equipamentos e materiais utilizados, destacando suas especificações técnicas e suas funções específicas no contexto dos processos de soldagem por arco retraído e por descarga capacitiva.

##### 3.1.1 3SR

A instrumentação dos experimentos contou com o Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade (3SR) para *Stud Welding*, desenvolvido pela IMC – Engenharia de Soldagem (Figura 3.1) em parceria com o Labsolda. Esse sistema consegue monitorar os principais parâmetros do processo de soldagem, como corrente elétrica, tensão, deslocamento do pino, vazão de gás e temperatura, utilizando termopares. A robustez e precisão dos sensores do 3SR são particularmente adequadas para pesquisa e acompanhamento de processos.

Figura 3.1 Sistema de supervisão e rastreamento da soldagem (3SR)

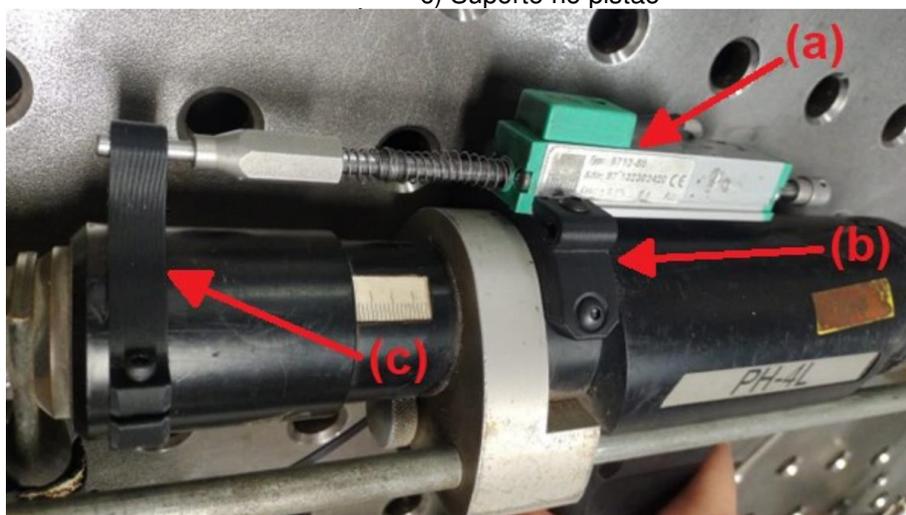


Fonte: IMC, (2014)

Para medir o deslocamento do pino, parâmetro intrinsecamente necessário no contexto desta pesquisa, foi utilizada uma régua potenciométrica. Esta régua é fixada

ao corpo da pistola de soldagem e através de um suporte móvel projetado e impresso em 3D é conectado a um componente da pistola que se move em conjunto com o pino conforme ilustrado na Figura 3.2. Funcionando por meio de uma variação de tensão, a régua potenciométrica associa cada posição do seu eixo a um valor específico de tensão. O modelo utilizado possui um curso de 50 mm, variando a saída de tensão de 0,2 V (totalmente retraído) até 5 V (totalmente estendido). O 3SR lê este sinal analógico e converte para valores precisos de deslocamento em milímetros.

Figura 3.2 Montagem de aquisição de Recuo a) Régua potenciométrica b) Suporte na estrutura c) Suporte no pistão



Fonte: (Lima Marchione, 2024)

Considerando as elevadas correntes envolvidas no processo SW, foi necessário utilizar sensores Hall capazes de medir até 12.000 A, valor máximo estimado para o processo por descarga capacitiva. O 3SR dispõe de dois canais para medição de corrente: um calibrado para sensores Hall de até 12.000 A e outro para até 2.000 A. Além disso, a fonte de soldagem para SW por descarga capacitiva suporta uma tensão de carga de até 200 V, correspondendo à capacidade de entrada de tensão nominal do 3SR.

Adicionalmente, o 3SR registra os dados de soldagem com uma taxa de amostragem de 5.000 leituras por segundo para cada variável. Esta alta taxa de amostragem é crítica para processos de soldagem de curta duração como é o caso da descarga capacitiva sendo um processo que tem o arco aberto por um período inferior a 10 milissegundos, esta alta frequência de aquisição assegura a captura detalhada e precisa dos parâmetros operacionais.

### 3.1.2 Raio-X

Em várias tarefas foi necessário equipamento de raios-X, foi utilizado o dispositivo da marca ERESKO, modelo MF4, com uma faixa operacional de alta tensão de até 300 kV, permitindo a inspeção de peças de aço de até 3 polegadas de espessura (Figura 3.3). Este equipamento é complementado por um sistema de radiografia computadorizada que possibilita a obtenção de imagens com resoluções de 25, 50 e até 100 microns, oferecendo alta precisão na detecção de defeitos internos e na avaliação das peças inspecionadas.

Figura 3.3 ERESKO MF4



Fonte: Waygate Technologies, (2020)

Nesta técnica, o filme convencional é substituído por uma película de fósforo reutilizável, o que aumenta a eficiência e produtividade do processo. A captura da imagem radiográfica é realizada por escaneamento LASER, com um tempo aproximado de 50 segundos para a obtenção de cada imagem. Este método proporciona uma visualização detalhada e rápida das características internas das soldagens e materiais.

### 3.1.3 Câmeras

Para a obtenção de filmagens de alta velocidade, utilizou-se uma câmera Photron Fastcam Nova S9, equipada com uma lente Macro Canon EF 180 mm L USM. Este conjunto óptico permite capturar imagens de alta resolução e detalhe. A iluminação foi provida por um sistema laser CAVITAR/Cavilux HF, que oferece uma iluminação consistente e de alta intensidade. O conjunto conta com sincronismo entre câmera e sensores de corrente e tensão, assegurando condições para captura de dados visuais durante os experimentos de soldagem, os equipamentos são detalhados tecnicamente na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Lista de equipamentos utilizados na filmagem de alta velocidade

Equipamento	Descrição
	<p><b>Câmera Photron   Fastcam Nova S9</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de aquisição: máx. 9.000 quadros por segundo para a máx. resolução</li> <li>• Resolução: 1024 x 1024 px</li> </ul>
	<p><b>Lente Canon EF 180 mm L USM</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro: 72 mm</li> <li>• Abertura: f/3.5</li> </ul>
	<p><b>Duplicador Canon Extender EF 2X III</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampliação: 2x</li> </ul>
	<p><b>Filtro Edmund Optics, 810 ± 10 nm</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro: Passa banda 810 nm (half width 10 nm)</li> <li>• Diâmetro: 50 mm</li> </ul>
	<p><b>Sistema de iluminação Laser Cavitar, CAVILUX HF</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laser classe 4</li> <li>• Potência de pulso: 500 W ± 10%</li> <li>• Tempo do pulso &lt; 50 ns</li> <li>• Comprimento de onda: 810 ± 10 nm</li> </ul>
	<p><b>Sistema de aquisição de dados IDT, DAS Motion Pro</b></p> <p><b>Entradas analógicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de canais: 16</li> <li>• Resolução dos conversores: 16 bits</li> <li>• Taxa de aquisição máxima: 500 kHz</li> <li>• Tensão de entrada máxima: ±10 V</li> </ul> <p><b>Saídas analógicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de canais: 4</li> <li>• Resolução dos conversores: 16 bits</li> <li>• Taxa de aquisição máxima: 500 kHz</li> <li>• Tensão de saída máxima: ±10 V</li> </ul>

Fonte: Photron (2025), Cavitar (2022) e Canon, (2021) .

Para obter imagens térmicas de alta precisão, foi utilizada uma câmera FLIR T1020 (Tabela 3.2), equipada com uma lente de alta sensibilidade térmica. Este equipamento permite capturar imagens com resolução infravermelha de 1024 × 768 pixels e sensibilidade térmica (NETD) inferior a 20 mK a +30 °C, garantindo a detecção de mínimas variações de temperatura. A câmera oferece uma ampla faixa de medição de temperatura, que varia de -40 °C a 2000 °C, permitindo sua aplicação em diversos cenários. Para este experimento, a câmera foi configurada na escala mais baixa, adequada para medir as temperaturas no verso da chapa durante o processo de soldagem.

Tabela 3.2 Especificações da câmera FLIR T1030SC.

	<p><b>Câmera FLIR, T1030SC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor: Microbolômetro</li> <li>• Taxa de aquisição: 120 Hz para máx. resolução</li> <li>• Resolução máxima: 1024 x 768 px</li> <li>• Tamanho do Pixel: 17 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Faixa de aquisição: a) -10 a 150 °C b) 100 a 650 °C c) 300 a 2000 °C</li> </ul>
---	--

Fonte: Flir.(2018)

Para capturar imagens das macrografias geradas durante o estudo, foi empregada uma câmera fotográfica equipada com um lente macro e um duplicador, associada a um sistema de iluminação LED. As especificações técnicas desse arranjo estão detalhadas na Tabela 3.3

Tabela 3.3 Câmera e dispositivos utilizados nas macrografias.

Item	Equipamento	Descrição
a)		<p><b>Câmera Canon EOS 60D</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolução máxima: 5184 x 3456</li> <li>• Sensor CMOS APS-C de 18 MP</li> </ul>
b)		<p><b>Duplicador Canon Extender EF 2X III</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampliação: 2x</li> </ul>
c)		<p><b>Lente EF 180mm f/3.5L Macro USM</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro: 72 mm</li> <li>• Abertura: f/3.5</li> </ul>
d)		<p><b>Refletor LED Fancierstudio 576 LED Light Panel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensões: 23 x 23 x 2,5 cm</li> <li>• Temperatura da cor: 5600K</li> <li>• Potência: 40 W</li> </ul>

Fonte: Canon (2010) (2021) e Fancierstudio (2016).

### 3.1.4 Fontes

Para o processo de soldagem por pino (SW) por arco retraído, a bancada de ensaios dispõe dos modelos BMK-16i e BMK-22i da SOYER, juntamente com o modelo THW 1500 da Tucker. Para o processo SW por descarga capacitiva, utiliza-se a fonte de soldagem modelo BMS-10N da SOYER. As principais especificações técnicas das fontes de soldagem empregadas nos experimentos são descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Características das fontes utilizadas

Característica	SOYER	SOYER	SOYER	TUCKER
	BMK16i	BMH-22i	BMS-10N	N550C
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	Soldagem de Pinos por arco retraído
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	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	Aço, aço inoxidável, alumínio
Corrente de soldagem (A)	100 a 1.000	300 a 2.000	-	100 a 1.000
Tempo de soldagem (ms)	3 a 1.000	3 a 1.000	1 a 4	50 a 320
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	Tecnologia de Inversores
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)	Até 15 (dependendo do diâmetro do pino)

Fonte: elaborado pelo autor

### 3.1.5 Pistolas

As pistolas de soldagem disponíveis na bancada de ensaios incluem modelos específicos para processos de soldagem por arco retraído e por descarga capacitiva. Para o processo SW por arco retraído, estão disponíveis as pistolas da fabricante SOYER, modelos PH-4L e PH-3N, além da pistola PLM 560 fabricada pela TUCKER.

Para o processo SW por descarga capacitiva, a bancada de ensaios está equipada com as pistolas modelos PS-3 e PS-3K, ambas também fabricadas pela SOYER.

### 3.1.6 Chapas

Como material base para os experimentos, foram utilizadas chapas de aço carbono ASTM A36. A Tabela 3.5 apresenta a especificação detalhada da composição química das chapas utilizadas, conforme os padrões da ASTM.

Tabela 3.5 Composição química das chapas

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

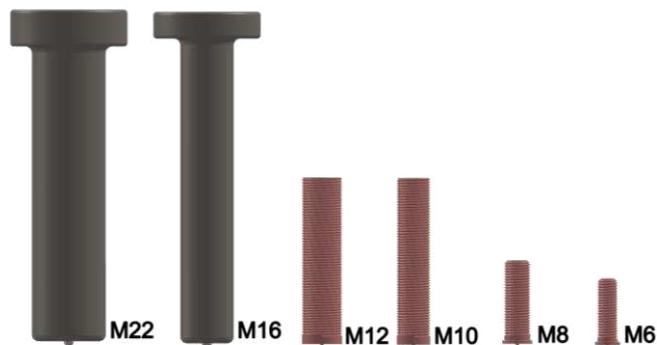
Fonte: (Gerdau, 2021)

### 3.1.7 Pinos

Nos experimentos, foram utilizados pinos de aço carbono. Para o processo de soldagem por arco retraído (SW), foram empregados pinos com diversas geometrias de pontas, conforme ilustrado na Figura 3.4. Essas variações geométricas visam otimizar a fusão e a ancoragem do pino na peça de trabalho segundo fabricantes, influenciando diretamente a qualidade da soldagem e a integridade da união formada, porém cada tipo de ponta utilizada é específico para o processo testado.

No caso do processo de soldagem por descarga capacitiva (SW), foram utilizados pinos com flange e ponta de ignição, conforme apresentado na Figura. Essa configuração é especialmente projetada para garantir uma ignição eficiente do arco e uma fusão adequada além de um flange para obter maior superfície soldada, mesmo em materiais de espessura reduzida, mantendo a integridade estrutural e minimizando a formação de defeitos na soldagem.

Figura 3.4 Pinos usados nos experimentos



Fonte: elaborado pelo autor

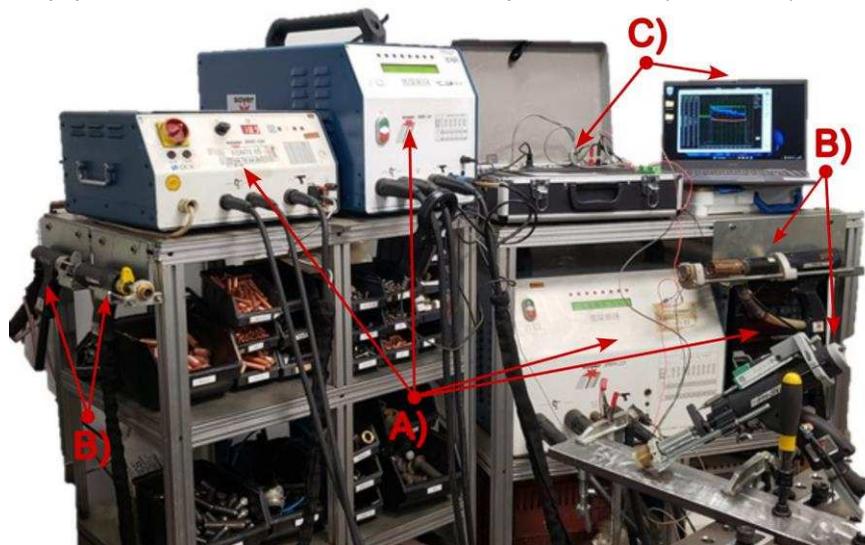
### 3.1.8 Bancada

A bancada de experimentação, conforme ilustrada na Figura 3.5, está equipada com uma variedade de dispositivos e materiais supramencionados para a condução dos ensaios de soldagem. Observa-se na imagem o Sistema de Supervisão de Soldagem e Rastreabilidade (3SR), responsável pela aquisição detalhada dos sinais elétricos de corrente e tensão, bem como pelo deslocamento do pino durante o processo de soldagem. Adicionalmente, a bancada inclui as fontes de soldagem BMK-16i e BMK-22i da SOYER, além do modelo THW 1500 da Tucker para soldagem por arco retraído, e a fonte BMS-10N da SOYER para soldagem por descarga capacitiva.

Também são visíveis diversas pistolas de soldagem, entre elas os modelos PH-4L e PH-3N da SOYER para arco retraído, juntamente com as pistolas PS-3 e PS-3K da SOYER para descarga capacitiva. Complementando a bancada, estão os pinos de aço carbono com diferentes geometrias de ponta, adequados para cada tipo de processo de soldagem, além de chapas de aço carbono ASTM A36 utilizadas como material base nos experimentos.

A presença desses elementos na bancada de experimentação permite a realização de ensaios controlados, facilitando a coleta de dados para a análise e compreensão dos mecanismos e parâmetros que influenciam a qualidade das soldagens.

Figura 3.5 Equipamentos usados na bancada de experimentos A) Fontes B) Pistolas C) 3SR



Fonte: elaborado pelo autor

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1 Análise de Patentes, Manuais, Desmontagem e Radiografias de Dispositivos

Para compreender profundamente os mecanismos internos das pistolas de *Stud Welding*, foram realizados estudos combinando pesquisa de patentes, manuais técnicos, desmontagem e radiografias dos dispositivos. O processo começou com uma busca de patentes em bases de dados especializadas, como *Google Patents*, *Espacenet* e o Portal de Patentes da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI). Essa busca concentrou-se em identificar patentes que descrevem dispositivos de soldagem de pinos, com especial atenção aos mecanismos internos e configurações-chave.

Paralelamente, foram analisados os manuais técnicos disponíveis dos dispositivos comerciais, com foco nos esquemas de funcionamento, descrições dos componentes e recomendações de operação.

O conhecimento obtido dessas fontes foi complementado por meio da desmontagem detalhada dos dispositivos disponíveis. Durante o processo de desmontagem, cada componente interno foi identificado e documentado, especialmente aqueles que influenciam diretamente o movimento durante o processo de soldagem. Além disso, foram realizadas radiografias em várias posições de regulação de parâmetros para obter uma visão da estrutura interna sem a necessidade de desmontar completamente os dispositivos. As radiografias permitiram identificar características estruturais e áreas de interesse que não são evidentes a olho nu.

Toda essa informação, proveniente das patentes, manuais, desmontagem e radiografias, foi utilizada para desenvolver modelos CAD gerais e detalhados dos mecanismos internos das pistolas de *Stud Welding*. Esses modelos facilitaram a criação de imagens explicativas, permitindo uma compreensão clara dos mecanismos sem recorrer a material protegido por direitos autorais dos fabricantes. Essa abordagem integral assegura que a representação visual e a análise dos mecanismos sejam independentes e apoiadas por uma compreensão técnica sólida.

### **3.2.2 Estudo dos Movimentos**

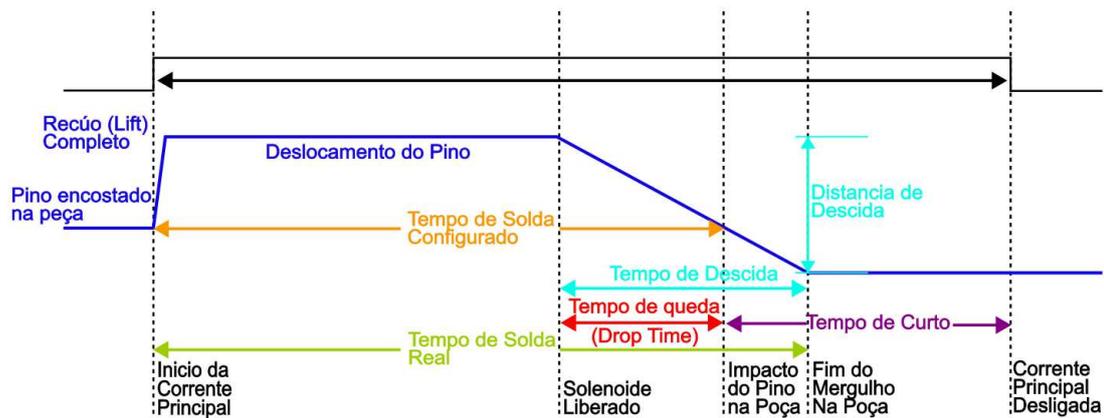
A esquematização dos movimentos dos mecanismos internos das pistolas de *Stud Welding* foi realizada por meio da utilização de sensores de deslocamento linear, neste caso, uma régua potenciométrica. Esse tipo de sensor permite registrar o movimento linear dos componentes durante o processo de soldagem, obtendo dados de posição detalhados em relação ao tempo.

Os movimentos capturados foram analisados para identificar e classificar cada uma das etapas do processo, principalmente o avanço do pino. A partir desses dados, foram desenvolvidos gráficos de movimento que refletem as características dinâmicas de cada dispositivo. Posteriormente, esses gráficos foram utilizados como base de referência para criar gráficos comparativos e realizar cálculos necessários, como a velocidade média do avanço.

### **3.2.3 Experimentação e Análise de Soldagens**

A fase experimental concentrou-se em avaliar como as diferentes configurações de velocidade afetam a qualidade da soldagem no processo de *Stud Welding*. Para isso, as pistolas de soldagem foram configuradas nos seus parâmetros máximos e mínimos de velocidade, alcançando seus limites de operação, mantendo constantes os parâmetros elétricos do processo para isolar o impacto da velocidade sobre a soldagem. Para as soldas realizadas sob essas condições controladas, foram registrados tanto os dados de movimento linear quanto os dados elétricos associados a cada soldagem. Conforme ilustrado na Figura 3.6, que é uma adaptação de um manual da Nelson, observa-se o tempo e a distância de descida real, os quais serviram como base para a metodologia de cálculo das velocidades. Esse enfoque permitiu analisar especificamente a influência da velocidade na geometria da zona fundida e na integridade estrutural das soldagens realizadas.

Figura 3.6 Diagrama de movimento adaptado ao experimento

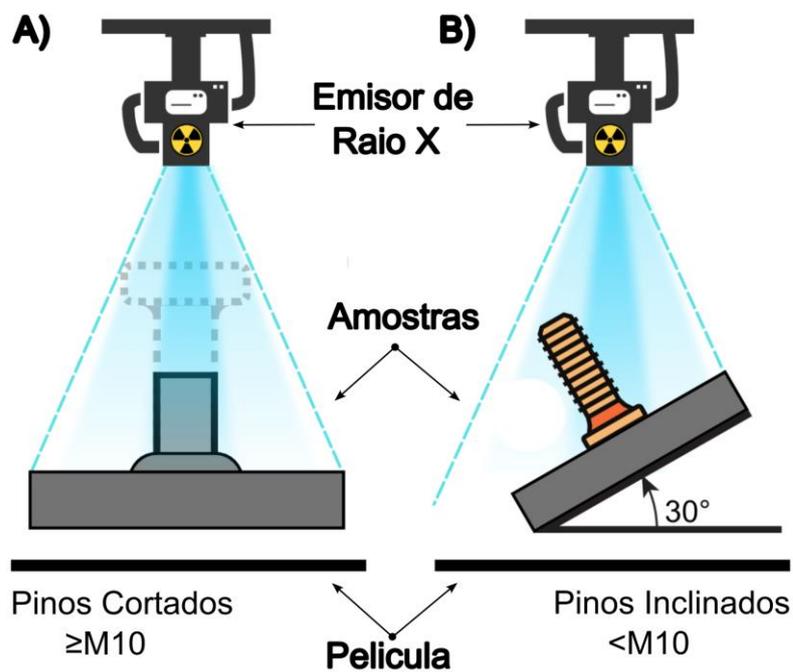


Fonte: adaptado de (Nelson, 2016)

Devido à amplitude da análise, considerando a quantidade de equipamentos e as diferenças entre as tecnologias além da parametrização de cada um deles, os parâmetros utilizados em cada uma das análises são apresentados na seção de resultados, imediatamente antes de seus respectivos resultados e análises. A presente estrutura atípica garante que cada conjunto de dados seja contextualizado adequadamente, considerando as características de cada tecnologia e equipamento, permitindo uma leitura e uma interpretação fluida dos conjuntos parâmetros/resultados obtidos.

Após a fase experimental, as amostras soldadas foram submetidas a uma análise que incluiu macrografias para observar a geometria da poça de fusão, além de radiografias (Figura 3.7) para detectar possíveis defeitos como porosidade, inclusões ou descontinuidades. Os resultados dessas avaliações foram correlacionados com as velocidades médias de avanço e movimento registradas durante os experimentos, com o objetivo de determinar como essas variáveis mecânicas afetam a qualidade do processo de soldagem.

Figura 3.7 Disposição das Radiografias A) Pinos  $\geq$  M10 B) Pinos  $<$  M10



Os dados obtidos foram analisados estatisticamente para identificar tendências e relações significativas, o que contribuiu para um melhor entendimento desses parâmetros no processo. Os resultados da análise são apresentados por meio de gráficos e modelos visuais baseados nos dados experimentais, garantindo uma representação clara e fundamentada dos achados.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os esquemas estruturais, gráficos de velocidade e a análise dos defeitos observados para os diferentes mecanismos de atuação utilizados nos processos de soldagem por descarga capacitiva (DC) e por arco retraído (AR). Os dispositivos avaliados compreendem mecanismos acionados por mola (M), solenoide com mola (SM), solenoide com mola e amortecedor (SMA), e, por fim, motor linear (ML). Para uma fácil compreensão, cada configuração analisada conforma uma sigla junto ao processo, exemplo: mola na descarga capacitiva (MDC).

### 4.1 MOLA (DC)

#### 4.1.1 Estrutura MDC

Este mecanismo, baseado na ação de uma única mola, é caracterizado por sua simplicidade no movimento e controle do pistão (Figura 4.1). A seguir, são descritos seus principais componentes (Tabela 4.1) e características analisadas.

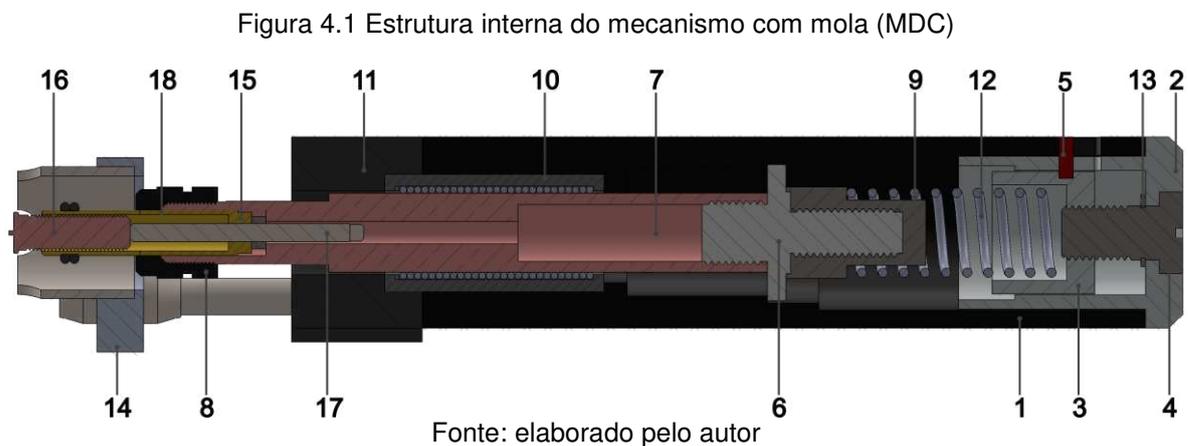


Tabela 4.1 Lista de peças (MDC)

Nº da Peça	Nome da Peça
1	Carcaça
2	Tampa Traseira
3	Regulador de Compressão
4	Manipulo
5	Indicador da Compressão
6	Isolamento Polimérico
7	Pistão de Trabalho
8	Porca
9	Conexão da Mola
10	Rolamento Linear
11	Tampa Frontal
12	Mola de Trabalho
13	Chaveta
14	Suporte
15	Pinça
16	Pino
17	Batente Pinça

Fonte: elaborado pelo autor

O pistão (7) deste mecanismo está restrito a um movimento unidimensional, guiado por um rolamento linear (10) que permite um deslocamento controlado. O movimento ocorre em uma única direção, empurrando o pino (16) para frente e para trás, absorvendo a pequena protrusão no momento de contato do pino com a peça de trabalho. Na parte frontal do pistão, um mecanismo com rosca e uma porca (8) permitem o alojamento das pinças (15) que seguram os pinos, garantindo uma fixação estável durante o processo de soldagem.

Na parte traseira do pistão, uma peça polimérica (6) atua como um acoplamento rígido, conectando o pistão a um prato que age como conexão (9) e sobre o qual repousa a mola (12) de compressão. Esse prato recebe a pressão da mola, que gera a força necessária para impulsionar o pistão para frente. A compressão da mola, e consequentemente a força aplicada, é regulada por meio de um fundo móvel (3), que faz parte do mecanismo.

Este fundo móvel faz parte de um subsistema de ajuste, que utiliza um parafuso (4) que age como manipulo para movimentar dita peça e assim limitar o espaço interno onde a mola está alocada. Este subsistema ajusta a pré-carga da mola em até 6 mm, influenciando diretamente a força aplicada e, por consequência, a velocidade do processo.

Vale destacar que a pré-carga inicial da mola é desconhecida, pois nenhum dos mecanismos estudados foi desmontado para uma análise detalhada de seus

elementos. A pré-carga mencionada afeta diretamente a velocidade de avanço atingida no processo, mas não pôde ser medida diretamente nos estudos realizados na presente dissertação.

#### 4.1.2 Movimento MDC

Nesta análise, foram realizadas cinco soldagens com pinos M6 e M8, utilizando os parâmetros sugeridos pelo fabricante. A tensão de carga dos capacitores foi ajustada para 140 V e 180 V, respectivamente, e a pré-carga da mola foi definida em 3 mm, valor médio da faixa permitida pelo dispositivo. Esse ajuste intermediário foi escolhido devido à ausência de recomendações específicas do fabricante, correspondendo exatamente ao parâmetro intermediário entre os valores máximo e mínimo de pré-carga. O resumo da matriz de experimentos encontra-se na Tabela 4.2. Com base nesses parâmetros, foram gerados diagramas de deslocamento versus tempo (Figura 4.2).

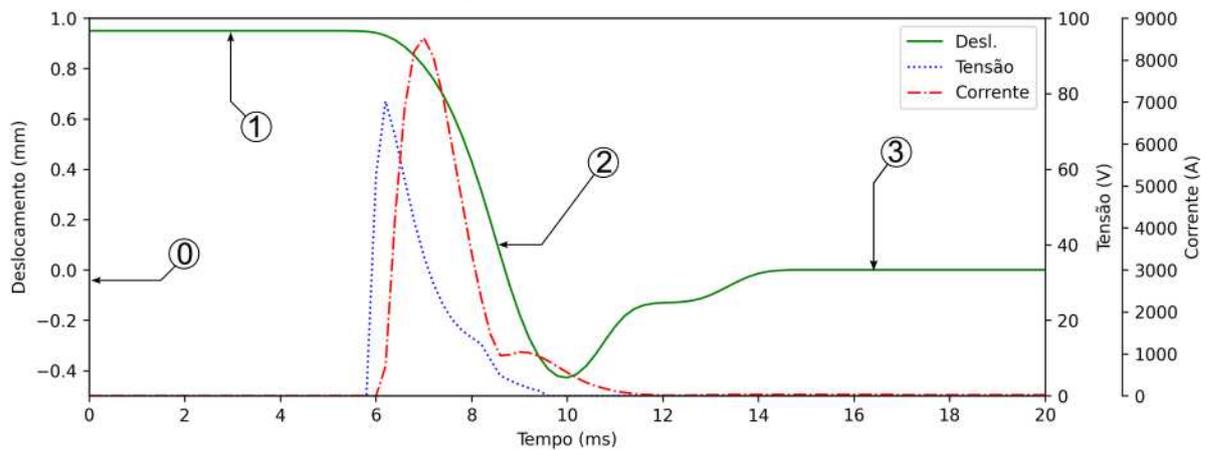
Tabela 4.2 Parâmetros experimentais (MDC)

<b>Parâmetro de Soldagem</b>	<b>M6</b>	<b>M8</b>
Tensão de Carga [V]	140	180
Pré-carga [mm]	0-3-6	0-3-6

Fonte: elaborado pelo autor

A análise do movimento das cinco amostras revelou padrões consistentes do movimento esperado, mas não de velocidade, a precisão estatística da média de velocidade deve ser calculada com maior rigorosidade estatística utilizando um maior número de amostras não atingido no presente trabalho devido à sua abrangência, contudo essa regularidade consistente no movimento permitiu selecionar uma amostra representativa do comportamento padrão do dispositivo. A seguir, descreve-se e analisa-se o movimento do dispositivo, comandado unicamente por uma mola e composto por três etapas, com um único movimento linear de avanço.

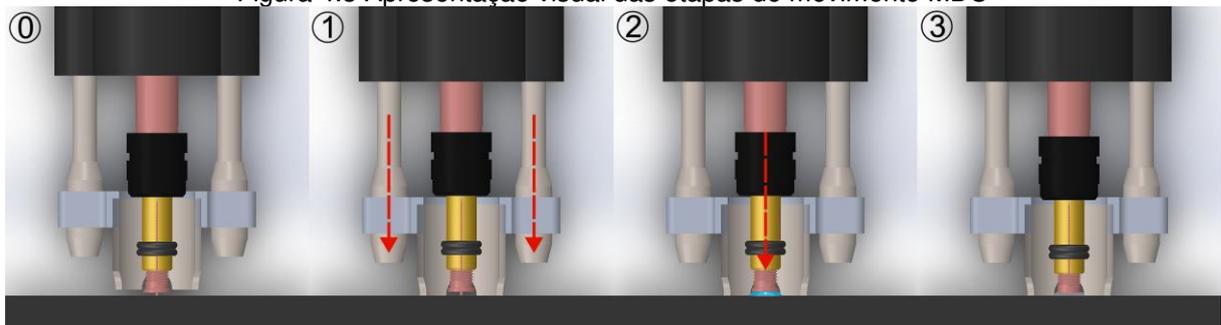
Figura 4.2 Oscilograma MDC e suas etapas de movimento



Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 0, o dispositivo encontra-se em repouso, sem estar apoiado na superfície de trabalho. Esta posição inicial é caracterizada pela completa extensão do sistema mecânico. A Figura 4.3 representa as etapas apresentadas no oscilograma.

Figura 4.3 Apresentação visual das etapas do movimento MDC



Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 1, a pistola de SW é apoiada na superfície de trabalho, absorvendo a protrusão e comprimindo a mola. Esse movimento inicial marca o início do ciclo mecânico e estabelece a posição de referência para o diagrama de deslocamento, sendo esse o ponto 0.

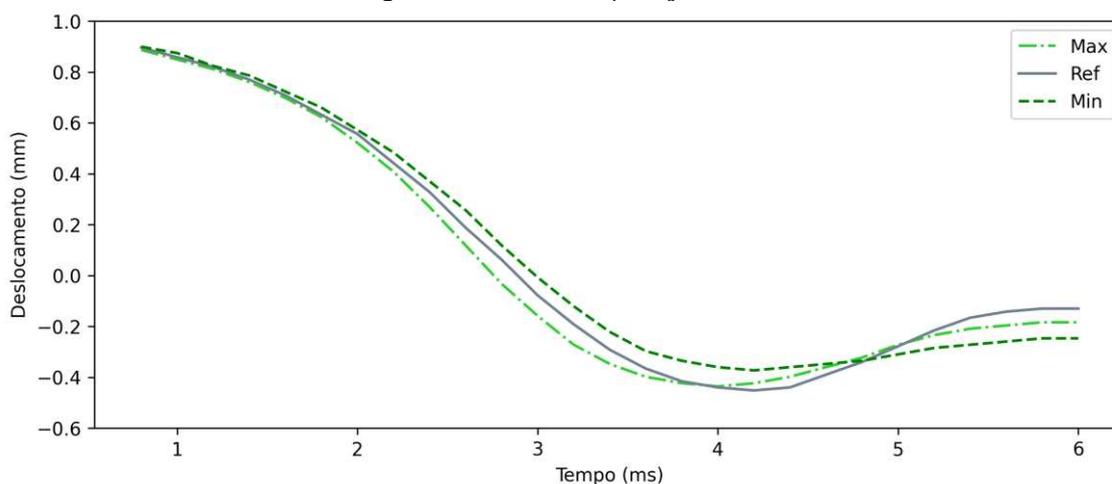
Na Etapa 2, ocorre o movimento principal do dispositivo, que se assemelha ao início de uma onda senoidal, consistente com o movimento harmônico simples descrito em capítulos anteriores. Esse comportamento é característico de sistemas controlados por molas, onde a força e a velocidade são proporcionais à pré-carga do sistema, ou seja, à compressão inicial da mola. Um ponto importante a destacar nesta etapa é a imersão do pino na poça de fusão e ultrapassando o ponto inicial do movimento, deslocando parte do material para formar o colar.

Finalmente, na Etapa 3, o curso do pistão é limitado pelo impacto do pino com a peça de trabalho e pela posterior solidificação do material. Esse momento finaliza o processo de soldagem, com o sistema retornando ao repouso após a descarga elétrica.

Quanto à escala temporal, o movimento ocorreu em menos de 10 milissegundos, característica do processo de descarga capacitiva, refletindo a rapidez do processo de soldagem. A velocidade média do movimento foi de 427,8 mm/s, com desvio padrão de 21,3 mm/s para pinos M6, e de 327,33 mm/s, com desvio padrão de 14,48 mm/s, para pinos M8. Essa variação de aproximadamente 5% entre os ciclos indica alta consistência no comportamento do mecanismo. Esses valores, juntamente com a forma característica do diagrama, foram estabelecidos como referência para os ensaios posteriores.

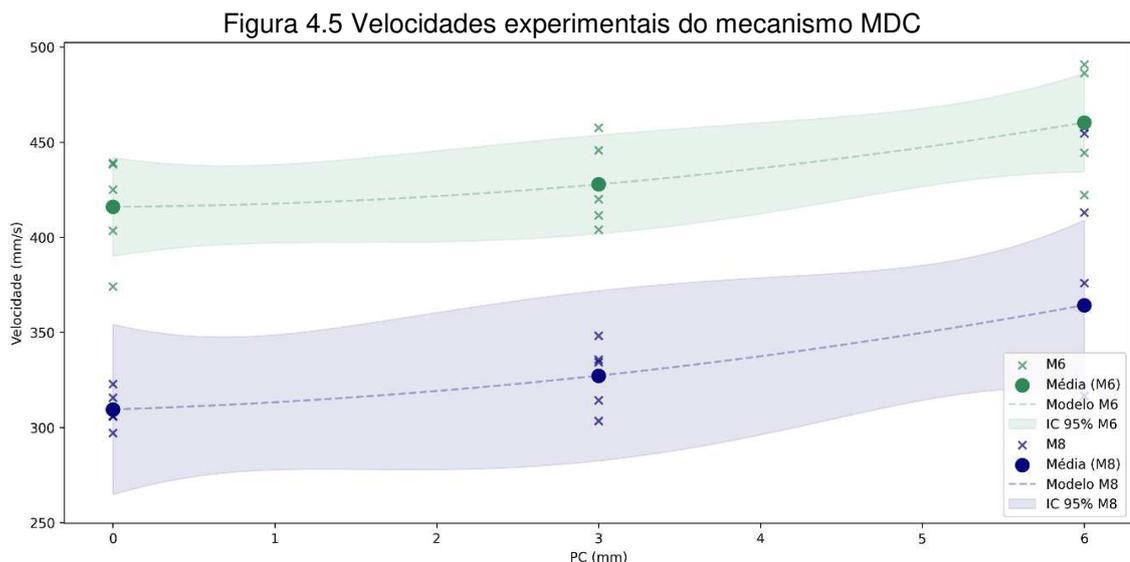
A Figura 4.4 compara a pré-carga (experimental) de referência (3 mm) com os valores máximo (6 mm) e mínimo (0 mm) permitidos pelo dispositivo, dados obtidos pela régua potenciométrica. A pré-carga desempenha um papel significativo no processo de soldagem por descarga capacitiva, influenciando diretamente a velocidade de avanço do pino. No diagrama da Figura 4.4, observam-se diferenças nos deslocamentos, com movimentos similares à referência; entretanto, o declive do deslocamento é visualmente mais acentuado para valores máximos, indicando uma velocidade maior em relação à referência, enquanto, para valores mínimos, o declive é menos acentuado, sugerindo uma velocidade reduzida. Isso evidencia que a magnitude da pré-carga, que determina a força com que o pino é pressionado contra a peça de trabalho, afeta diretamente a dinâmica do processo.

Figura 4.4 Faixa de operação MDC



Fonte: elaborado pelo autor

Devido à necessidade de diferenciar ainda mais os movimentos, foi elaborado o diagrama pré-carga (PC) vs velocidade apresentado na Figura 4.5, no qual se observa uma tendência de aumento da velocidade à medida que a pré-carga aumenta. No entanto, também se verifica uma grande dispersão dos pontos para cada nível de pré-carga, indicando que o processo apresenta alta variabilidade em relação à velocidade, mesmo quando a pré-carga é mantida constante e as soldagens são realizadas de forma consecutiva. Além disso, destaca-se a grande diferença nas médias das velocidades (Tabela 4.3) para os pinos M6 e M8, com diferenças de aproximadamente 100 mm/s na velocidade. Essa discrepância pode ser atribuída, possivelmente, à inércia gerada pelas massas dos pinos. Para verificar essa hipótese, foi realizado um teste t para avaliar as diferenças de massa no conjunto pino/pinça, considerando que apenas esses elementos variam em massa entre as duas curvas apresentadas.



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.3 Velocidades medias experimentais (MDC)

Pré-Carga	Velocidades (mm/s)			
	M6		M8	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Mínima	416,05	48,41	309,46	10,79
Média	427,81	21,33	327,22	14,48
Máxima	460,33	31,25	364,27	79,01

Fonte: elaborado pelo autor

Fisicamente, em um sistema ideal, um conjunto com menor massa deve alcançar uma velocidade maior devido à sua menor inércia. No entanto, este sistema é real e está sujeito à influência de forças adicionais, como a fricção e as interações do arco

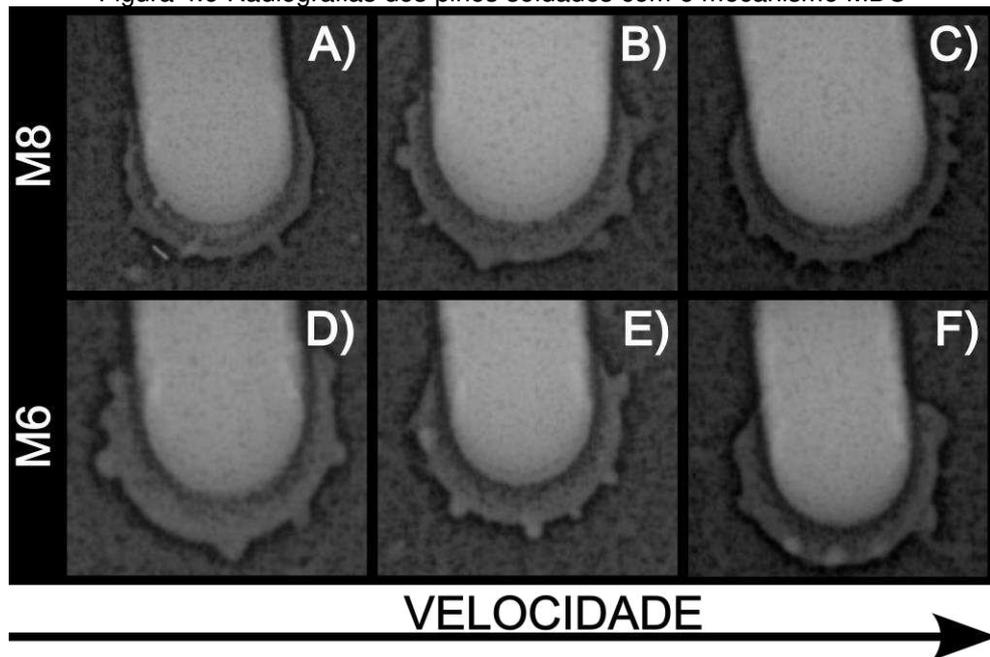
elétrico, que devem ser consideradas para explicar completamente o fenômeno. Apesar disso, as médias das velocidades para ambos os conjuntos exibem um comportamento similar, como se fossem a mesma curva deslocada verticalmente para outra posição. Isso sugere que, embora os pontos individuais apresentem dispersão significativa e até pontos coincidentes ou valores próximos entre pontos de diferentes curvas, as médias mantêm uma tendência de aumento de velocidade similar em ambos os casos. Ainda assim, a sensibilidade dos conjuntos de menor massa às forças externas, devido à sua menor inércia, pode explicar a redução observada na velocidade, apontando para a existência de variáveis desconhecidas que influenciam o comportamento dinâmico do processo.

#### **4.1.3 Efeitos da Pressão da Mola (Pré-carga)**

Nesta seção, são apresentados os efeitos sobre a solda observados para cada um dos dispositivos analisados, abrangendo três aspectos principais: análise radiográfica para identificação de possíveis defeitos como descontinuidades internas, ensaios de flexão para verificação mecânica da solda e análise de macrografias para observação das áreas de material fundido e suas características. Cada resultado é descrito detalhadamente, acompanhado figuras e tabelas complementarias.

Devido a restrições operacionais do equipamento de radiografia, as amostras foram inclinadas em 30° para garantir a penetração completa dos raios X, dito arranjo só foi usado para as amostras do processo com descarga capacitiva. Nas radiografias obtidas, na Figura 4.6 observa-se claramente o corpo do pino, representado como uma área mais clara nas imagens. Além disso, é possível identificar a formação correta dos colares ao redor dos flanges, indicando um encaixe adequado nesta região. Não foram detectados defeitos maiores ou descontinuidades significativas nas amostras, sugerindo uma qualidade satisfatória do processo neste dispositivo.

Figura 4.6 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo MDC



Fonte: elaborado pelo autor

Conforme o teste de flexão apresentado na Tabela 4.4, o dispositivo demonstrou um comportamento satisfatório em todo o seu intervalo operacional. A única exceção foi uma falha registrada no pino M8 submetido a uma pré-carga mínima, essa falha foi rastreada especificamente na primeira solda realizada do dia, logo após o acionamento da fonte e o início do processo. Não foi possível determinar, no escopo deste estudo, o mecanismo exato responsável por esse comportamento singular na soldagem inicial. Contudo, sua ocorrência foi claramente perceptível, inclusive por meio de um ruído significativamente mais elevado do que o habitual durante o processo. Diante disso, recomenda-se a realização de investigações adicionais voltadas à compreensão desse fenômeno, possivelmente relacionado às características próprias da fonte de solda ou a propriedades intrínsecas do circuito elétrico do sistema de soldagem. Desta forma, o mecanismo evidencia alta robustez operacional, alcançando resultados consistentes e satisfatórios em toda a sua faixa operacional.

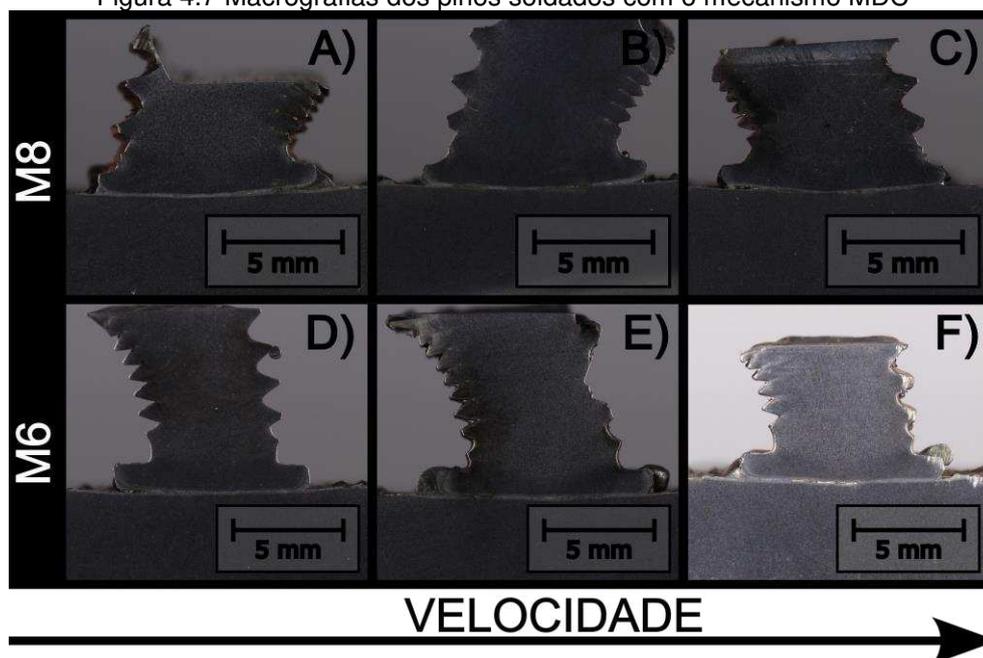
Tabela 4.4 Teste de flexão (MDC): (✓) Aprovado, (✗) Não Aprovado

Pré-Carga	Teste de Flexão	
	M6	M8
Mínima	✓✓✓✓✓	✗✓✓✓✓
Média	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
Máximo	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓

Fonte: elaborado pelo autor

Nas macrografias analisadas, observa-se variação nas áreas medidas, conforme detalhado na Tabela 4.5, embora visualmente, conforme ilustrado na Figura 4.7, essas diferenças não se apresentem de forma significativa. Um aumento notável na energia média foi registrado para os pinos M8 no parâmetro intermediário. Essa variação energética foi atribuída ao comportamento do arco elétrico sob diferentes condições de pré-carga: com o parâmetro máximo, a alta velocidade leva o pino rapidamente ao curto-circuito, o que derruba a tensão a zero e interrompe a transferência de energia ao arco; já com pré-carga mínima, o arco não se sustenta, apagando-se e causando um atraso na condução da corrente, que é liberada apenas no momento do curto, novamente com tensão nula. Assim, os valores extremos de pré-carga resultam em perda de energia no arco devido a curtos-circuitos por mecanismos distintos, o que explica a redução energética observada nesses casos em comparação ao parâmetro intermediário. Em relação à formação de bolhas (descontinuidades), é evidente o aumento de sua presença com a elevação da velocidade. Isso ocorre devido à relação direta entre a velocidade e o tempo de arco, uma vez que o arco permanece ativo durante o descenso até o ponto de contato. Assim, velocidades mais altas resultam em tempos de arco menores, permitindo que as bolhas tenham menos tempo para escapar, pois estas se deslocam à mesma velocidade do metal líquido. Dessa forma, estabelece-se uma relação direta entre a presença de bolhas e a velocidade aplicada como estabelecido por Oh (2007) desde a perspectiva da força da mola que como apresentado no item 2.6.1 tem relação direta com a velocidade de avanço.

Figura 4.7 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo MDC



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.5 Áreas e energias experimentais (MDC)

Pré-carga	M6			M8		
	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostrada (J)	Energia Média (J)	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostrada (J)	Energia Média (J)
6	1,71	421,0	417,4	1,86	638,0	632,0
3	3,00	429,0	427,8	2,08	920,0	848,2
0	3,00	444,0	438,6	3,30	636,0	637,8

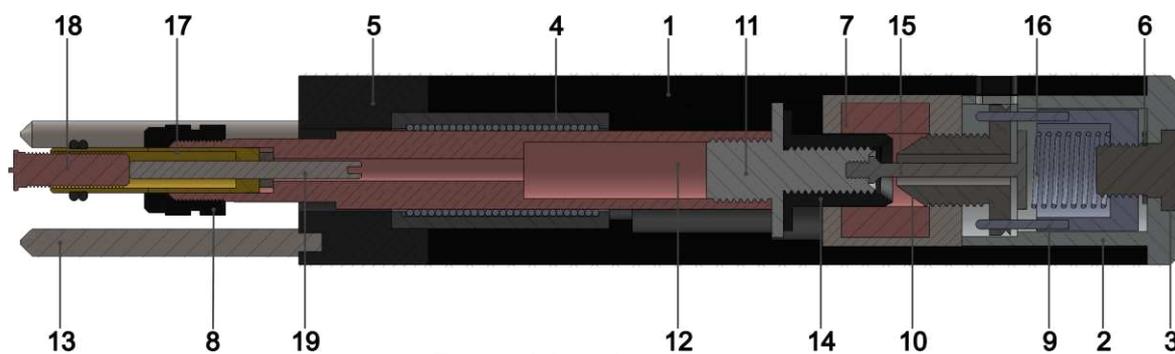
Fonte: elaborado pelo autor

## 4.2 SOLENOIDE MOLA (DC)

### 4.2.1 Estrutura SMDC

Este mecanismo integra um sistema solenoide-mola com um sistema de pistão rígido (várias peças conectadas rigidamente em série) que atravessa o conjunto desde a pinça até a parte traseira do mecanismo (Figura 4.8). A seguir, detalham-se os componentes principais (Tabela 4.6) e o funcionamento deste sistema.

Figura 4.8 Estrutura interna do mecanismo solenoide mola (SMDC)



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.6 Lista de peças (SMDC)

Nº da Peça	Nome da Peça
1	Carcaça
2	Tampa traseira
3	Manipulo
4	Rolamento Linear
5	Tampa Frontal
6	Chaveta
7	Solenoide
8	Porca
9	Transmissão
10	Batente Interno
11	Isolamento Polimérico
12	Pistão de Trabalho
13	Hastes Fixos
14	Núcleo
15	Haste de Conexão com a Mola
16	Mola de Trabalho
17	Pinça
18	Pino
19	Batente Pinça

Fonte: elaborado pelo autor

O pistão de trabalho (12) é o eixo central do mecanismo. Em sua parte frontal, o pistão contém o sistema de acoplamento das pinças (17), que segura o pino (18) durante o processo de soldagem. Esse pistão é alojado em um rolamento linear (4), o que permite um movimento suave e alinhado ao longo do seu curso dentro do mecanismo. O rolamento minimiza o atrito e garante um deslocamento linearmente controlado do pistão.

Na parte traseira do pistão de trabalho, encontra-se uma peça polimérica (11) que atua como elemento de acoplamento e isolamento, evitando fugas da corrente de

soldagem para o solenoide (7). Esta peça está conectada ao núcleo (14) do solenoide e age como um conector rígido, transmitindo o movimento gerado pelo núcleo ao pistão de trabalho sem comprometer a estabilidade do sistema. Esse design garante que o pistão se mova de maneira única e sincronizada com o solenoide.

O núcleo do solenoide possui uma haste (15) que se estende até a parte posterior do mecanismo, prolongando-se além do próprio solenoide. Em sua extremidade, a haste está conectada a um prato, sobre o qual se apoia uma mola (16) de compressão. Esta mola exerce pressão sobre o prato e está apoiada em uma superfície rígida na estrutura do mecanismo com uma pré-carga inicial que influencia diretamente a velocidade de avanço do pistão durante o processo de soldagem. O conjunto de peças, desde o pistão de trabalho, passando pelo acoplamento polimérico, núcleo, haste e prato, forma o pistão rígido deste mecanismo.

Entre o prato mencionado e o corpo do solenoide, está localizada uma peça móvel (10) que atua como batente, limitando o movimento interno do núcleo do solenoide. Esta peça regula tanto o gap do processo de soldagem (a distância que se afasta o pino da superfície da peça de trabalho) no momento de ativação do solenoide, quanto a compressão da mola, influenciando diretamente a velocidade de avanço do pino. Ao controlar o deslocamento do núcleo e, conseqüentemente, a compressão da mola, essa peça permite que a velocidade de avanço do pino seja devidamente ajustada de acordo com as características da soldagem a ser realizada.

#### **4.2.2 Movimento SMDC**

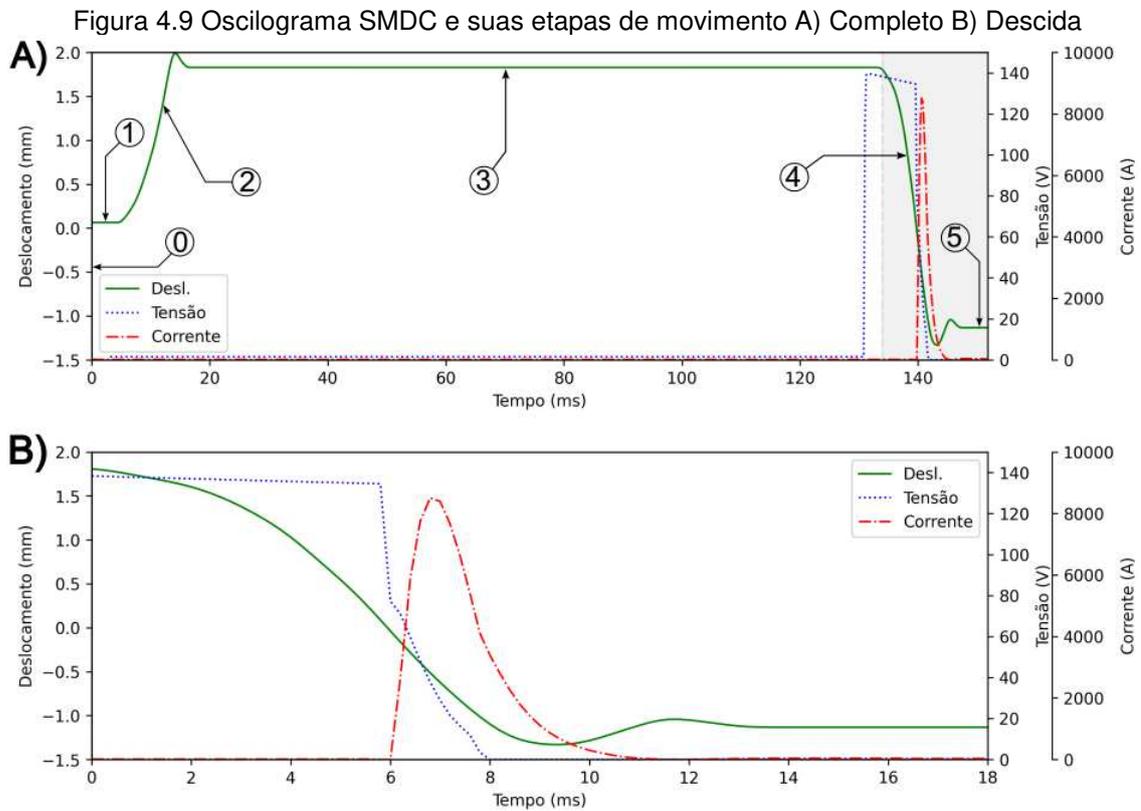
No processo de soldagem por descarga capacitiva com gap, foram realizadas cinco soldagens com pinos M6 e M8. O parâmetro de gap foi ajustado para 0, 4 e 7 mm, sendo o valor médio de 4 mm utilizado como referência, dado que o fabricante não fornece recomendações específicas. Esse ajuste corresponde ao valor intermediário da faixa permitida pelo dispositivo. As tensões de carga dos capacitores foram ajustadas para 140 V e 180 V para os pinos M6 e M8, respectivamente. O resumo dos parâmetros encontra-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Parâmetros experimentais (SMDC)

Parâmetro de Soldagem	M6	M8
Tensão de Carga [V]	140	180
GAP [mm]	0-4-7	0-4-7

Fonte: elaborado pelo autor

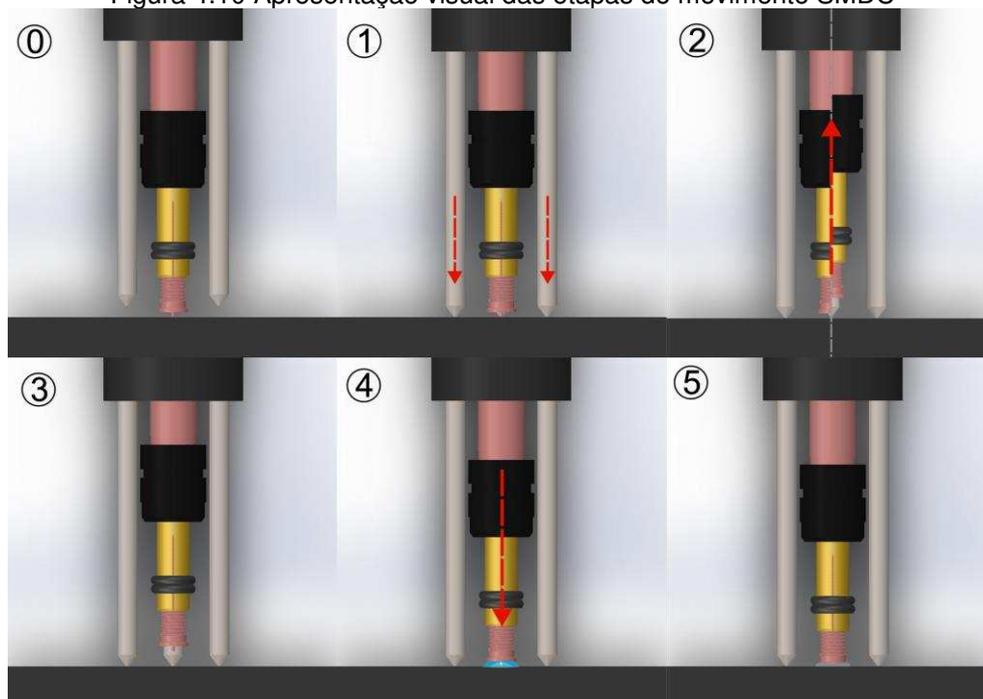
Assim como na análise anterior, cinco soldagens foram realizadas para cada conjunto de parâmetros, observando-se uma consistência nos movimentos. Um gráfico representativo de deslocamento versus tempo (Figura 4.9) foi selecionado aleatoriamente para descrever o ciclo de trabalho do mecanismo, que apresenta cinco etapas e dois movimentos principais.



Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 0, o dispositivo encontra-se em repouso, sem contato com a superfície de trabalho. Essa posição inicial reflete o estado estático do mecanismo antes do início do ciclo de soldagem. Na Figura 4.10 pode-se acompanhar visualmente as etapas apresentadas no oscilograma.

Figura 4.10 Apresentação visual das etapas do movimento SMDC



Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 1, o dispositivo é apoiado na superfície de trabalho, preparando-se para o movimento. Este posicionamento inicial absorve a protrusão para posteriormente atingir o gap configurado ao iniciar o ciclo de compressão.

Na Etapa 2, ocorre o primeiro movimento automático, comandado pelo solenoide, que realiza uma retração até alcançar o gap configurado previamente. Esse movimento aumenta a compressão da mola, permitindo atingir logo a velocidade desejada no avanço do pistão.

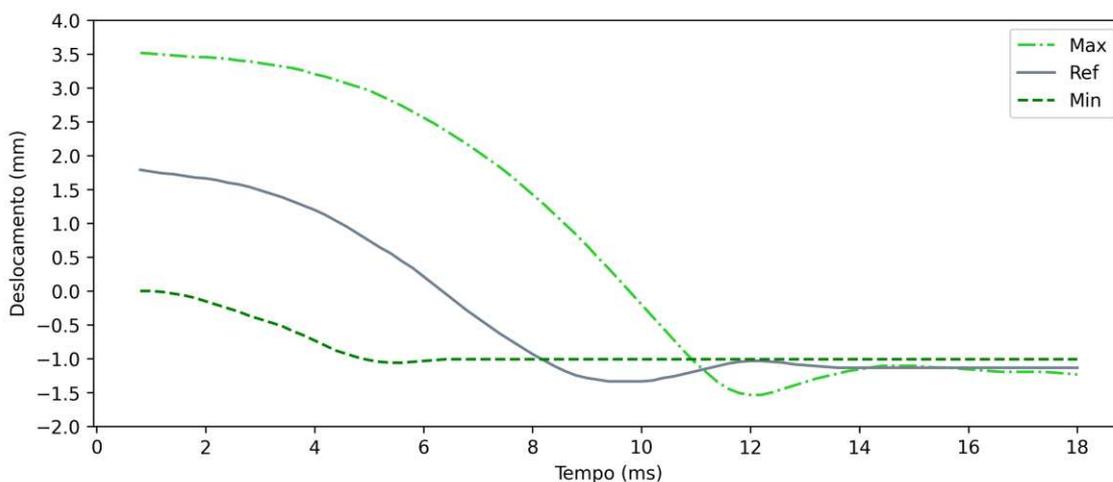
Já na Etapa 3 foi observado um tempo de espera entre a retração e o descenso, atribuído ao delay do sistema de controle ao ativar e desativar o solenoide. Esse atraso não impacta o processo elétrico, pois ocorre antes do fechamento do circuito.

Na Etapa 4, inicia-se o segundo movimento automático, quando o pistão é liberado pelo solenoide e o pino desce em direção à peça de trabalho. O gráfico do movimento resultante assemelha-se ao início de uma onda senoidal, corroborando a teoria do movimento harmônico simples descrita anteriormente. O circuito elétrico se fecha quando o pino toca a peça, permitindo a soldagem. Em alguns casos, observou-se que o arco elétrico se inicia antes do contato devido à ionização do ar por correntes elevadas (~10.000 A). O processo é finalizado na etapa 5 com a solidificação do material

A velocidade média durante o descenso foi de 371,8 mm/s para pinos M6 e 304,86 mm/s para pinos M8, com desvios padrões de 6,45 mm/s e 63,24 mm/s, respectivamente. A diferença nos desvios aponta inconsistências nos resultados para os pinos M8, não foi possível identificar esses fatores no presente trabalho, mas alguns deles são já conhecidos e mencionados por Trillmich, (2023) tais como atritos internos ou desgaste de componentes, para citar algumas das hipóteses. O ciclo de trabalho teve duração total de aproximadamente 140 milissegundos, refletindo alta repetitividade no mecanismo.

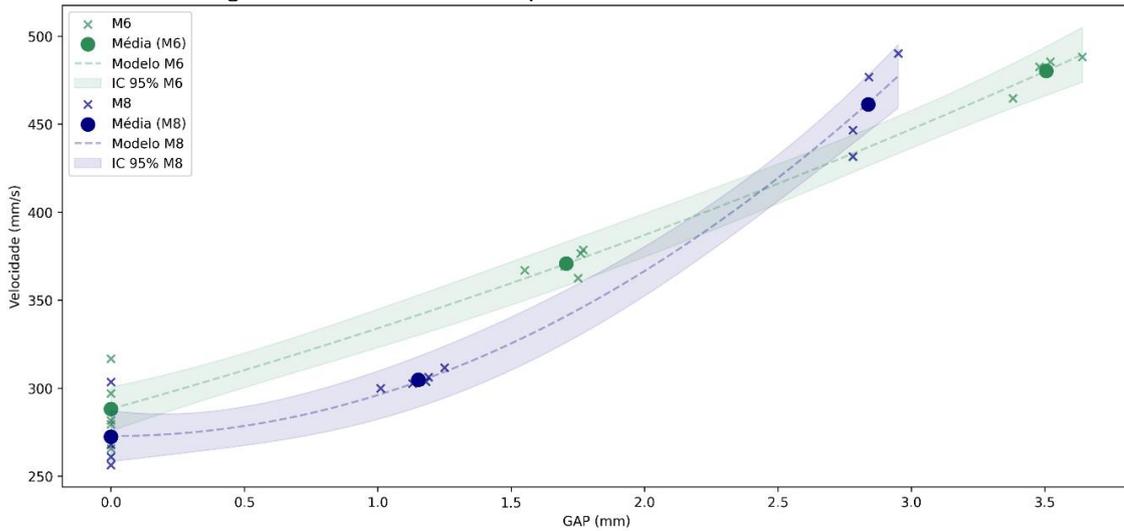
A Figura 4.11 ilustra as diferenças de deslocamento entre os parâmetros testados em relação ao gap de referência de 4 mm. Observa-se que apenas o gap de 0 mm atingiu o valor configurado, enquanto os demais ficaram próximos de metade do valor selecionado. No gráfico correspondente, nota-se que o movimento é iniciado a partir de diferentes alturas, que representam os gaps efetivamente alcançados. Uma característica relevante é que os gaps configurados não correspondem exatamente aos valores efetivos, como evidenciado na Figura 4.12, onde os movimentos iniciam em aproximadamente metade do valor configurado no dispositivo. Por exemplo, o gap de 7 mm iniciou o movimento em cerca de 3,5 mm, seguindo a mesma tendência para outros parâmetros configurados, no caso dos pinos M6. Já na Figura 4.12, que resume as velocidades de todo o experimento, verifica-se uma diferença entre os gaps alcançados pelos pinos M6 e M8, com os últimos apresentando gaps efetivos cerca de 0,5 mm menores do que os pinos M6. A razão para essa discrepância não pôde ser determinada com base nas observações realizadas neste trabalho.

Figura 4.11 Faixa de operação SMDC



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.12 Velocidades experimentais do mecanismo SMDC



Fonte: elaborado pelo autor

Comparando os pinos M6 com os M8, observa-se que, mesmo com as mesmas configurações do dispositivo, os pinos M6 alcançaram velocidades maiores do que os pinos M8. Essa diferença pode ser atribuída aos gaps efetivos alcançados por cada tipo de pino, sendo que a menor distância disponível para aceleração no caso dos pinos M8 resulta em uma perda de velocidade em relação aos pinos M6. Vale destacar que essa diferença na velocidade é mais pronunciada para valores intermediários de gap do que para valores máximos. Além disso, os pinos M8 apresentaram maior dispersão nos pontos do diagrama com máximo gap, indicando uma maior variabilidade na velocidade durante o processo. Em alguns casos específicos, os pinos M8 atingiram velocidades superiores às dos pinos M6; no entanto, suas médias permaneceram inferiores. A Tabela 4.8 apresenta um resumo das médias de velocidade para cada conjunto de parâmetros analisados.

Tabela 4.8 Velocidades medias experimentais (SMDC)

GAP	Velocidades (mm/s)			
	M6		M8	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
S/GAP	288,10	10,63	272,40	22,49
Médio	371,81	6,45	304,86	63,24
Máximo	480,22	17,34	464,67	25,78

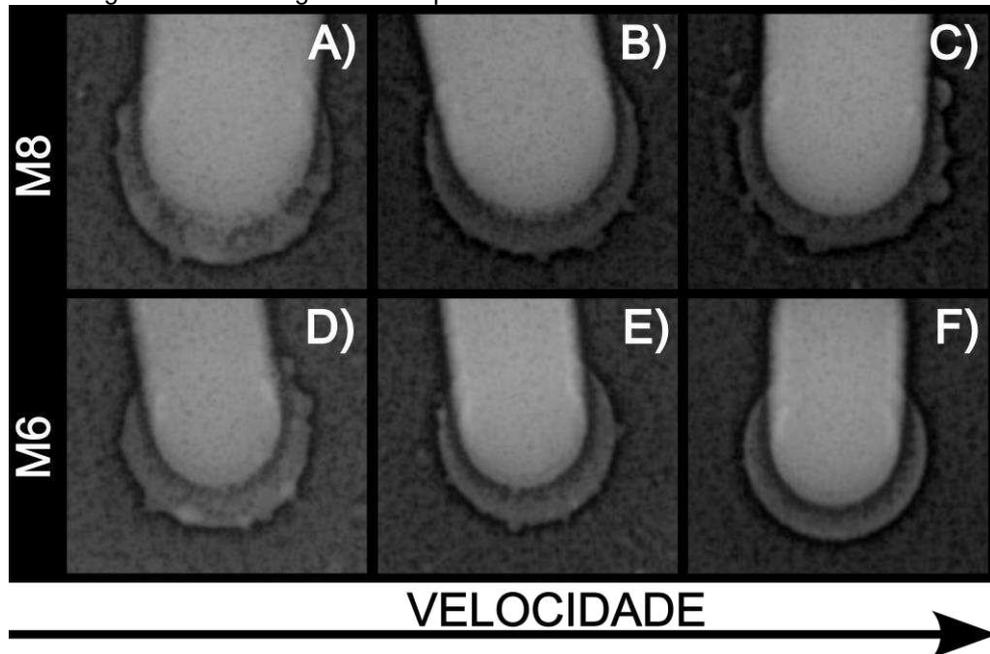
Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.2.3 Efeitos da Protrusão fixa e da relação GAP velocidade

Nas radiografias realizadas para este mecanismo (Figura 4.13), não foram observadas anomalias ou descontinuidades. As imagens confirmam a uniformidade

nas amostras, sugerindo que o processo de soldagem ocorreu sem irregularidades detectáveis por este método.

Figura 4.13 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo SMDC



Fonte: elaborado pelo autor

No teste de flexão na Tabela 4.9 observam-se diferenças destacáveis no desempenho do mecanismo em relação ao processo com contato. Cerca de 40% das amostras submetidas ao GAP máximo falharam no teste de flexão, enquanto apenas uma amostra apresentou falha no GAP intermediário, indicando uma tendência de maior confiabilidade para faixas intermediárias de operação. Quando o mecanismo foi configurado para operar sem GAP, simulando o processo com contato direto, todas as amostras falharam completamente, sem apresentar uniões soldadas satisfatórias.

Tabela 4.9 Teste de flexão (SMDC): (✓) Aprovado, (✗) Não Aprovado

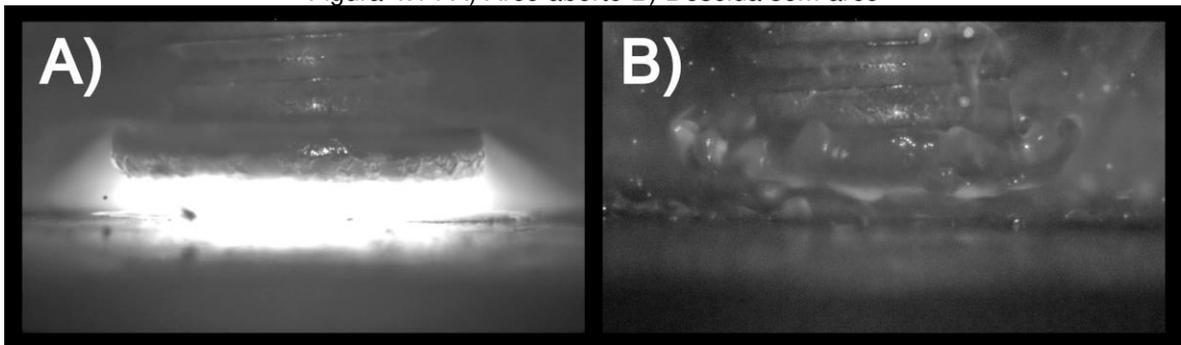
GAP	Teste de Flexão	
	M6	M8
S/GAP	✗✗✗✗✗	✗✗✗✗✗
Médio	✓✓✓✓✓	✓✓✓✗✓
Máximo	✓✓✓✗✗	✓✓✗✗✓

Fonte: elaborado pelo autor

É importante destacar que essas falhas não foram detectadas nas radiografias, uma vez que as superfícies líquidas fizeram contato e aparentaram estar unidas, quando ocorre solidificação prematura, as poças de fusão não se misturam de forma completa, estabelecendo contato apenas parcial entre regiões já solidificadas. Essa

condição pode impedir a formação de uma junta metalurgicamente coesa, resultando em descontinuidades como falta de fusão ou inclusão de interface sólida. A causa desse comportamento foi identificada por meio de filmagens de alta velocidade (Figura 4.14 e Tabela 4.10), que mostraram que o arco elétrico se apagou devido à incapacidade da mola de acelerar rapidamente e aproximar as peças, reduzindo a resistência e mantendo o arco em operação.

Figura 4.14 A) Arco aberto B) Descida sem arco



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.10 Código QR (Figura 4.14)

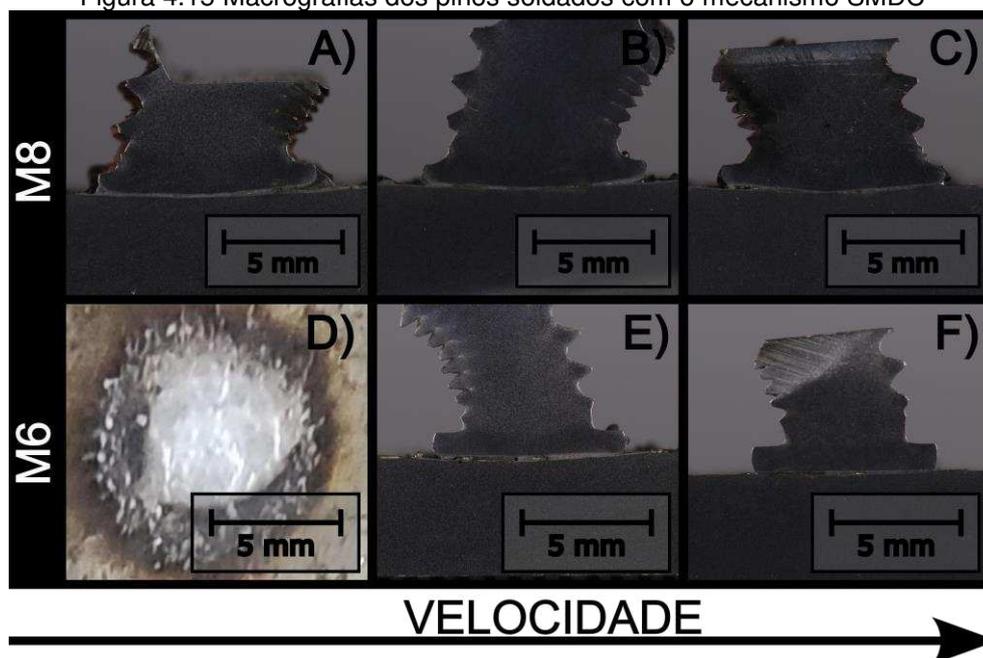


**Site:** YouTube  
**Canal:** Labsolda UFSC  
**Nome:** Stud Welding por Descarga Capacitiva com GAP, Parâmetro Crítico (GAP 0 mm)  
**Link:** <https://www.youtube.com/watch?v=652vJGRE2Tc>

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas macrografias deste mecanismo (Figura 4.15), observam-se descontinuidades semelhantes às registradas no processo com contato, mas, nesta ocasião, essas descontinuidades não seguiram a lógica de aumento proporcional à elevação da velocidade. Apesar de a hipótese sobre o tempo de arco descrita por Oh (2007) continuar aplicável, os resultados sugerem que outros fatores também influenciam a formação de bolhas neste contexto, o que requer comprovações futuras.

Figura 4.15 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo SMDC



Fonte: elaborado pelo autor

Além, as áreas medidas nas macrografias não apresentaram diferenças significativas. Um fato que chama atenção é a alta energia registrada para os pinos M8 sem GAP (Ver Tabela 4.11). Que apesar desse aumento substancial de energia, nenhuma soldagem satisfatória foi obtida.

Tabela 4.11 Áreas e energias experimentais (SMDC)

GAP	M6			M8		
	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostrada (J)	Energia Média (J)	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostrada (J)	Energia Média (J)
Máximo	1,19	393,0	400,8	1,98	440,0	364,6
Médio	2,04	357,0	380,0	2,12	462,8	601,4
Mínimo	-	481,0	492,6	-	898	890,4

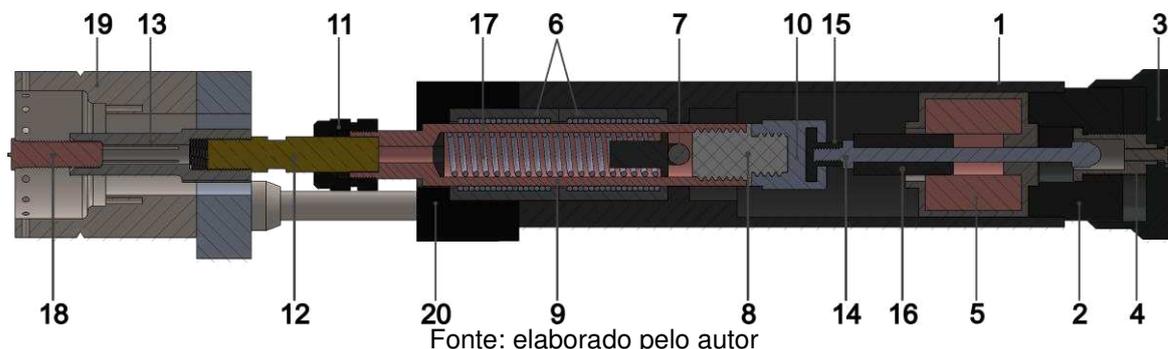
Fonte: elaborado pelo autor

### 4.3 SOLENOIDE MOLA (AR)

#### 4.3.1 Estrutura SMAR

Para o processo de SW por arco retraído, o mecanismo combina elementos como um pistão rígido em uma configuração solenoide-mola (Figura 4.16). A seguir, são descritos seus principais componentes (Tabela 4.12) e funcionamento.

Figura 4.16 Estrutura interna do mecanismo com mola (SMAR)



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.12 Lista de peças (SMAR)

Nº da Peça	Nome da Peça
1	Carcaça
2	Tampa traseira
3	Manipulo
4	Batente Externo
5	Solenóide
6	Rolamento Linear
7	Limitador Passante
8	Isolamento Polimérico
9	Pistão de Trabalho
10	Conexão eixo-haste
11	Porca
12	Adaptador de Pinça
13	Pinça
14	Haste
15	Conexão
16	Núcleo
17	Mola de Trabalho
18	Pino
19	Suporte
20	Tampa frontal

Fonte: elaborado pelo autor

O pistão de trabalho (9) está alojado em rolamentos lineares (6), permitindo um movimento fluido e restrito ao longo de um curso de 6 mm. Este componente possui uma ranhura lateral, através da qual passa um pino (7) transversal fixado à estrutura do mecanismo. Esse pino limita o movimento do pistão, garantindo que seu deslocamento esteja restrito ao intervalo de trabalho predeterminado.

No interior do pistão de trabalho encontra-se uma mola (17) de compressão, que é apoiada de um lado no pistão e, do outro, no parafuso passante transversal que

serve como base fixa. Esta mola transmite a energia acumulada para o pistão de trabalho. A mola, em combinação com o movimento controlado e restrito do pistão, assegura que o processo de soldagem seja estável e robusto dentro dos limites do sistema.

Na extremidade posterior do pistão, há uma peça de polímero (8) que serve tanto como acoplamento quanto como isolante elétrico. Este componente evita fugas de corrente para o solenoide e garante a transmissão adequada do movimento gerado pelo núcleo (16) do solenoide (5) para o pistão. A peça de polímero mencionada está conectada a uma haste (14), na qual o núcleo do solenoide está fixado, transmitindo o movimento ao conjunto mencionado que conforma o pistão rígido.

A haste continua seu percurso através do solenoide até a extremidade posterior do mecanismo, onde está localizado o mecanismo de regulação de recuo. Este mecanismo é um batente (4) móvel externo que permite ajustar a posição do fundo do sistema por meio de um sistema de rosca alocado na tampa traseira (2). Ao girar o manipulador (3) desse mecanismo, o fundo se estende ou se retrai, proporcionando mais ou menos espaço para que o solenoide atue dentro do intervalo de trabalho de 6 mm. Este método é responsável pelo controle tanto da velocidade quanto da altura do arco, cujo efeito será discutido nos capítulos seguintes.

#### **4.3.2 Movimento SMAR**

No contexto da soldagem de pinos, é importante compreender claramente o conceito de *drop speed* antes de avançar com os demais conceitos e análises apresentados nesta seção. Na soldagem de pinos, o termo *drop speed* refere-se à velocidade média do deslocamento inicial do pino, estimada a partir de ensaios sem ignição do arco. Esta velocidade é calculada com base na razão entre a distância de recuo (*lift*) e o tempo de queda (*drop time*), que corresponde ao tempo de queda livre do pino até a posição inicial depois do movimento de recuo comandado pelo solenoide.

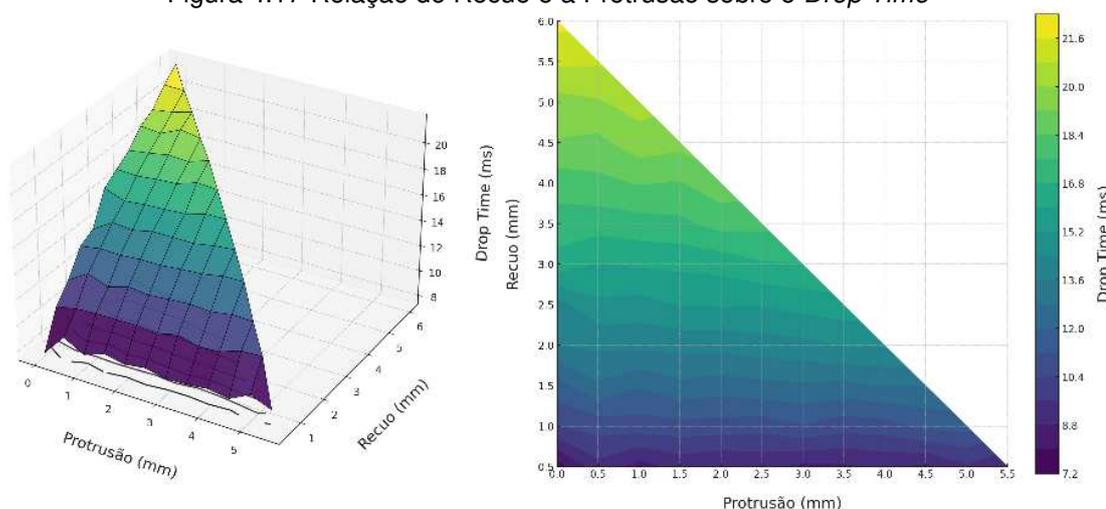
O termo *drop time* é amplamente utilizado na literatura científica e nos sistemas de medição incorporados a equipamentos comerciais empregados na indústria, especialmente como referência para ajuste e verificação do comportamento do sistema de recuo. A partir dessa medida, a *drop speed* é determinada como parâmetro auxiliar na pesquisa, quantificando a velocidade do sistema em deslocamento natural, sem controle ativo ou interação térmica além de finalizar na peça sólida.

Por fim, é importante destacar que o termo *drop speed* não deve ser confundido com o termo velocidade de aproximação (*approach rate*). Embora ambos estejam relacionados ao deslocamento inicial do pino, tratam de fenômenos distintos. Enquanto a *drop speed* se refere exclusivamente ao movimento livre e não controlado, observado em ensaios sem ignição do arco, o conceito de *approach rate* envolve outras condições operacionais além do contato com a poça de fusão e será definido e discutido com mais detalhes nas seções seguintes deste documento.

Nas seções anteriores foram descritos mecanismos baseados em protrusão fixa, mas nesta seção é introduzido o conceito de protrusão variável, um fator utilizado no processo de arco retraído e ausente na descarga capacitiva. O fabricante fornece tabelas que não apenas contêm informações sobre os parâmetros elétricos e de recuo para cada tamanho de pino, mas também especificam um valor de protrusão. Essa protrusão é absorvida pela mola quando o pino é apoiado sobre a peça de trabalho, gerando uma força adicional sobre a mola. Essa força se soma à pré-carga inicial já existente no dispositivo, enquanto o recuo contribui com uma compressão extra durante o processo de soldagem.

Essa pré-carga induzida pela protrusão é hipotetizada como um fator que pode influenciar na velocidade do processo. Para estudar esse efeito, foi projetado um experimento no qual os parâmetros de recuo e protrusão foram variáveis dentro dos limites operacionais do dispositivo. Especificamente, cada uma dessas variáveis foi ajustada em um intervalo de 0 a 6 milímetros, com incrementos de 0,5 milímetros. Para cada configuração, foram registradas 10 repetições do tempo de queda (*droptime*), com os dados obtidos, foi elaborada a Figura 4.17 que permite avaliar as influências individuais e combinadas do recuo e da protrusão sobre o *droptime*.

Figura 4.17 Relação do Recuo e a Protrusão sobre o *Drop Time*



Fonte: elaborado pelo autor

Para conferir estatisticamente as hipóteses foi realizada uma análise de variância (ANOVA), observando que o recuo tem um impacto altamente significativo sobre o tempo de queda, como indicado pelo valor elevado do estatístico F (1043.86) e um p-valor inferior a 0.05 ( $<0.05$ ). Por outro lado, a protrusão também apresentou uma influência estatisticamente significativa, embora menos pronunciada, com um F de 6.09. Esses resultados são detalhados na Tabela 4.13 a seguir, que apresenta os valores de soma de quadrados (SQ), estatístico F e p-valores para cada variável analisada. Tais dados reforçam a influência do recuo no processo e a quase nula participação da protrusão no processo, sendo a sua função principal mergulhar o pino na profundidade necessária na poça de fusão.

Tabela 4.13 Resultados do *t-student*

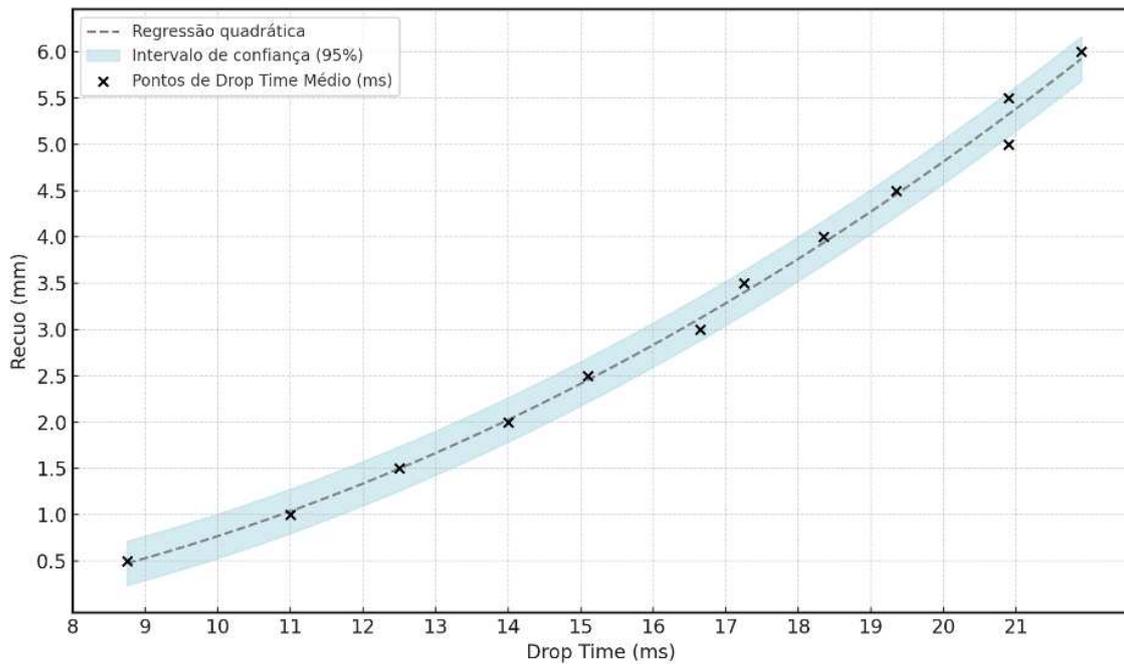
Variável	SQ	F	Valor-P
Recuo	843.66	1043.86	1,22E-53
Protrusão	4.92	6.09	2,08E+00

Fonte: elaborado pelo autor

Com base nisso, foi elaborada a Figura 4.18 projetado para servir como ferramenta na indústria, permitindo determinar o recuo apenas com base no *droptime* medido pela fonte de soldagem, eliminando a necessidade de instrumentos de medição adicionais. Este gráfico apresenta no eixo X valores de *droptime* variando entre aproximadamente entre 8 e 22 ms e eixo Y um intervalo de 0 a 6 mm para valores reais das variáveis medidas nos experimentos. Os pontos representados mostram a correlação clara entre os fatores analisados. A partir desses dados, foi

construída uma regressão quadrática que gera uma linha de tendência, permitindo interpolar valores intermediários de recuo a partir do droptime. Este gráfico constitui uma ferramenta útil na indústria para otimizar o processo de maneira eficiente.

Figura 4.18 Relação Drop Time sobre o Recuo



Fonte: elaborado pelo autor

No processo de soldagem por arco retraído, foram realizadas cinco soldagens com pinos M10 e M12. Os parâmetros utilizados foram baseados nas recomendações do fabricante (Tabela 4.14). Este movimento segue cinco etapas principais, divididas em dois movimentos principais: uma retração inicial controlada pelo solenoide e uma descida comandada pela mola.

Tabela 4.14 Parâmetros experimentais (SMAR)

(Continua)

<b>Parâmetro de Soldagem</b>	<b>M10</b>	<b>M12</b>
Corrente de soldagem [A]	700	850
Tempo de soldagem [ms]	180	250
Protrusão [mm]	1,2	1,2
Recuo [mm]	1,5	1,5
Proteção da poça	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>

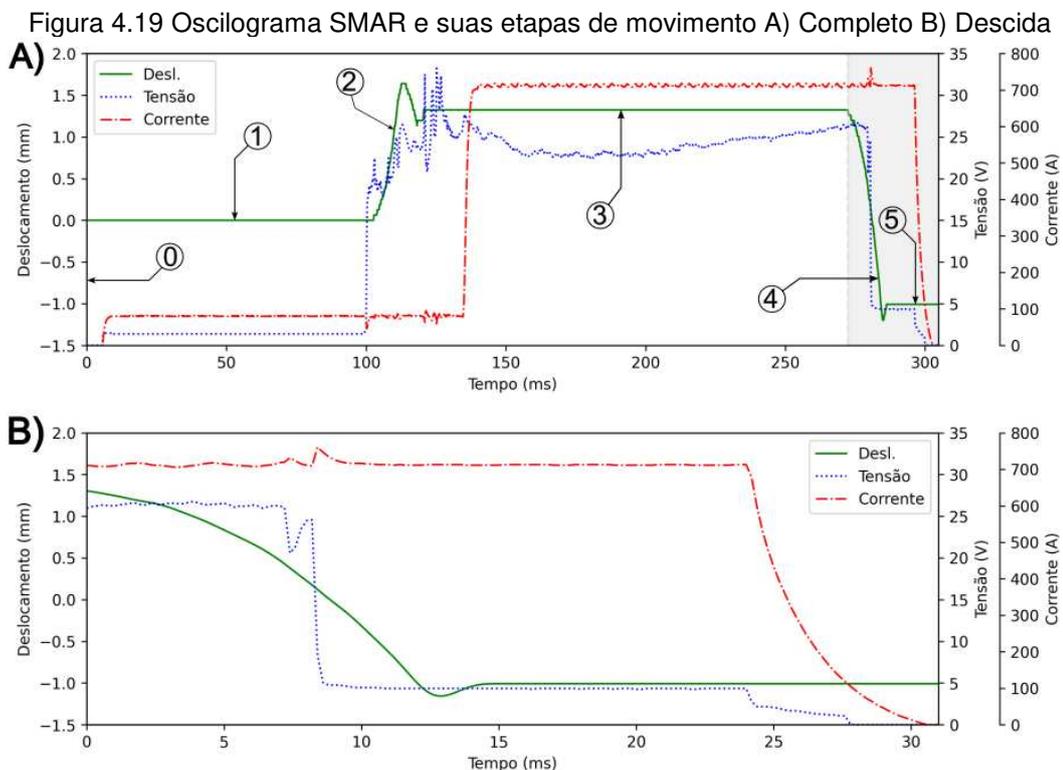
Tabela 4.14 Parâmetros experimentais (SMAR)

(Conclusão)

Parâmetro de Soldagem	M10	M12
Vazão [l/min]	10	10
Tempo de pré-gás [s]	1	1
Tempo de pré-corrente [ms]	40	40
Corrente SRM [A]	0,25	0,25

Fonte: elaborado pelo autor

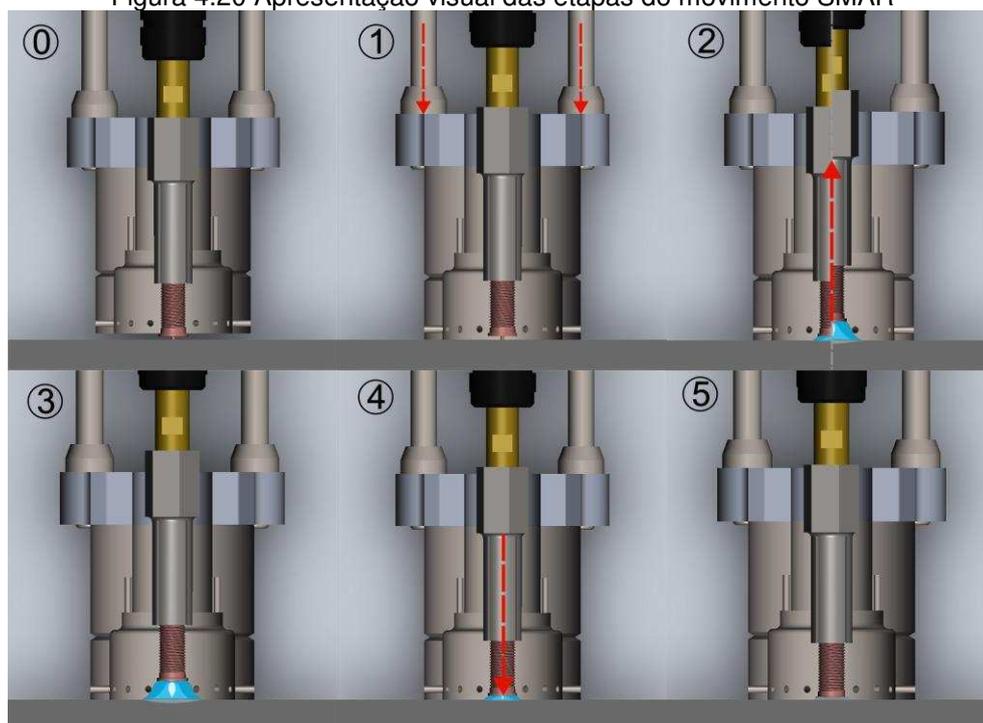
Na Etapa 0, observada no oscilograma na Figura 4.19 o dispositivo encontra-se em repouso, sem qualquer interação com a peça de trabalho.



Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 1, a pistola é posicionada contra a peça de trabalho, vencendo a protrusão e ajustando-se para o início do processo de soldagem. Durante essa fase, uma pré-corrente de 80 A é aplicada por 40 milissegundos, preparando o pino para a corrente principal. A primeira etapa do movimento inicia-se alguns milissegundos antes de finalizar esse período de pré-corrente. As etapas mencionadas são apresentadas visualmente na Figura 4.20.

Figura 4.20 Apresentação visual das etapas do movimento SMAR



Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 2, o solenoide é ativado, retraindo o pino até o recuo configurado. Diferentemente do processo de descarga capacitiva, onde o tempo de parada não é relevante, no arco retraído, o término da retração marca o início da corrente principal e do tempo configurado para manter o arco aberto. Esse tempo de parada torna-se uma variável crítica, pois define a duração do arco e, conseqüentemente, a quantidade de energia no processo. Durante esta etapa, o solenoide mantém o pino retraído na distância definida, sustentando o mecanismo enquanto o arco permanece ativo.

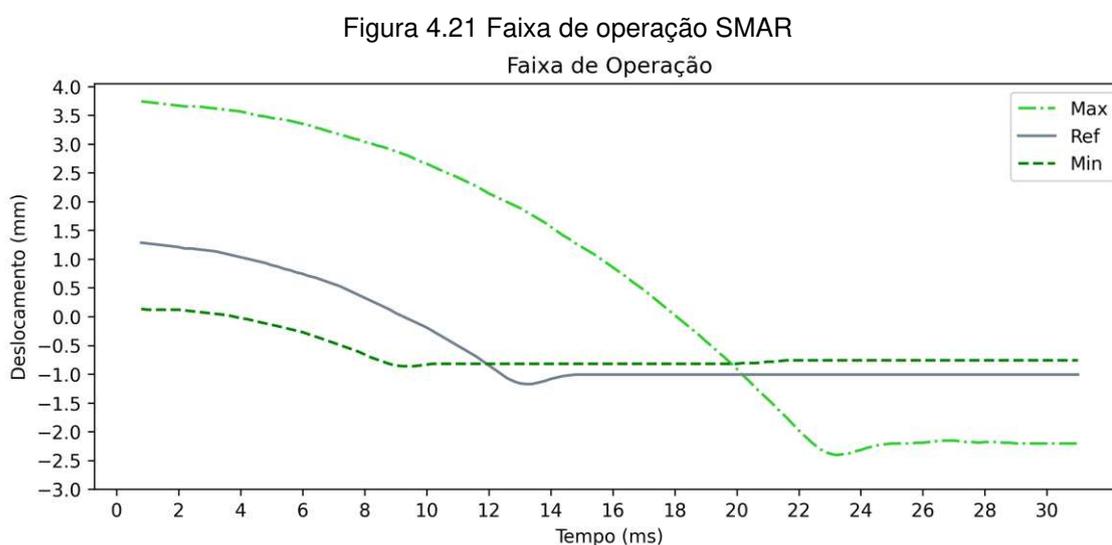
Na Etapa 3, o arco é mantido por um período pré-configurado. Essa fase é determinante para garantir a fusão adequada do pino com a peça de trabalho. O solenoide permanece ativo, controlando a posição do pino até que o tempo de arco configurado se complete.

Na Etapa 4, pouco antes do término do tempo de arco, o solenoide é desativado, liberando a mola e, com ela, a energia acumulada durante a retração. O pino é então impulsionado em direção à peça de trabalho, percorrendo a distância do recuo e parte da protrusão até impactar no fundo da poça de fusão. Durante esse movimento, o pino atinge a velocidade média projetada, descrevendo o início de uma onda senoidal característica do movimento harmônico simples (MHS).

Na Etapa 5, o pino faz contato com a peça de trabalho enquanto a corrente ainda está ativada. Alguns milissegundos após o impacto, a corrente é cortada, encerrando o ciclo de soldagem.

Neste teste inicial, foi documentada uma velocidade média de 204 mm/s, com desvio padrão de 14,5 mm/s, representando uma variação de velocidade de 7% entre os ciclos de trabalho. Embora esse valor seja considerado aceitável, há margem para melhorias na repetitividade do processo. Finalmente, é importante ressaltar que os tempos do ciclo de trabalho dependerão diretamente do tempo de soldagem selecionado, influenciando o comportamento geral do mecanismo.

Em uma análise comparativa entre os parâmetros de recuo, observa-se na Figura 4.21 o mesmo comportamento apresentado pelo mecanismo projetado para o processo com descarga capacitiva (Figura 4.11). Ou seja, com o aumento do recuo, verifica-se um aumento na velocidade. O parâmetro de referência, catalogado no experimento como parâmetro médio, pode ser comparado com os limites superior e inferior apresentados na Tabela 4.15. Esse tipo de mecanismo tende a ser comandado quase exclusivamente pelo recuo, uma vez que a protrusão foi relegada a um papel secundário, como mencionado em parágrafos anteriores.



Fonte: elaborado pelo autor

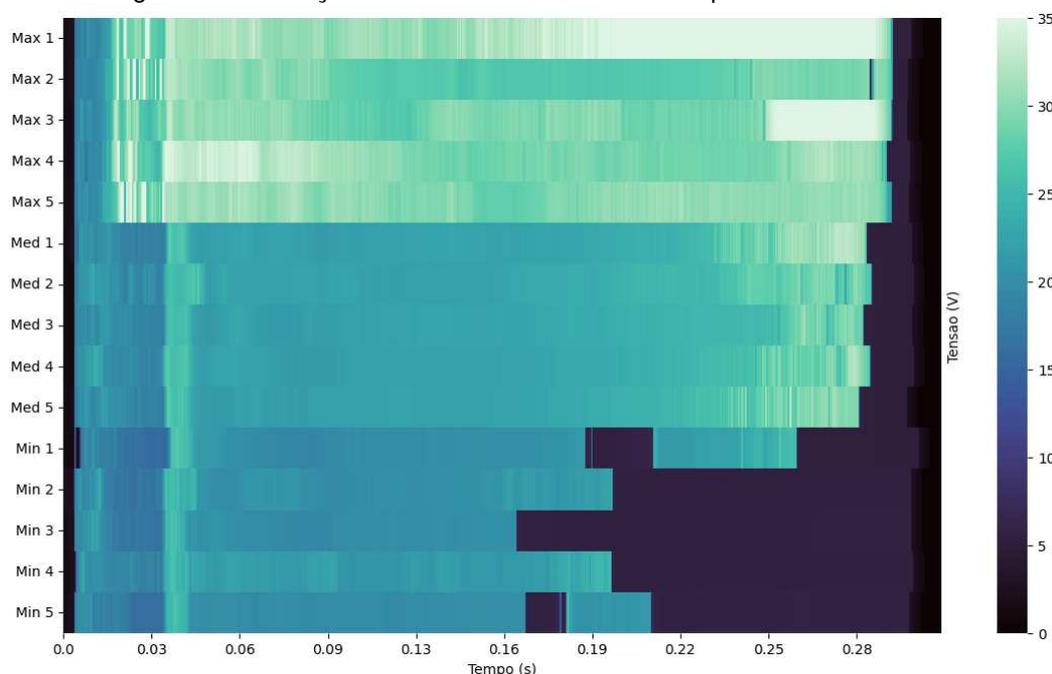
Tabela 4.15 Velocidades medias experimentais (SMAR)

Recuo	Velocidades (mm/s)			
	M10		M12	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Mínimo	128,66	21,35	80,85	x
Médio	204,01	14,57	203,98	10,68
Máximo	286,43	4,73	248,02	18,25

Fonte: elaborado pelo autor

Complexificando um pouco mais a situação, a altura do recuo influencia diretamente a distância do arco elétrico. Para ilustrar visualmente essa característica e comprovar esse efeito, foi criada a Figura 4.22, que exibe um "mapa de calor". No eixo Y, estão listadas todas as soldagens realizadas neste experimento, identificadas pelo parâmetro de recuo e pelo número de repetição; no eixo X, encontra-se uma escala de tempo correspondente ao processo selecionado. Este diagrama incorpora uma terceira variável representada por um gradiente de cores, que indica a variação de tensão ao longo do processo. Resumidamente, cada uma das faixas observadas no diagrama reflete a variação de tensão durante a realização da soldagem.

Figura 4.22 Variação da tensão nas amostras dos parâmetros testados



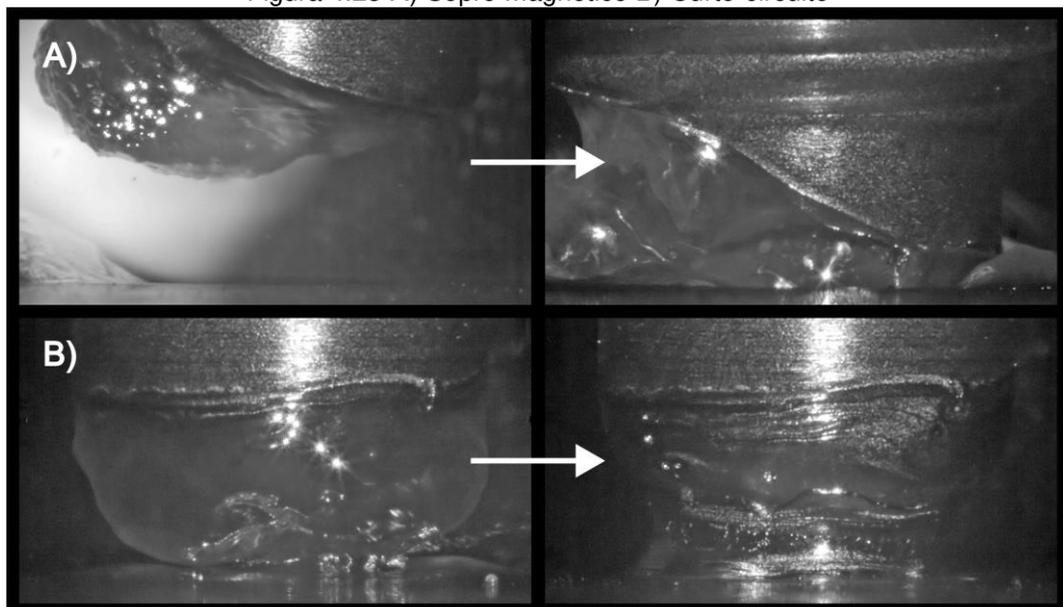
Fonte: elaborado pelo autor

No diagrama, destacam-se diversos pontos. Para os parâmetros máximos de recuo, observam-se cores mais claras, que, conforme o gradiente, indicam uma tensão maior. Isso, conseqüentemente, aumenta a potência do processo no circuito de soldagem, um aspecto que será discutido nos parágrafos seguintes. Os valores

médios, definidos como referência no experimento e recomendados pelo fabricante, demonstram certa estabilidade durante todo o processo, com um leve aumento na tensão ao final. Por fim, para o parâmetro mínimo, inicialmente os valores de tensão são similares aos de referência, mas apresentam um escurecimento abrupto na parte final. Este comportamento indica que a tensão tende a zero, sugerindo um curto-circuito durante o processo. Esse curto-circuito apaga o arco elétrico, mas mantém a corrente ativa, fazendo com que as partes envolvidas continuem aquecendo pelo efeito Joule. No entanto, esse aquecimento é insuficiente para substituir o arco, resultando em uma soldagem inadequada.

Adicionando a essa análise, conforme mencionado anteriormente, o recuo determina a distância inicial entre o pino e a superfície base, influenciando diretamente o comprimento do arco elétrico. Um recuo excessivo pode fazer com que o arco seja muito comprido, comprometendo sua estabilidade e dificultando a fusão adequada entre o pino e a peça de trabalho. Além disso, um arco mais longo é mais suscetível ao sopro magnético (*arc blow*) (Figura 4.23a e tabela 4.16a), um fenômeno em que as forças eletromagnéticas desviam o arco. Este efeito é especialmente relevante em processos que utilizam correntes elevadas, como é o caso da soldagem de pinos (*Stud Welding*). Portanto, ajustes precisos do recuo são essenciais para garantir a estabilidade do arco e a qualidade da soldagem.

Figura 4.23 A) Sopro magnético B) Curto-circuito



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.16 Códigos QR (Figura 4.23) A) Sopros magnético B) Curto-circuito



**A)**  
**Site:** YouTube  
**Canal:** Labsolda UFSC  
**Nome:** Stud Welding por Arco Retraído, Observação de Sopros Magnético  
**Link:** <https://youtube.com/shorts/Wpyt2n7XHzU>



**B)**  
**Site:** YouTube  
**Canal:** Labsolda UFSC  
**Nome:** Stud Welding por Arco Retraído, Observação de curto-circuito a causa de recuo insuficiente  
**Link:** <https://youtube.com/shorts/HVw0Yspajfs>

Fonte: Elaborado pelo autor

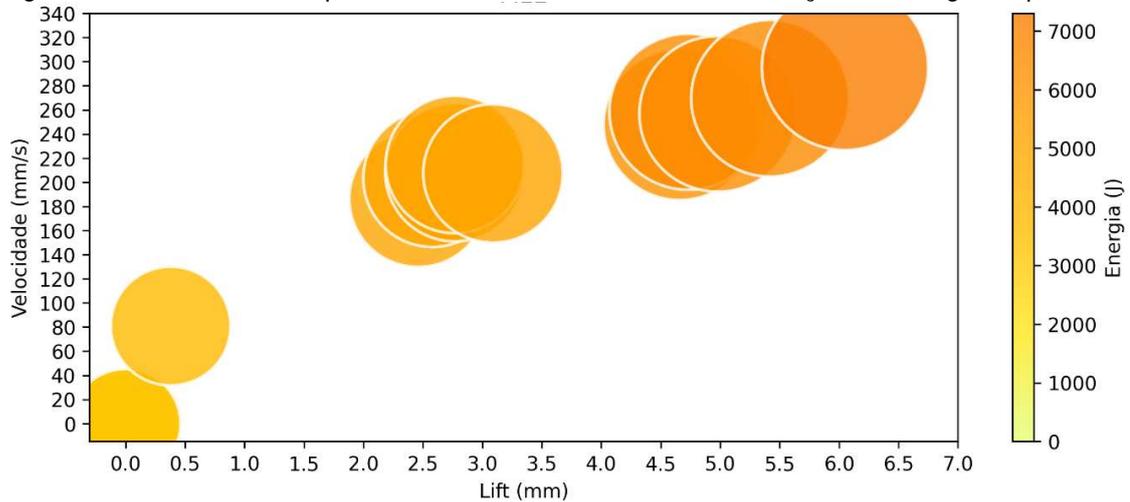
Continuando com o raciocínio sobre a alteração da tensão, modificar a distância de recuo do pino altera diretamente o comprimento do arco elétrico formado entre o pino e a peça de trabalho. Um recuo maior aumenta o comprimento do arco, elevando a resistência elétrica no circuito. Para manter a corrente de soldagem, a fonte de energia precisa compensar esse aumento de resistência aplicando uma tensão maior como observado na Figura 4.23b e Tabela 4.16b. Esse incremento na tensão resulta em uma maior entrega de potência ao arco, o que pode ser benéfico em casos em que é necessária energia adicional para garantir a fusão, especialmente em pinos de maior diâmetro.

Por outro lado, um recuo menor encurta o comprimento do arco, reduzindo a resistência do circuito. Isso diminui a necessidade de aplicar uma tensão elevada, concentrando a entrega de potência em uma região menor. No entanto, uma entrega de potência insuficiente pode comprometer a fusão adequada caso o recuo seja demasiado curto Tabela 4.22b.

Como apresentado nas análises anteriores, a Figura 4.24 ilustra a interação entre o recuo (em mm) e a velocidade (em mm/s). Esse diagrama, inicialmente, apresenta similaridade com o mecanismo de descarga capacitiva, razão pela qual foi adicionada uma terceira variável representando a energia de cada soldagem por meio de um gradiente de cores, além do tamanho de cada ponto. Observa-se um aumento de energia e uma maior dispersão para valores elevados de recuo efetivo, com valores superiores a 6000 J. Por outro lado, para valores mínimos de recuo, a energia diminui

significativamente, com alguns casos próximos de 0 e uma média em torno de 3000J. Já o parâmetro de referência, considerado médio, apresenta menor dispersão, com valores próximos de 5000 J, uma boa estimativa da energia ideal para este processo.

Figura 4.24 Velocidades experimentais do mecanismo SMAR e relação da energia do processo



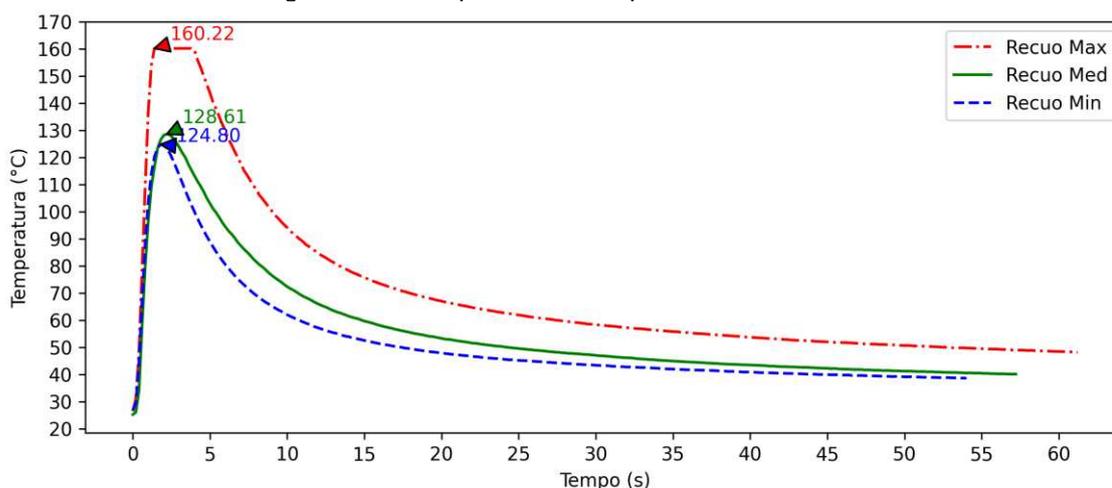
Fonte: elaborado pelo autor

### 4.3.3 Efeitos da variação da velocidade por meio da variação do recuo

A variação do recuo na soldagem de pinos tem um impacto significativo no comportamento do arco e, conseqüentemente, na qualidade da soldagem. A seguir, são detalhados alguns dos efeitos mais relevantes:

As curvas de temperatura apresentadas na Figura 4.25 mostram um aumento claro no aporte térmico com o aumento do recuo, corroborando os resultados observados por Marchione (2024). Sob condições de recuo máximo, os picos de temperatura foram os mais elevados, enquanto no recuo médio, os picos foram intermediários, coincidentes com os valores reportados na literatura, destacando-se como a condição mais eficiente para a fusão térmica. Já no recuo mínimo, os picos de temperatura foram os mais baixos, resultando em uma fusão inadequada. Esses dados confirmam que o aumento de velocidade, em consequência do aumento do recuo, intensifica o aporte térmico, impactando diretamente na qualidade do processo de soldagem.

Figura 4.25 Temperaturas nos parâmetros testados



Fonte: elaborado pelo autor

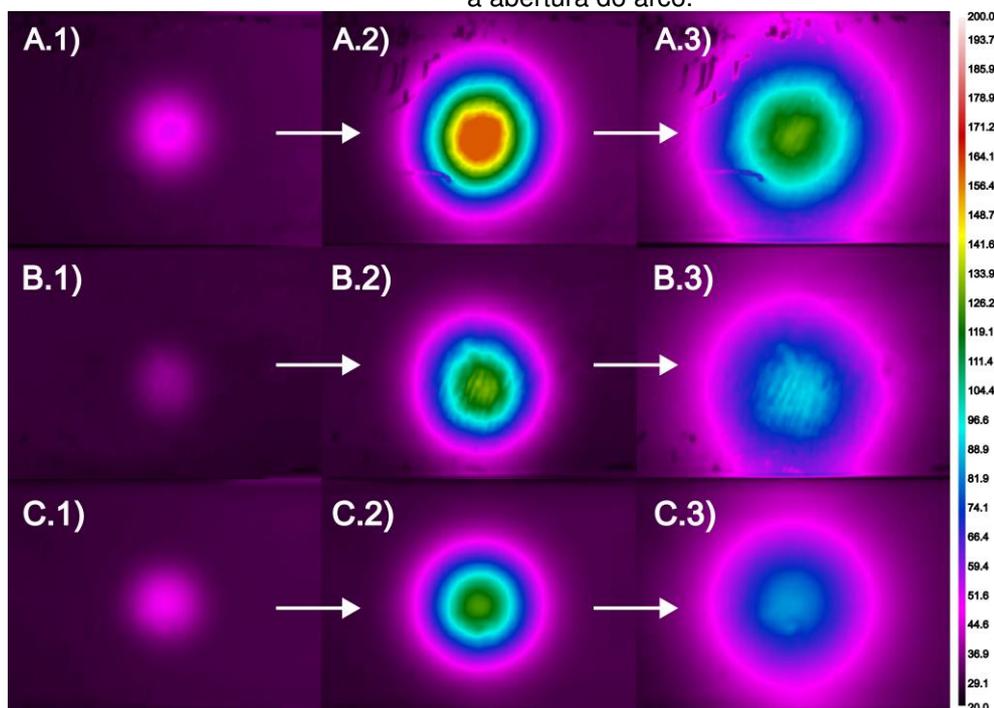
As imagens apresentadas na Figura 4.26 ilustram a evolução temporal da distribuição de calor no verso da chapa para diferentes valores do parâmetro recuo, sendo os resultados visuais coerentes com a caracterização prévia realizada por FERNANDES DA ROSA et al., (2022). As três linhas correspondem aos parâmetros de recuo máximo (linha superior), médio (linha intermediária, conforme recomendação do fabricante) e mínimo (linha inferior). As colunas, por sua vez, representam três instantes distintos da aquisição térmica: o momento da ignição do arco (à esquerda), o instante de temperatura máxima (ao centro) e, por fim, 60 segundos após a abertura do arco (à direita).

No caso do recuo máximo, a distribuição de calor apresenta um padrão mais intenso, com um pico térmico localizado, indicando uma concentração de energia. Apesar disso, essa configuração resulta em uma fusão ineficaz, pois a alta intensidade térmica gera defeitos e dispersão excessiva de material, conforme os resultados de macrografias e radiografias detalhados nos seguintes parágrafos.

Sob o recuo médio, a distribuição de calor é mais homogênea, com intensidade térmica intermediária e bem distribuída ao redor do ponto de soldagem. Essa condição favorece uma fusão equilibrada e colares bem formados.

Por outro lado, no recuo mínimo, a distribuição térmica é visivelmente mais fraca e menos extensa, refletindo um aporte térmico insuficiente para garantir a fusão adequada. Isso resulta em colares malformados e ausência de uma união eficiente.

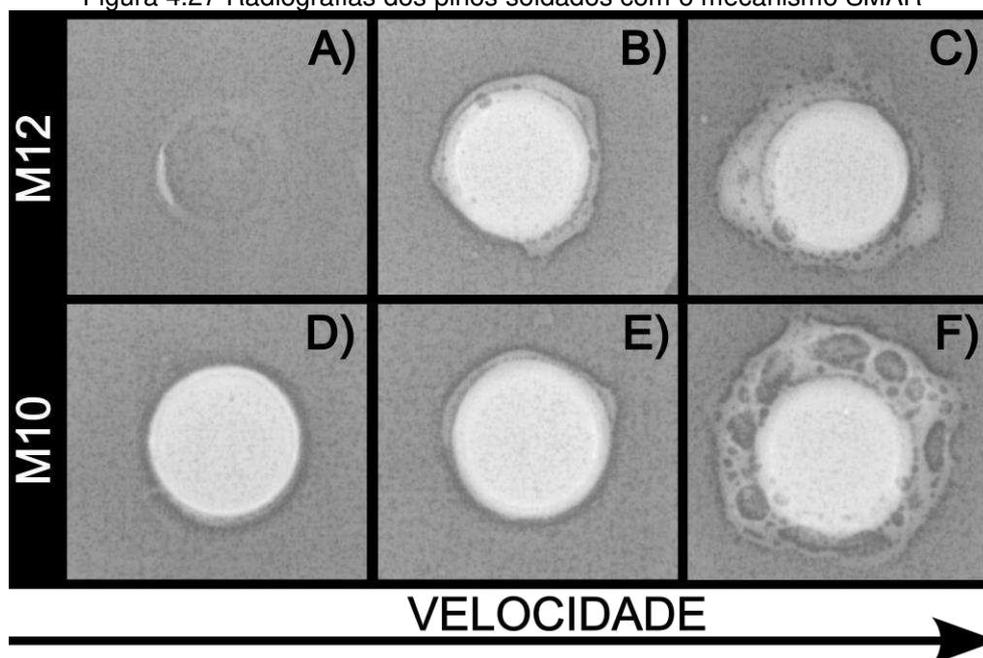
Figura 4.26 Matriz de Parâmetros e momentos de temperatura nos testes A) Recuo Max. B) Recuo Med. C) Recuo Min. 1) Abertura do arco. 2) Temperatura Máxima. 3) 60 segundos após a abertura do arco.



Fonte: elaborado pelo autor

Nas radiografias apresentadas na Figura 4.27 para os pinos M12 e M10, observam-se diferenças significativas relacionadas à velocidade de avanço aplicada durante o processo de soldagem. Essas diferenças impactaram diretamente a formação do colar e a presença de descontinuidades internas, refletindo a sensibilidade de cada tamanho de pino às condições do processo.

Figura 4.27 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAR



Fonte: elaborado pelo autor

Para pinos M12 com baixa velocidade, não houve formação de solda efetiva, sendo visível apenas a marca do intento de soldagem sobre a chapa. Isso indica que as condições aplicadas, como a velocidade muito baixa, não foram suficientes para realizar a fusão. Para pinos M12 com velocidade intermediária, a soldagem foi considerada adequada, com colar bem formado e ausência significativa de descontinuidades, demonstrando que a condição de velocidade fornecida pelo fabricante através do recuo foi a mais favorável para os pinos M12. Já com pinos com alta velocidade, foram observados diversos defeitos, incluindo bolhas e cavidades internas no colar, que são atribuídos à interação de alta potência com os gases presentes, resultando em uma fusão instável, e material espalhado.

Para pinos M10 com baixa velocidade, o colar é inexistente, indicando falha no processo de soldagem sob baixa velocidade, o que impossibilitou a formação de uma união adequada. Já nos pinos com velocidade intermediária, a soldagem foi considerada adequada, com colar homogêneo e bem formado, apresentando poucos ou nenhum defeito visível. Para pinos M10 com alta velocidade, foram observados diversos defeitos, como bolhas e descontinuidades internas, causados possivelmente pela interação de alta potência com os gases, afetando negativamente a integridade da solda.

Os resultados indicam que os pinos M10 são mais sensíveis aos defeitos causados por altas velocidades e potência elevada, enquanto os pinos M12

demonstram pouca tolerância em velocidades baixas sendo difícil obter uma união de solda.

Os resultados do teste de flexão, apresentados na Tabela 4.17, revelam um impacto significativo do parâmetro recuo na confiabilidade das soldagens realizadas. Para condições de recuo mínimo, ambos os pinos M12 e M10 apresentaram resultados insatisfatórios. No caso dos pinos M12, todas as amostras falharam, evidenciando que essa configuração não assegura uma fusão adequada. Já nos pinos M10, apenas uma amostra foi aprovada, reforçando a inadequação do recuo mínimo para ambas as geometrias.

Tabela 4.17 Teste de flexão (SMAR): (✓) Aprovado, (x) Não Aprovado

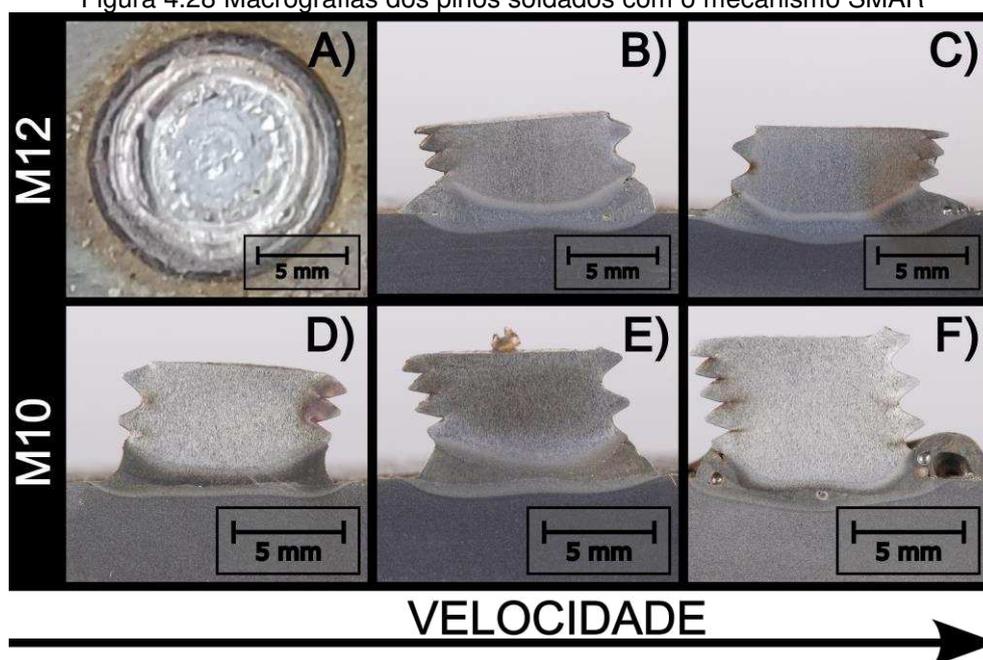
Recuo	Teste de Flexão	
	M10	M12
Mínimo	x ✓ x x x	x x x x x
Médio	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
Máximo	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓

Fonte: elaborado pelo autor

Em contrapartida, sob recuo médio e recuo máximo, os pinos M12 e M10 apresentaram desempenho satisfatório, com todas as amostras aprovadas. Essas condições garantiram a combinação ideal de parâmetros para a formação de colares homogêneos e resistentes no parâmetro médio. Os resultados destacam novamente que o ajuste fornecido pelo fabricante é adequado e assegura a confiabilidade do processo.

As macrografias apresentadas na Figura 4.28 ilustram a influência das condições de recuo e velocidade sobre a formação do colar e a eficiência da soldagem para os pinos M12 e M10.

Figura 4.28 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAR



Fonte: elaborado pelo autor

Para os pinos M12, sob condições de recuo mínimo, a fusão foi insuficiente, com áreas fundidas e energias observadas na linha inferior da Tabela 4.18, refletindo-se em colares pouco formados, como observado nas macrografias. Já sob recuo médio, a fusão foi eficiente, com áreas fundidas e energias em níveis intermediários, resultando em colares bem formados e sem discontinuidades significativas. Sob recuo máximo, a fusão não foi eficaz, apresentando áreas fundidas elevadas, mas acompanhadas de formação de defeitos e consumo de energia excessivo, conforme detalhado na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 Áreas e energias experimentais (SMAR)

Recuo	M10			M12		
	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostra (J)	Energia Média (J)	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostra (J)	Energia Média (J)
Máximo	11,90	3873	3849,6	16,08	6584	6607,4
Médio	10,37	2525	2570,0	15,23	4998	5077,8
Mínimo	8,81	2147	1921,6	-	2754	3275,4

Fonte: elaborado pelo autor

Para os pinos M10, sob condições de recuo mínimo, a fusão foi insuficiente, com áreas fundidas e energias também observadas na linha inferior da Tabela 4.18, resultando em colares inconsistentes, como ilustrado nas macrografias. Sob recuo médio, a fusão foi eficiente, com áreas fundidas e energias em níveis intermediários,

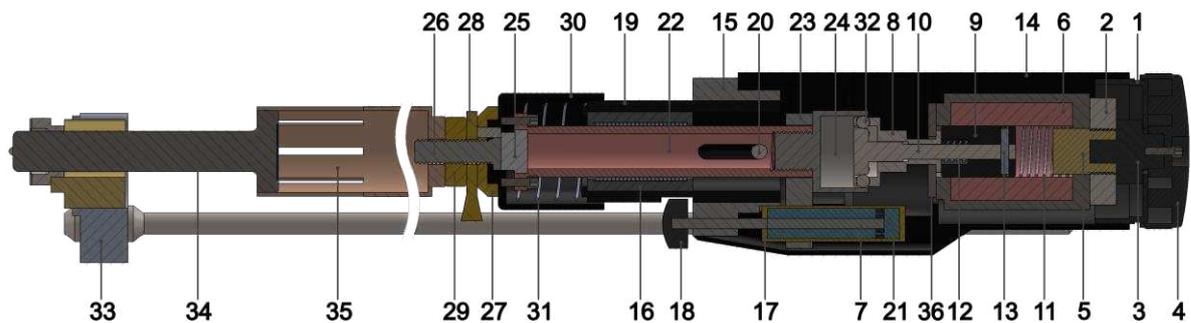
formando colares homogêneos e com poucos defeitos visíveis. Sob recuo máximo, a fusão apresentou problemas, com áreas fundidas elevadas, mas associadas a formação de defeitos significativos e consumo elevado de energia, conforme detalhado na Tabela 4.18.

#### 4.4 SOLENOIDE MOLA AMORTECEDOR (AR)

##### 4.4.1 Estrutura SMAAR

Este mecanismo (Figura 4.29) combina uma mola, um solenoide e um amortecedor, diferenciando-se de outros sistemas pela ausência de um pistão rígido e pela incorporação de um mecanismo de compensação de recuo. A seguir, são descritos os principais componentes (Tabela 4.19) e o funcionamento do mecanismo.

Figura 4.29 Estrutura interna do mecanismo solenoide mola amortecedor (SMAAR)



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.19 Lista de peças (SMAAR)

(Continua)

Nº da Peça	Nome da Peça
1	Tampa Traseira / Pistola
2	Tampa Traseira / Solenoide
3	Transmissão
4	Manipulo
5	Batente Interno
6	Solenoide
7	Pistão do Amortecedor
8	Corpo da Embreagem
9	Núcleo
10	Pistão da Embreagem
11	Mola de Retorno
12	Mola de Engate
13	Trava Núcleo/Embreagem

Tabela 4.19 Lista de peças (SMAAR)

(Conclusão)

<b>Nº da Peça</b>	<b>Nome da Peça</b>
14	Carcaça
15	Tampa Frontal / Pistola
16	Rolamento Linear
17	Amortecedor
18	Regulador Amortecedor
19	Caixa do Rolamento
20	Limitador Passante
21	Óleo
22	Pistão de Trabalho
23	Conexão Eixo / Amortecedor
24	Caixa de Engate
25	Isolamento Polimérico
26	Acoplamento de Pinça
27	Arruela
28	Borne
29	Porca
30	Caixa da Mola
31	Mola de Trabalho
32	Esferas de Engate
33	Suporte
34	<i>Shear Connector</i>
35	Pinça
36	Tampa Frontal / Solenoide

Fonte: elaborado pelo autor

O pistão de trabalho (22) está alojado em um rolamento linear (16), que assegura um deslocamento suave e unidimensional dentro do sistema. Neste design, a mola (31) está posicionada na parte frontal do pistão, apoiada em uma superfície ampliada que fornece uma base sólida para suportar a pressão. O outro extremo da mola é apoiado na estrutura do mecanismo (19), permitindo que a energia acumulada seja entregue para o pistão e garantindo uma velocidade estável durante a operação.

Na parte traseira do pistão, há uma peça (23) conectada a um amortecedor (17) posicionado de forma paralela ao pistão de trabalho. O amortecedor é projetado para controlar a velocidade de avanço do processo, moderando o movimento do pistão durante a imersão na poça de fusão. A presença deste amortecedor, responsável pelo controle da velocidade independentemente do recuo, garante que as características elétricas do processo de soldagem se mantenham estáveis e controladas.

Diferente dos mecanismos anteriores, este sistema não possui um acoplamento rígido na parte traseira. Em vez disso, conta com um elemento cilíndrico oco (24), que permite o movimento livre do sistema de acoplamento quando o solenoide (6) está desativado. Quando o solenoide é ativado, o sistema e o cilindro funcionam como uma única peça rígida, assegurando a transmissão do movimento. O sistema de acoplamento é composto por um subsistema que utiliza esferas (32) e a força do solenoide para unir as peças por meio de fricção. Esse design permite a independência entre a protrusão e o recuo, oferecendo maior flexibilidade e aproveitamento desses dois parâmetros.

O sistema também conta com duas molas adicionais. A primeira (12) é responsável por engatar o subsistema criando uma separação entre o núcleo (9) do solenoide e o corpo da embreagem (8) fazendo que o pistão da embreagem (10) aplique uma força nas esferas as quais realizaram o engate. A segunda mola (11) cuida de retornar o subsistema de acoplamento à sua posição original, liberando o pistão e preparando-o para o próximo ciclo de trabalho. Esta configuração assegura um funcionamento robusto e contínuo.

Por fim, este mecanismo utiliza um batente interno (5) localizado dentro do solenoide. Através de uma peça rotatória externa e fixa (4) e usando uma transmissão (3), o batente controla o movimento do núcleo do solenoide. Esse ajuste permite que, por meio de um sistema de rosca (2), o batente seja movido para frente ou para trás, limitando o deslocamento interno do núcleo e regulando tanto a compressão da mola quanto a altura do arco. O controle de recuo neste sistema é projetado exclusivamente para ajustar a altura do arco, enquanto o amortecedor é responsável pela gestão da velocidade do processo.

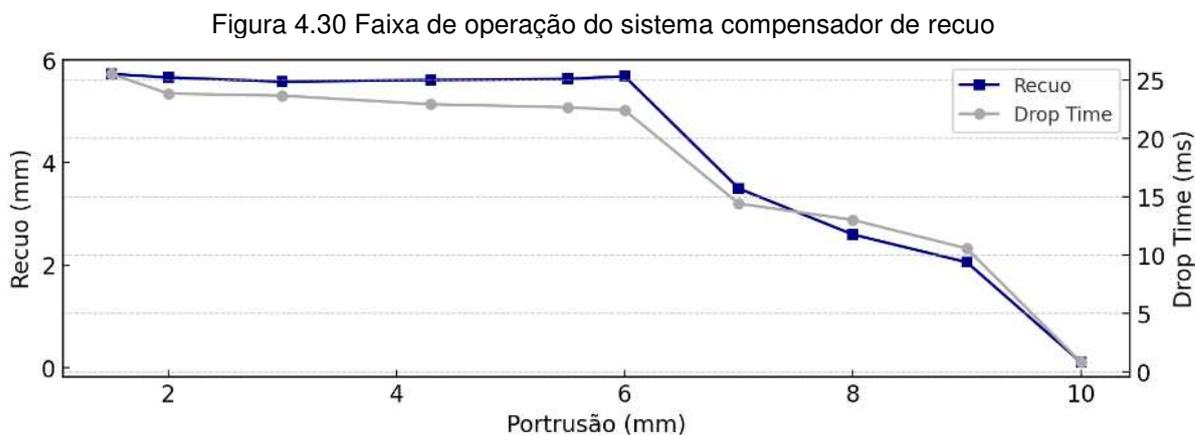
#### **4.4.2 Movimento SMAAR**

Os mecanismos com compensação de recuo oferecem uma solução para as limitações dos sistemas de pistão rígido. Como explicado em seções anteriores, nesses sistemas, as variáveis recuo e protrusão compartilham o mesmo intervalo de operação, o que obriga a uma relação inversamente proporcional: um aumento em uma variável exige uma redução equivalente na outra. Esse comportamento restringe significativamente o intervalo operacional e a flexibilidade do sistema.

Em contraste, os mecanismos com compensação de recuo separam os sistemas de recuo e protrusão, permitindo que ambas as variáveis operem de forma

independente e se integrem apenas durante a execução da soldagem. Essa configuração maximiza o intervalo de trabalho de ambas as variáveis e oferece maior versatilidade na distribuição dos parâmetros. Para avaliar esse princípio, foi realizado um experimento com uma pistola de *Stud Welding* configurada com seu recuo máximo. Posteriormente, variou-se a protrusão de 1 mm até o valor máximo operacional de 6 mm.

Os resultados do experimento apresentados na Figura 4.30 confirmaram o comportamento esperado do dispositivo. O mecanismo manteve um recuo constante de 6 mm ao longo de todo o intervalo de protrusão avaliado. Em contraste, um dispositivo de pistão rígido seria incapaz de alcançar essa configuração, pois a definição de um recuo de 6 mm limitaria a protrusão disponível a 0 mm. Contudo, foi observada uma ligeira variação nos valores de recuo devido ao comportamento do solenoide no sistema de engate, que avançou algumas décimas de milímetro antes de fixar o conjunto e gerar a tração efetiva.



Fonte: elaborado pelo autor

Para submeter o dispositivo a um maior desafio, aumentou-se a protrusão além dos 6 mm permitidos, até alcançar um máximo de 10 mm. Nesse caso, o recuo começou a diminuir progressivamente, atingindo um valor nulo no limite mencionado. Esse comportamento reflete as limitações físicas do sistema e estabelece parâmetros claros para sua operação.

Continuando com o estudo das velocidades neste mecanismo, foi seguida a mesma metodologia das análises anteriores, realizando cinco soldagens com pinos M16 e M22, utilizando os parâmetros especificados pelo fabricante, disponíveis na Tabela 4.20. Este mecanismo tem a vantagem de contar com um amortecedor que permite controlar a velocidade de avanço, eliminando as variações de energia

causadas pelo controle de velocidade através do recuo. Embora o fabricante não forneça parâmetros específicos para o amortecedor, este foi configurado em seu ponto médio para os testes.

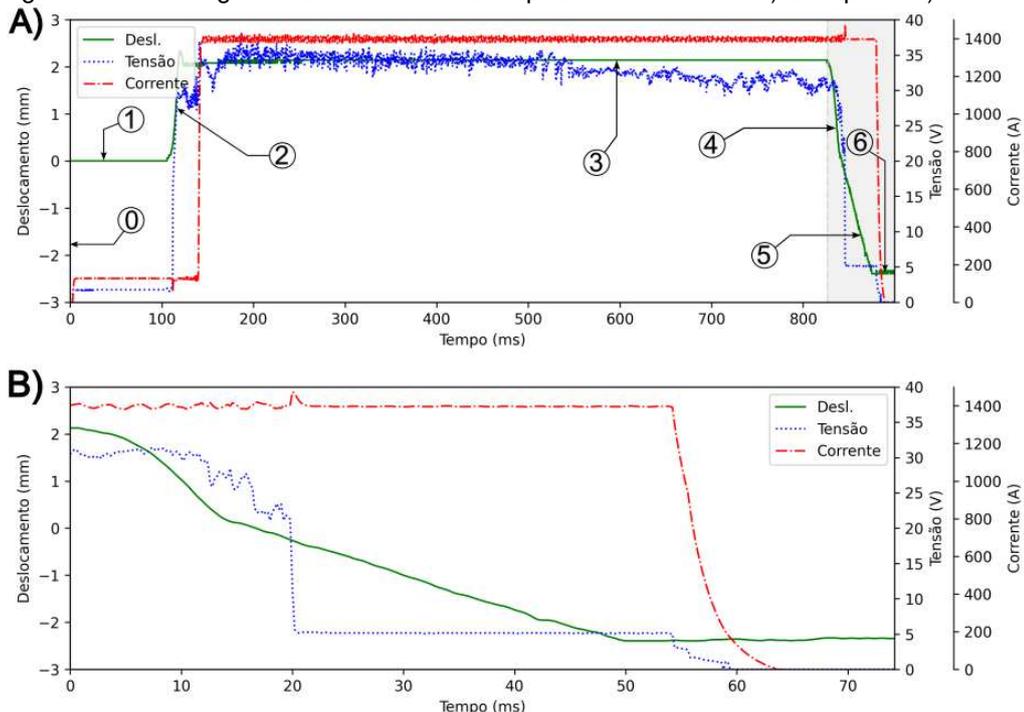
Tabela 4.20 Parâmetros experimentais (SMAAR)

Parâmetro de Soldagem	M16	M22
Corrente de soldagem [A]	1300	1950
Tempo de soldagem [ms]	650	950
Protrusão [mm]	3,4	4
Recuo [mm]	3	4
Proteção da poça	Anel Cerâmico	Anel Cerâmico
Amortecimento	S/A-Med-Max	S/A-Med-Max
Tempo de pré-corrente [ms]	40	40

Fonte: elaborado pelo autor

Este mecanismo caracteriza-se por três movimentos principais com seis etapas, ao contrário da maioria dos mecanismos que apresentam apenas dois movimentos. As etapas 0, 1, 2 e 3 correspondem à retração do pistão e são similares aos processos analisados anteriormente, não sendo detalhadas nesta seção, o oscilograma deste processo é observado na Figura 4.31.

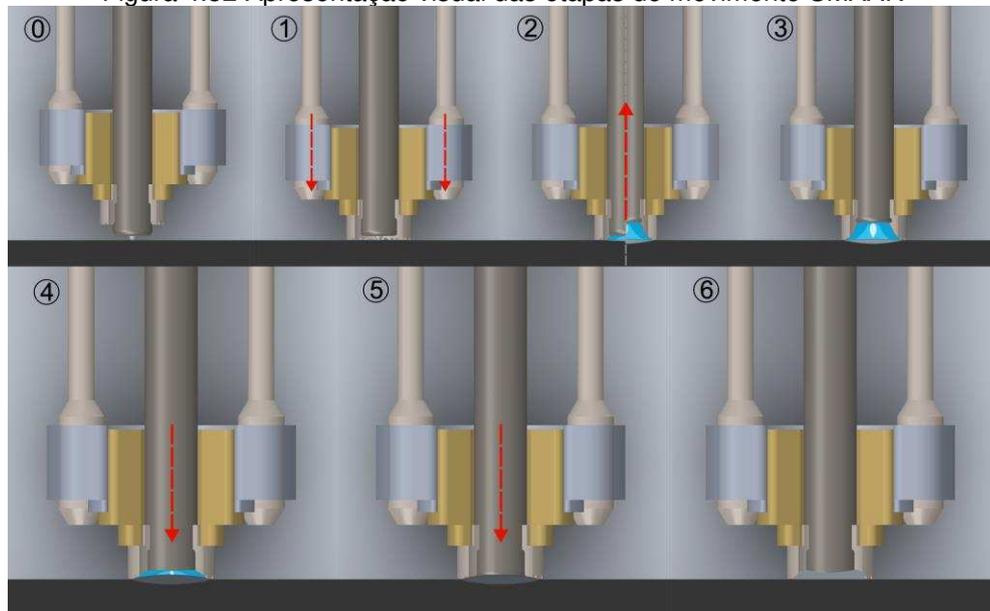
Figura 4.31 Oscilograma SMAAR e suas etapas de movimento A) Completo B) Descida



Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 4, denominada "entrega", o solenoide é desativado, e a energia acumulada pelas molas acelera o pistão. A ação combinada de três molas envolvidas em diferentes funções do mecanismo permite atingir uma velocidade média de 265,8 mm/s com um desvio padrão de 16,7 mm/s para pinos M16. Para pinos M22, a velocidade foi de 91,32 mm/s com um desvio padrão de 20,42 mm/s. Durante esta etapa, a ação do amortecedor é ignorada devido à força combinada das molas. O sistema de compensação de recuo assegura que o pistão seja liberado no ponto de referência definido, superando a protrusão e entregando o pino de maneira controlada na poça de fusão, as etapas finais que são o diferencial deste sistema, são destacadas visualmente na Figura 4.32, acompanhadas também das etapas iniciais.

Figura 4.32 Apresentação visual das etapas do movimento SMAAR



Fonte: elaborado pelo autor

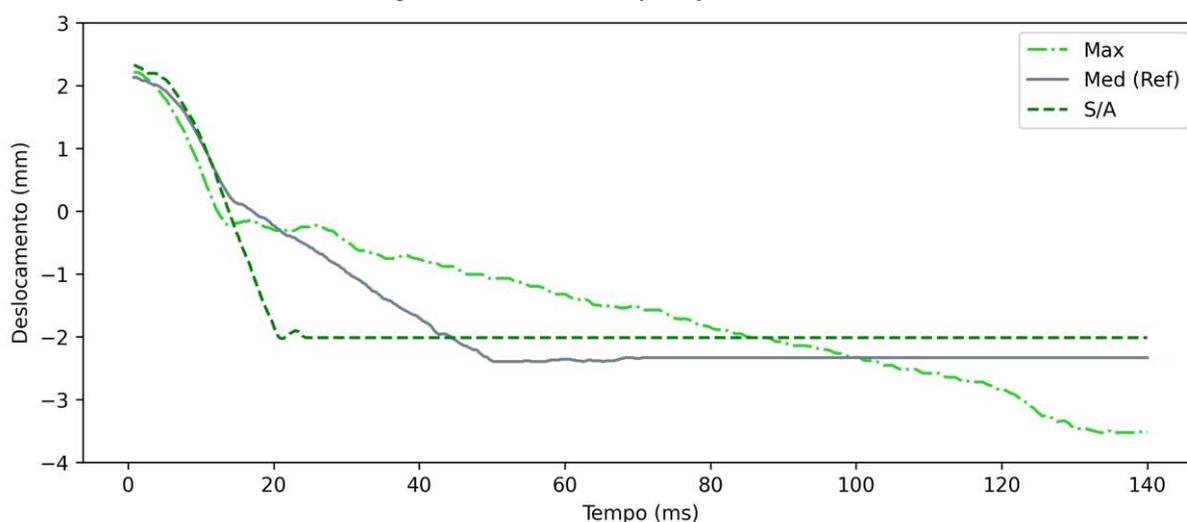
Na Etapa 5, chamada "imersão", o pino entra em contato com a poça de fusão. Nesta fase, o movimento é comandado por uma única mola, enquanto o amortecedor absorve parte da energia acumulada, reduzindo a velocidade do pistão e permitindo um descenso mais suave. Esse controle minimiza respingos e garante que a maior quantidade possível de material permaneça no colar da solda como reforço. A divisão em duas sub-etapas nesta fase permite uma entrega rápida do pino fundido, evitando a solidificação prematura das peças, seguida de uma desaceleração controlada durante a imersão.

Por fim, na Etapa 6, o processo é finalizado antes que o pino atinja o fundo da poça de fusão. Essa abordagem é essencial para evitar defeitos de soldagem e

garantir uma união confiável. Como este processo é projetado para pinos de grande porte, essa limitação no movimento é crucial para alcançar a qualidade desejada na soldagem.

Nesta comparação de movimentos para os diferentes valores de amortecimento, observam-se as duas subdivisões do descenso. A primeira etapa, denominada etapa de entrega, não apresenta diferenças significativas de velocidade, conforme indicado na Tabela 4.21 e visualmente representado na Figura 4.33. No parâmetro S/A, aparentemente é observada uma curva contínua, sem variações perceptíveis no descenso; contudo, há uma leve alteração da velocidade na transição entre a etapa de entrega e a etapa de amortecimento, ainda que pouco perceptível. Assim, mesmo que a curva se assemelhe a sistemas apresentados anteriormente, este mecanismo sempre executa o movimento cumprindo essas duas sub-etapas devido à presença do amortecedor, mesmo quando sua ação é inibida ao ser configurado em seu parâmetro mínimo. Por fim, é importante destacar a relação observável entre o amortecimento e a penetração: quanto maior a ação deste parâmetro, maior é a penetração do pino na poça de fusão.

Figura 4.33 Faixa de operação SMAAR



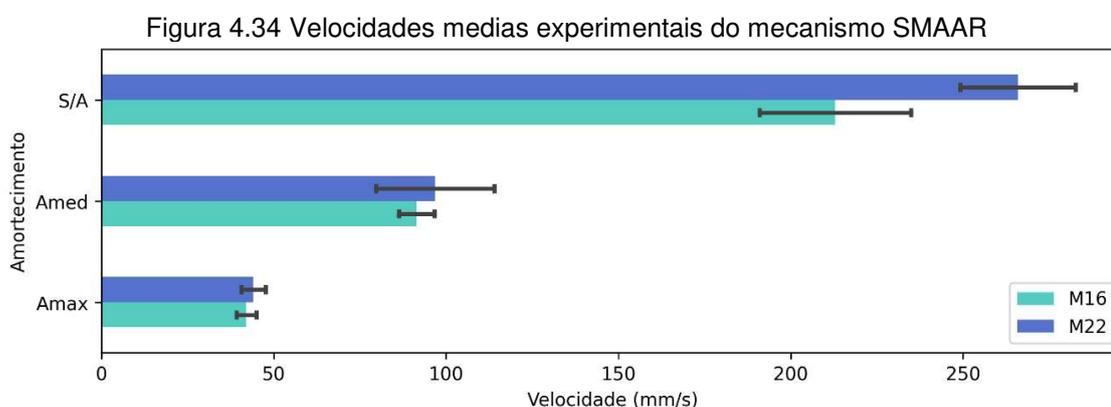
Fonte: elaborado pelo autor

Para a presente análise de velocidades, optou-se por um enfoque diferente. Dado que não havia uma escala precisa para determinar o valor do amortecimento, utilizou-se um diagrama de barras com desvio padrão apresentado na Figura 4.34, dividindo este parâmetro com as mesmas classificações utilizadas no experimento, ou seja, S/N (sem amortecimento), Médio e Máximo. Contrariando o esperado, o diagrama demonstra que, na ausência da influência do amortecedor (inibido no

parâmetro mínimo), o pino M22 atinge uma velocidade significativamente superior à do pino M16. Esse resultado é contraditório com a teoria do sistema massa-mola, segundo a qual massas menores deveriam alcançar maiores velocidades. No entanto, essa discrepância pode ser explicada pelos parâmetros iniciais do processo de soldagem: o pino M22 foi submetido a um parâmetro de recuo maior, proporcionando mais espaço e tempo para aceleração, o que favorece a obtenção de maiores velocidades.

Uma segunda hipótese complementar considera a diferença de massa entre os pinos, sendo o pino M22 mais pesado que o M16, o que sugere a possibilidade de a força gravitacional atuar como componente relevante ou até dominante na aceleração observada, especialmente considerando que as soldas foram realizadas na posição plana.

Além do anterior, no gráfico Figura 4.34, a través dos desvios padrões indicados, observou-se que a ação do amortecedor sobre o sistema eliminou a diferença causada pela variação de massas, proporcionando um processo mais estável para diferentes tipos de pino. Um ponto importante é que a velocidade de avanço recomendada pela literatura se situa aproximadamente no ponto médio de regulação do amortecedor, alcançando velocidades próximas a 100 mm/s, adequadas para pinos maiores que M16. Esse tipo de mecanismo demonstrou, ainda, um amplo intervalo de operação, alcançando velocidades baixas próximas a 50 mm/s, um resumo das velocidades medias encontra-se na Tabela 4.21 um ponto importante a aclarar é que as velocidades medias desta tabela corresponde a velocidade de avanço e são calculadas tomando o intervalo total de tempo e o deslocamento total e não se tem em conta as duas etapas separadas, somente é considerado um total.



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.21 Velocidades medias experimentais (SMAAR)

Amortecimento	Velocidades (mm/s)			
	M16		M22	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
S/A	212,93	21,95	265,89	16,75
Médio	91,46	5,14	91,32	20,42
Máximo	42,08	2,86	44,09	3,52

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 4.22 apresenta as velocidades medidas nas duas etapas do movimento de descida do mecanismo de soldagem com amortecimento, para os pinos M16 e M22, sob duas condições de amortecimento (médio e máximo). A primeira fase do deslocamento, denominada velocidade de entrega ( $V_e$ ), corresponde ao estágio inicial do movimento, enquanto a segunda fase, denominada velocidade de amortecimento ( $V_m$  para não confundir com  $V_a$  correspondente ao avanço total), representa a etapa final da aproximação do pino à superfície de soldagem.

Devido a essa divisão da etapa de descida em duas fases distintas, torna-se necessário o uso de uma metodologia alternativa para observar essa separação, que ocorre somente quando o amortecedor está ativado. Vale ressaltar que, mesmo com o amortecedor ajustado para seu valor mínimo, essa divisão de etapas ainda está presente, embora seja quase imperceptível.

Tabela 4.22 Velocidades medias experimentais de entrega e amortecimento

Amortecimento	M16		M22	
	$V_e$	$V_m$	$V_e$	$V_m$
Medio	166,03	68,02	227,50	60,85
Máximo	159,00	24,94	213,58	32,59

Fonte: elaborado pelo autor

Observa-se que, independentemente do nível de amortecimento aplicado, a  $V_e$  é sempre superior à  $V_m$ , indicando que o mecanismo reduz significativamente sua velocidade na segunda fase do deslocamento. Esse comportamento é esperado devido à atuação combinada dos sistemas de mola e amortecimento, que modulam a transição entre as fases de deslocamento. Essa divisão em duas etapas ocorre devido à presença de múltiplas molas no sistema, que inicialmente inibem a ação do amortecedor. Somente no momento do desengate, quando o pistão de trabalho é liberado, o movimento passa a ser influenciado predominantemente pelo efeito do amortecedor, enquanto apenas a mola de trabalho atua na fase de amortecimento do deslocamento.

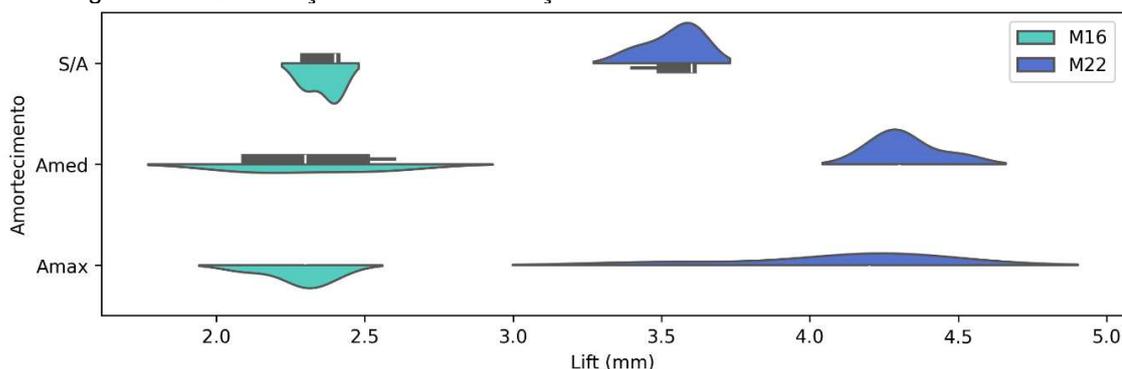
No caso do pino M16, a transição entre as velocidades é mais acentuada sob amortecimento máximo, onde a  $V_m$  apresenta uma redução significativa em relação à  $V_e$ , aproximando-se de um terço do seu valor. Isso sugere que o efeito do amortecedor é mais pronunciado para o pino M22, que apresentou uma redução mais expressiva na velocidade de amortecimento em relação à velocidade de entrega, reduzindo-se para aproximadamente um quarto do seu valor sob amortecimento médio e para menos de um sexto sob amortecimento máximo.

Além disso, verifica-se que as  $V_e$  são mais elevadas para os pinos M22 em ambas as condições de amortecimento, o que pode estar associado à maior inércia devido ao peso superior do pino. Esse fator pode contribuir para que o pino M22 atinja velocidades mais elevadas na fase inicial do deslocamento, aproveitando a inércia e a ausência da ação do amortecedor nesse estágio.

Esses resultados demonstram que o efeito do amortecedor atua de forma mais ativa na segunda fase do deslocamento, reduzindo a velocidade de imersão de maneira mais expressiva do que a velocidade de aproximação. Essa característica intrínseca dos sistemas com amortecimento pode ser um fator determinante para melhorar a formação do colar e reduzir defeitos, como descontinuidades, desde que haja um conhecimento preciso do parâmetro e uma parametrização otimizada para cada condição de soldagem.

Como um complemento e considerando que, em teoria, este sistema não varia o recuo, foi elaborado o diagrama de violino apresentado na Figura 4.35. Este gráfico ilustra a distribuição normal do recuo efetivo para cada tamanho e parâmetro das soldagens realizadas neste experimento, demonstrando que, como em um sistema mecânico real, ocorrem variações aparentes devido à ação do amortecedor. Observa-se no gráfico que, quanto maior a ação do amortecedor, maior é o intervalo de distribuição deste parâmetro, com variações de até 2 mm entre repetições do mesmo parâmetro. Uma hipótese para esse comportamento é que o amortecedor não apenas opõe resistência ao descenso, mas também ao retrocesso, afetando o funcionamento e a eficácia do engate. Isso adiciona uma força extra que o sistema de esferas precisa superar, considerando que o funcionamento deste sistema se baseia no contato por fricção entre duas superfícies. Como consequência, as esferas podem, aleatoriamente, percorrer uma maior distância durante o retrocesso antes de alcançar um engate efetivo no sistema.

Figura 4.35 Distribuição normal da variação do recuo efetivo no mecanismo SMAAR



Fonte: elaborado pelo autor

Para fins de esclarecimento conceitual, durante o ciclo de soldagem de pinos, o movimento de descida do pino pode ser dividido em fases distintas, cada uma caracterizada pelo meio em que ocorre, seja em ambiente gasoso ou no interior da poça de fusão. Com base nessa lógica, propõem-se neste trabalho os termos velocidade de aproximação (*approach rate*) e velocidade de imersão (*plunge rate*), que permitem descrever de forma mais clara, técnica e universal as etapas do movimento descendente do pino. Esses conceitos se aplicam a uma ampla variedade de sistemas e tecnologias de soldagem, inclusive àquelas sem controle ativo de movimento, sendo, portanto, relevantes para diferentes arquiteturas de pistolas.

A seguir, são apresentadas essas definições, acompanhadas de suas implicações práticas e aplicabilidade no contexto dos experimentos realizados.

- **Velocidade de Avanço (*Advance rate*):** representa a velocidade global do movimento do pino, desde o começo da descida até a conclusão da imersão na poça de fusão. É o parâmetro que abrange todas as fases do deslocamento descendente.
- **Velocidade de Aproximação (*Approach rate*):** corresponde à velocidade na fase inicial do movimento, desde o início até o momento em que o pino líquido entra em contato com a poça de fusão. Essa fase pode envolver deslocamentos livres comandados por molas, ou controlados por sistemas de amortecimento. No oscilograma, pode ser identificada pela queda de tensão associada ao curto-circuito. A característica mais marcante dessa fase é que o deslocamento do pino ocorre em um meio gasoso ou atmosférico.

- Velocidade de Imersão (*Plunge rate*): descreve a fase final, quando o pino penetra efetivamente na poça de fusão até o final do movimento na solidificação. Este termo deve ser reservado exclusivamente para essa etapa, evitando seu uso como sinônimo da velocidade total de descida.

No entanto, em mecanismos mais complexos, como os que empregam sistemas de amortecimento, essa divisão tradicional por meio mostra-se insuficiente para capturar todas as nuances do comportamento dinâmico. Para esses casos específicos, propõem-se ainda dois termos complementares já observados no trabalho (velocidade de entrega e velocidade amortecida) definidos com base na lógica estrutural e funcional do sistema mecânico. Tais definições não substituem os termos genéricos definidos pelo avanço e meio gasoso, mas os complementam, oferecendo uma abordagem mais abrangente para a análise de mecanismos com subsistemas no controle de movimento.

- Velocidade de Entrega: é a velocidade com que o sistema mecânico efetivamente transfere o pino líquido até a poça de fusão. Essa transferência é fortemente influenciada pela arquitetura da pistola e pode ocorrer antes, durante ou após o contato com a poça de fusão, ou seja, em diferentes momentos em relação à finalização da fase de aproximação, dependendo da configuração e do controle do sistema. Está associada ao instante em que o mecanismo "entrega" o pino líquido para sua interação amortecida com a peça, sem estar restrita à definição de velocidade de aproximação. Em alguns casos, a entrega antecede o contato com a poça, como quando o sistema inicia o amortecimento antes do curto-circuito. Em outros, pode acontecer após esse contato, especialmente quando o pino líquido tem muito volume ou o processo tem um recuo insuficiente.
- Velocidade amortecida: refere-se à velocidade controlada por elementos de amortecimento do sistema, geralmente aplicada para suavizar o movimento evitando perdas de material, como na entrada na poça de fusão. Essa velocidade pode aparecer antes ou depois da fase de imersão, dependendo de como o sistema é projetado para desacelerar o pino. Assim como a velocidade de entrega, a velocidade amortecida não

está diretamente vinculada às fases definidas pelo meio (como gás ou líquido), mas sim à estrutura e ao funcionamento do mecanismo.

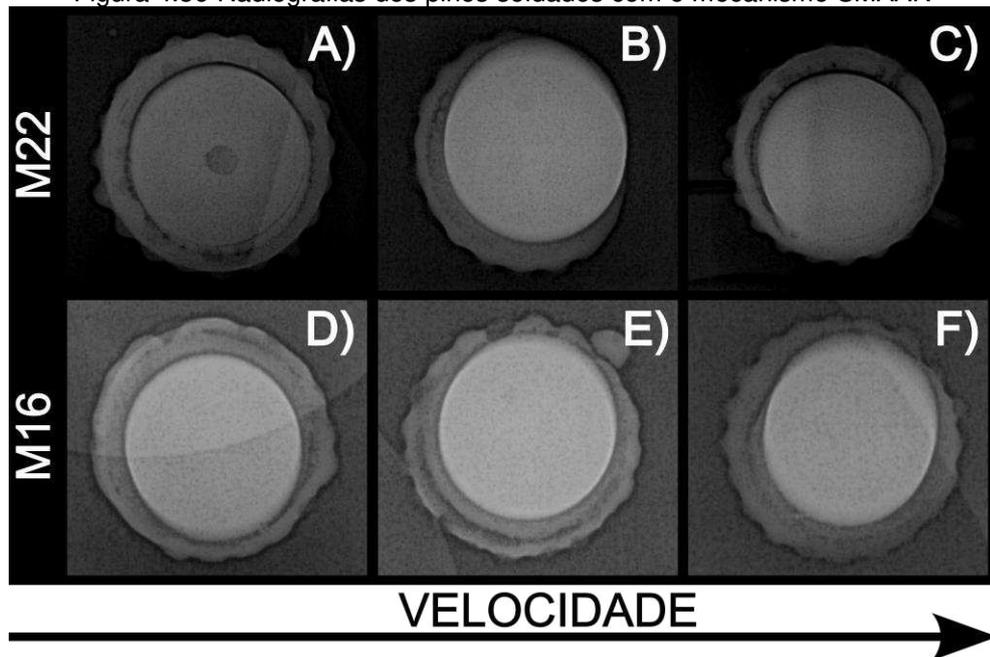
Ambos os conceitos (velocidade de entrega e velocidade amortecida) estão contidos dentro da definição de velocidade de avanço (*advance rate*), mas não se confundem com a *approach rate* nem com *plunge rate*, pois são definidos com base na lógica estrutural do sistema, e não apenas pelo meio em que ocorrem. Em um caso ideal as velocidades de entrega e de aproximação deveriam ser iguais do mesmo modo que a velocidade de imersão e a velocidade de amortecimento, mas, na prática é observado que não se tem uma sincronia entre estas.

Neste contexto, os termos empregados ao longo deste trabalho foram definidos com base na função desempenhada por cada etapa do movimento e na lógica estrutural dos mecanismos internos, indo além da definição literal do termo usado erradamente na literatura (*plunge rate*). Essa abordagem visa ampliar e refinar o vocabulário técnico existente, oferecendo ferramentas conceituais mais adequadas à análise de pistolas com controle de velocidade, recuo e amortecimento.

#### **4.4.3 Efeitos da implementação do amortecedor e compensação de recuo**

Para esta análise apresentado na Figura 4.36, os pinos foram cortados próximos à base, garantindo a penetração completa dos raios X em toda a espessura avaliada. Uma característica a destacar é que os pinos M16 apresentaram um colar mais uniforme em comparação aos pinos M22, que exibem uma linha escura na interface pino/colar. Essa linha indica uma separação entre as duas regiões, que será detalhada posteriormente nas macrografias. É importante ressaltar também a grande descontinuidade observada nos pinos M22 em baixas velocidades, um defeito recorrente para este parâmetro em vários experimentos. Isso sugere a existência de um limite inferior de velocidade no processo, devido ao surgimento de defeitos indesejáveis.

Figura 4.36 Radiografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAAR



Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados do teste de flexão na Tabela 4.23 demonstram diferenças claras entre os pinos M16 e M22. Enquanto os pinos M16 apresentam um desempenho dependente do nível de amortecimento, com falhas frequentes no nível sem amortecimento (S/A) e melhora progressiva com amortecimento médio e máximo, os pinos M20 se mostraram consistentemente confiáveis em todas as condições. Esse comportamento sugere que os pinos M22 possuem maior robustez intrínseca devido a quantidade de material soldado, lembrando que tem uma área circular de pelo menos 22 mm de diâmetro em contato, enquanto os M16 demandam condições otimizadas para assegurar sua confiabilidade.

Tabela 4.23 Teste de flexão (SMAAR): (✓) Aprovado, (✗) Não Aprovado

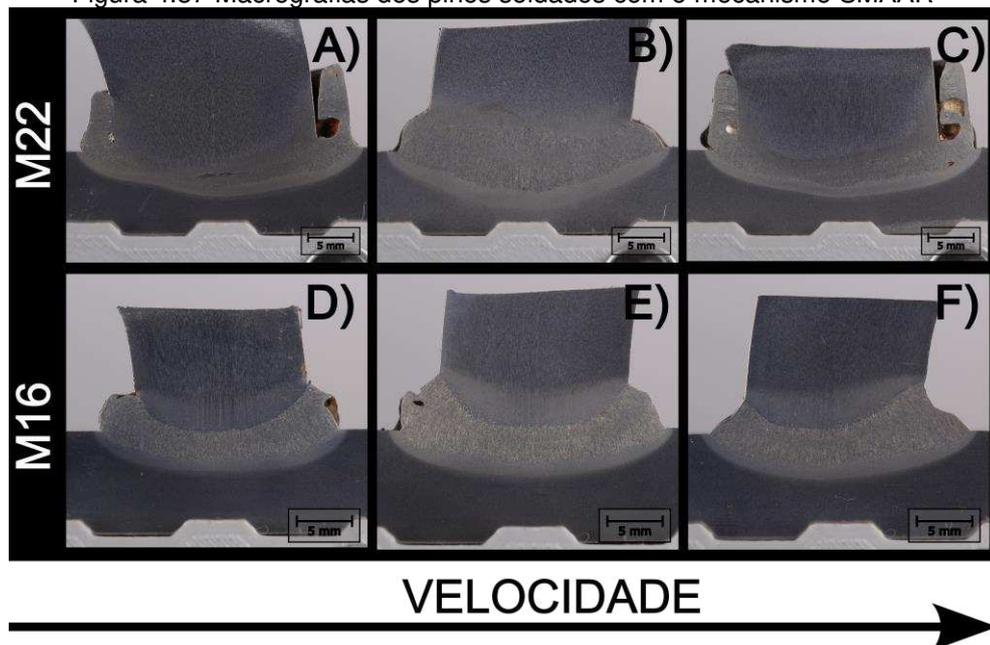
Amortecimento	Teste de Flexão	
	M16	M20
S/A	✗ ✗ ✓ ✓ ✗	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
Médio	✓ ✓ ✗ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
Máximo	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓

Fonte: elaborado pelo autor

Nas macrografias apresentadas na Figura 4.37 para os pinos M22 e M16, observam-se características distintas entre os dois grupos. Os pinos M22, embora tenham apresentado melhor desempenho nos testes de flexão, exibem colares com maior presença de descontinuidades, especialmente nas amostras sem amortecimento e com amortecimento máximo. Nessas condições, são visíveis

separações entre o pino e o colar, sugerindo uma interação menos homogênea durante o processo de soldagem. Essa diferença pode ser atribuída aos extremos opostos no tempo de interação: no primeiro caso, uma maior velocidade desloca o material tão rapidamente que este não consegue interagir adequadamente com a parede do pino; já no segundo caso, o deslocamento do material ocorre tão lentamente que a energia é dissipada, dificultando a fusão com a parede.

Figura 4.37 Macrografias dos pinos soldados com o mecanismo SMAAR



Fonte: elaborado pelo autor

Por outro lado, os pinos M16 apresentam colares mais uniformes e sem discontinuidades visíveis, embora não tenham alcançado o mesmo desempenho mecânico dos M22. Essas diferenças indicam que os pinos M22 conseguem compensar a qualidade inferior do colar devido à sua maior robustez estrutural geral, em grande parte atribuída à maior área soldada, com uma circunferência mínima de 22 mm de diâmetro de material fundido. Essa maior área de fusão parece contribuir significativamente para a resistência mecânica observada. A Tabela 4.24 mostra um resumo das áreas e energias obtidas sem diferenças importantes entre os valores.

Tabela 4.24 Áreas e energias experimentais (SMAAR)

Amortecimento	Área (mm <sup>2</sup> )	M16		M22		
		Energia Amostra (J)	Energia Média (J)	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostra (J)	Energia Média (J)
S/A	86,46	33712	33890	105,74	71652	72318
Médio	88,49	32956	34093	151,46	78103	74382
Máximo	76,90	33937	34675	95,739	78931	78072

Fonte: elaborado pelo autor

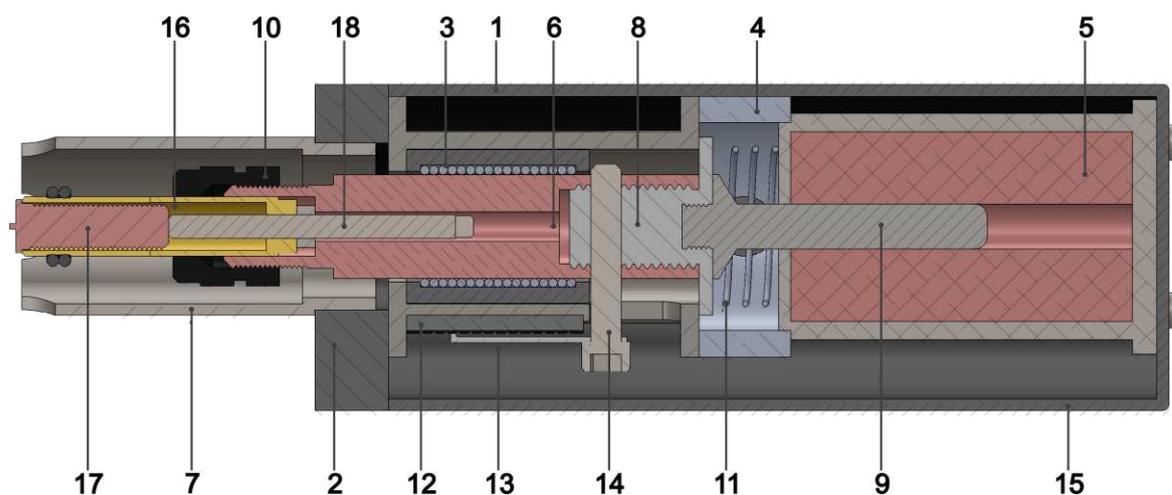
De acordo com Trillmich (2016), se o recuo desempenha um papel fundamental na formação do arco e na fusão eficiente, os sistemas que utilizam compensação de recuo são preferíveis aos de pistão rígido, pois oferecem maior estabilidade frente a irregularidades no posicionamento da pistola e maior faixa de operação.

#### 4.5 MOTOR LINEAR (AR)

##### 4.5.1 Estrutura MLAR

Este mecanismo é o mais simples entre os apresentados, utilizando um motor linear para controlar diretamente o movimento do pistão de trabalho (Figura 4.38). A seguir, são detalhados seus principais componentes (Tabela 4.25) e funcionamento.

Figura 4.38 Estrutura interna do mecanismo com motor linear (MLAR)



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4.25 Lista de peças (MLAR)

Nº da Peça	Nome da Peça
1	Caixa do Rolamento
2	Tampa Frontal
3	Rolamento Linear
4	Caixa da Mola
5	Motor Linear
6	Pistão de Trabalho
7	Bocal Fixo
8	Isolamento Polimérico
9	Eixo do Motor
10	Porca
11	Mola de Retorno
12	Escala de Referência
13	Sensor de Posição
14	Acoplamento do Encoder
15	Carcaça
16	Pinça
17	Pino
18	Batente Pinça

Fonte: elaborado pelo autor

Assim como nos sistemas anteriores, o pistão de trabalho (6) está alojado em um rolamento linear (3), que garante a estabilidade do movimento. Este rolamento minimiza o atrito e permite um deslocamento controlado ao longo do eixo do mecanismo. Em uma extremidade do pistão, está localizada a pinça (16), que segura os pinos (17) durante o processo de soldagem, atuando como fixação do pino.

Na outra extremidade do pistão, está conectado diretamente o eixo (9) de um motor linear (6), que é responsável por controlar o movimento do pistão. Este motor linear elimina a necessidade de subsistemas e componentes mecânicos adicionais para cada função, pois seu funcionamento proporciona um movimento linear preciso e controlado. Estando diretamente acoplado ao pistão, o motor gerencia o recuo, a profundidade da soldagem e a velocidade de avanço, oferecendo um controle integral sobre o processo.

Apesar da simplicidade deste mecanismo, também requer a utilização de uma mola (11), cuja função não é gerar força de trabalho, mas sim absorver a protrusão inicial e estabelecer um ponto zero para o movimento. A mola permite que o pistão retorne à sua posição inicial de repouso após a conclusão do processo de soldagem, preparando o mecanismo para o próximo ciclo de operação.

O movimento do pistão é monitorado por um sensor de posição (13), que rastreia continuamente a localização de uma referência (12) no pistão em tempo real. Por meio desse monitoramento, são enviados dados de feedback ao sistema de controle do motor linear, permitindo o ajuste adequado de vários parâmetros do processo. Entre os parâmetros controlados estão o recuo, que determina a altura do arco durante o processo de soldagem; a profundidade da soldagem, que regula o quanto o pino deve se mergulhar na poça de fusão (a distância disponível para esse movimento é determinada pela protrusão); e a velocidade de avanço, que deve ser ajustada para evitar defeitos como respingos ou porosidade.

#### 4.5.2 Movimento MLAR

Este mecanismo, assim como os anteriores, foi submetido a 5 soldagens de teste utilizando pinos M6 e M8. No entanto, ao contrário dos mecanismos anteriores, este dispositivo é altamente automatizado e conta com uma base de dados interna que contém parâmetros pré-configurados para sua operação, o que simplifica seu uso ao exigir apenas a seleção do diâmetro do pino. Os parâmetros utilizados para este teste estão disponíveis na Tabela 4.26.

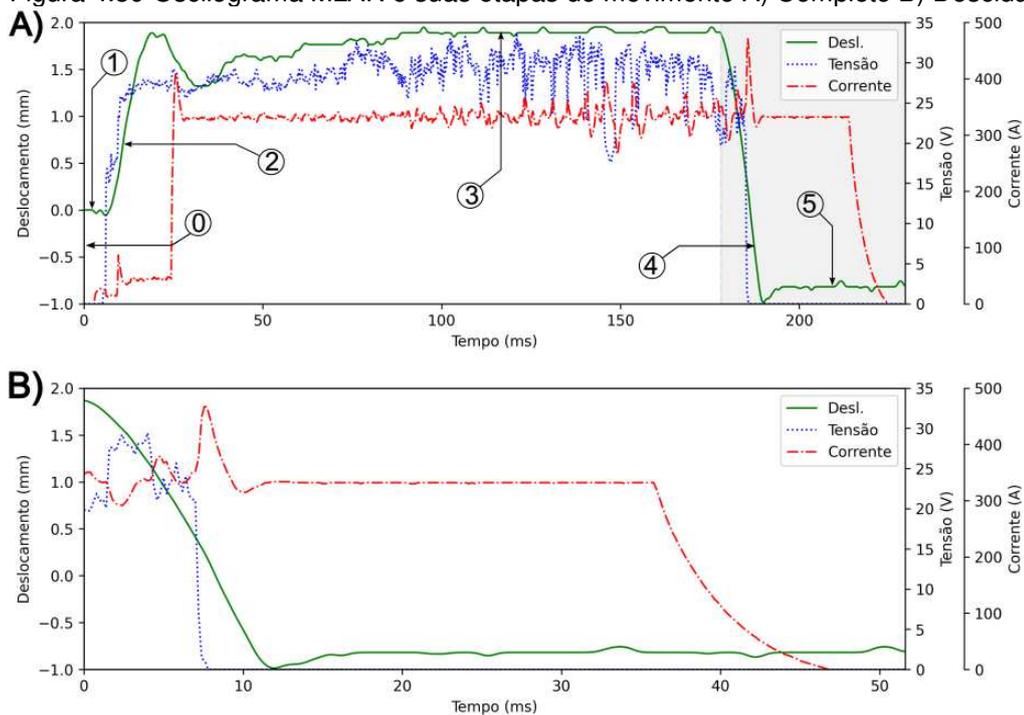
Tabela 4.26 Parâmetros experimentais (MLAR)

<b>Parâmetro de Soldagem</b>	<b>M6</b>	<b>M8</b>
Corrente de soldagem [A]	370	500
Tempo de soldagem [ms]	190	160
<i>Plunge Depth</i> [mm]	1,5	2,0
Recuo [mm]	1,5	1,5
Proteção da poça	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>	85%Ar+15%CO <sub>2</sub>
<i>Plunge Rate</i>	100-200-300	100-200-300

Fonte: elaborado pelo autor

O movimento observado neste mecanismo (Figura 4.39) apresenta características distintas, pois não é comandado por molas nem solenoides. No entanto, sendo um mecanismo projetado para arco retraído, são identificadas as etapas típicas de retração e descida, como em outros dispositivos.

Figura 4.39 Oscilograma MLAR e suas etapas de movimento A) Completo B) Descida

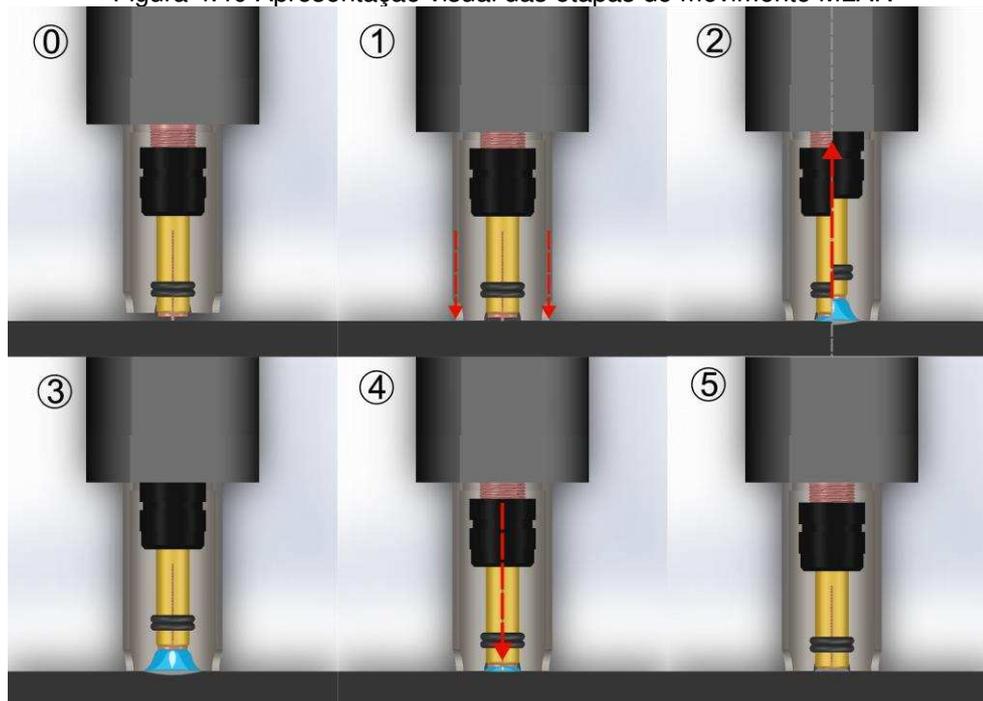


Fonte: elaborado pelo autor

Na Etapa 0, o dispositivo encontra-se em repouso.

Na Etapa 1, a pistola é posicionada contra a peça de trabalho e o sistema é ativado automaticamente, configurando os parâmetros conforme a base de dados interna. A Figura 4.40 detalha visualmente cada etapa apresentada.

Figura 4.40 Apresentação visual das etapas do movimento MLAR



Fonte: elaborado pelo autor

Durante a Etapa 2, o pino é retraído por um sistema eletrônico que realiza correções de altura em tempo real. Essas correções sugerem a presença de um controle PID em um sistema de malha fechada, que ajusta a altura do pino com precisão, garantindo estabilidade no processo. A monitorização contínua da posição do pistão assegura que o pino se retraia de maneira controlada, respeitando o recuo configurado.

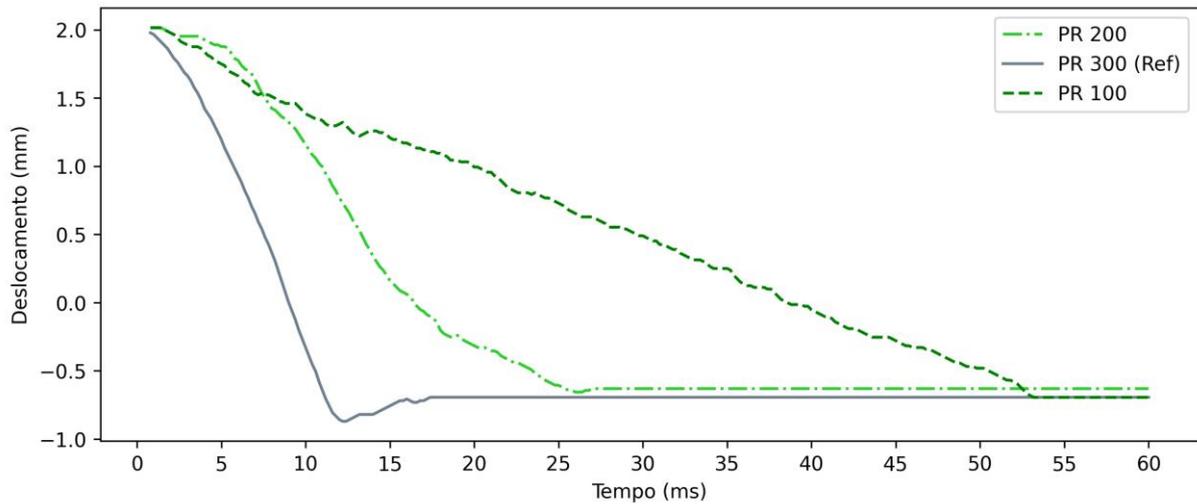
Na Etapa 3, o pino permanece na posição de retração enquanto o arco se encontra aberto, mantendo a posição conforme os parâmetros configurados.

Na Etapa 4, inicia-se o movimento de descida, caracterizado por um gráfico de movimento linear, em contraste com o comportamento senoidal típico de mecanismos baseados em molas. Esse movimento linear é atribuído à entrega constante de velocidade pelo motor, proporcionando um descenso controlado e uniforme do pino. Apesar da linearidade, pequenas correções são realizadas automaticamente durante o percurso, reforçando a hipótese de um sistema de controle que ajusta o curso do pistão em tempo real.

Na Etapa 5, o pino entra em contato com a poça de fusão, marcando o final do ciclo de soldagem. A velocidade média do movimento foi de 227,7 mm/s, com um desvio padrão de 16,32 mm/s para pinos M6, o que equivale a uma variação de 7% entre os ciclos. Esses resultados demonstram alta consistência e repetitividade no processo, em conformidade com as expectativas de um dispositivo automatizado.

Analisando o intervalo de operação do dispositivo, observa-se na Figura 4.41 um movimento consistente para o parâmetro de *Plunge Rate* 200, que corresponde à maior velocidade do dispositivo. Este parâmetro é o único considerado adequado para o intervalo de tamanhos que este dispositivo pode soldar, uma vez que foi projetado para soldar pinos menores que M8. Por esse motivo, os outros parâmetros de velocidade seriam, em teoria, desnecessários, dado que, de acordo com (Trillmich; Welz, 2016), a velocidade ótima para esses tamanhos é de aproximadamente 200 mm/s. Para os outros dois parâmetros, observam-se movimentos ligeiramente mais inconstantes, atribuídos à ação de correção do sistema, que ajusta constantemente o avanço para corrigir a velocidade de avanço. Apesar disso, nota-se que o sistema mantém com rigor a penetração programada, apresentando pouca diferença entre os parâmetros testados, um resumo das velocidades medias se encontra na Tabela 4.27.

Figura 4.41 Faixa de operação MLAR



Fonte: elaborado pelo autor

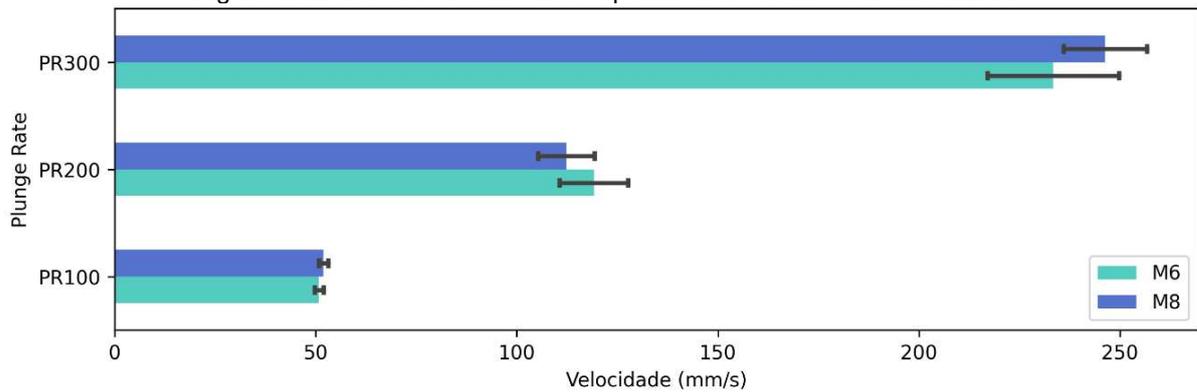
Tabela 4.27 Velocidades medias experimentais (MLAR)

Plunge Rate	Velocidades (mm/s)			
	M6		M8	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
100	50,85	1,07	51,99	1,18
200	119,16	8,50	112,34	7,00
300	233,38	16,32	246,31	10,37

Fonte: elaborado pelo autor

Para este tipo de sistema, também foi utilizado um diagrama de barras (Figura 4.42) para comparar as velocidades, uma vez que os três parâmetros testados são variáveis discretas. Na figura, observa-se que a massa dos pinos não afeta significativamente a velocidade, indicando que este dispositivo supera os anteriores em termos de repetitividade e consistência no processo. Além disso, apresenta um amplo intervalo de velocidades, similar ao dispositivo com amortecedor. Contudo, diferencia-se pelo fato de que estas três velocidades são fixas e predefinidas, apresentando pouca variação entre repetições, enquanto o dispositivo com amortecedor permite trabalhar com a velocidade como uma variável contínua.

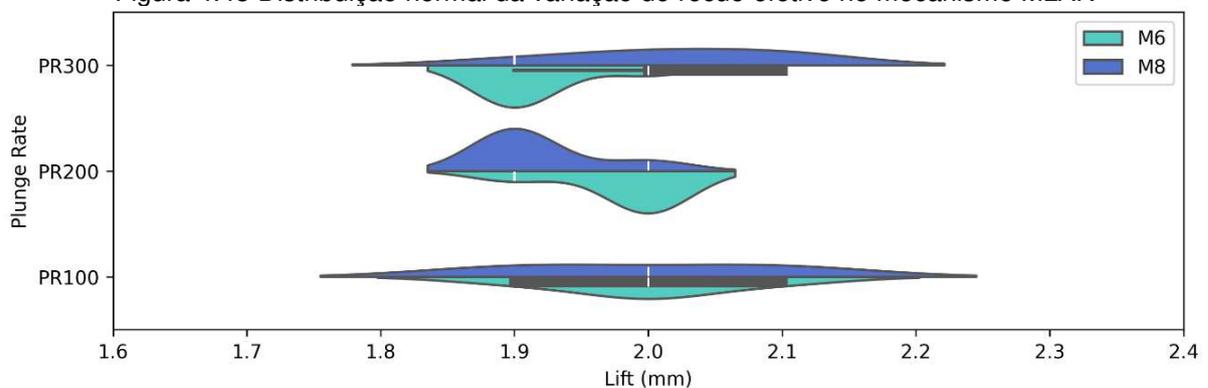
Figura 4.42 Velocidades medias experimentais do mecanismo MLAR



Fonte: elaborado pelo autor

Em relação ao recuo, foi elaborado um diagrama de violino para avaliar a precisão do sistema, considerando que este é um parâmetro crucial em termos de energia. Na Figura 4.43, observa-se um comportamento consistente, no qual, para ambos os tamanhos de pino, o sistema operou dentro do mesmo intervalo, com variações aleatórias de apenas 0,4 mm entre repetições do mesmo parâmetro. Esse nível de precisão é uma característica marcante dos mecanismos acionados por motor linear, que oferecem uma vantagem significativa em relação aos mecanismos baseados em mola. Enquanto os sistemas com mola exigem ajustes mecânicos físicos diretamente no dispositivo, os mecanismos com motor linear são configurados digitalmente por meio do painel de controle da fonte de solda. Essa fonte processa os dados e os transmite para a pistola, permitindo seu funcionamento. O sistema de retroalimentação incorporado garante alta repetitividade no processo de soldagem, detectando e corrigindo automaticamente em tempo real qualquer variação no movimento, assegurando consistência e eficiência no processo.

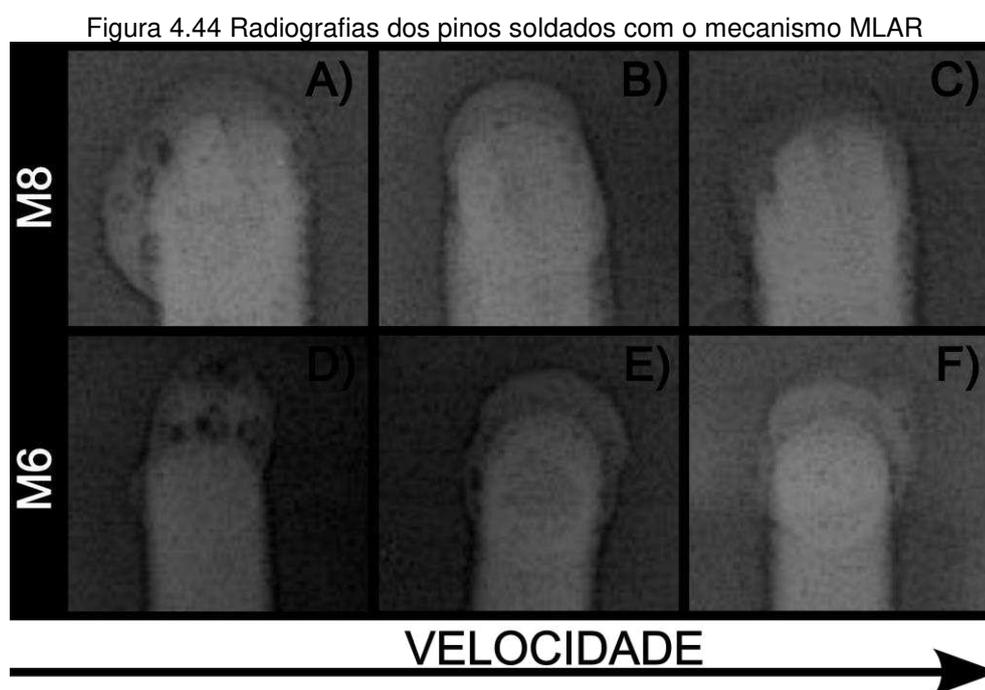
Figura 4.43 Distribuição normal da variação do recuo efetivo no mecanismo MLAR



Fonte: elaborado pelo autor

### 4.5.3 Efeitos do Controle Eletrônico da velocidade e posição

Nas radiografias apresentadas na Figura 4.44 dos pinos M8 (A, B e C), nota-se um comportamento fortemente dependente da velocidade de soldagem. Na velocidade mínima (A), observa-se a presença de vazios escuros ao longo da interface entre o corpo do pino e a chapa, com cavidades concentradas na região do colar. Já em velocidade intermediária (B), o colar apresenta-se muito mais homogêneo: restam apenas pequenas discontinuidades pontuais e o contraste de cinza aproxima-se de uma transição contínua entre o pino e o metal base. Por fim, na velocidade máxima (C), não há vestígios de porosidade interna; a junta está completamente consolidada, observando só as próprias ranhuras da geometria do pino na região da rosca.



Fonte: elaborado pelo autor

Nos pinos M6 (D, E e F), a velocidade mais eficiente torna-se evidente mesmo em condições elétricas diferentes. Na velocidade mínima (D), ainda aparecem alguns vazios isolados, principalmente na região do colar, mas o volume de fusão já se mostra substancialmente íntegro. Com velocidade intermediária (E), a região do colar torna-se praticamente livre de defeitos, mas exibindo uma discontinuidade na zona de fusão com contrastes marcados na região central. Já na velocidade máxima (F), a peça atinge uniformidade total, sem qualquer discontinuidade interna, mas apenas apresentando discontinuidades na região do colar indicando aporte de calor e

parâmetros de corrente e tempo adequados à geometria do pino, além de confirmar as velocidades sugeridas pela literatura.

Os resultados do teste de flexão, apresentados na Tabela 4.28, mostram o impacto do parâmetro *Plunge Rate* (PR) na confiabilidade das soldagens realizadas. Para os pinos M6, observa-se um desempenho consistente, com todas as amostras aprovadas independentemente do PR utilizado (100, 200 ou 300). Isso reforça a robustez do processo de soldagem, mesmo utilizando uma geometria incorreta e sob diferentes condições operacionais de velocidade.

Tabela 4.28 Teste de flexão (MLAR): (✓) Aprovado, (✗) Não Aprovado

<i>Plunge Rate</i>	Teste de Flexão	
	M6	M8
100	✓✓✓✓✓	✗✓✗✗✗
200	✓✓✓✓✓	✓✗✓✓✗
300	✓✓✓✓✓	✓✓✓✗✓

Fonte: elaborado pelo autor

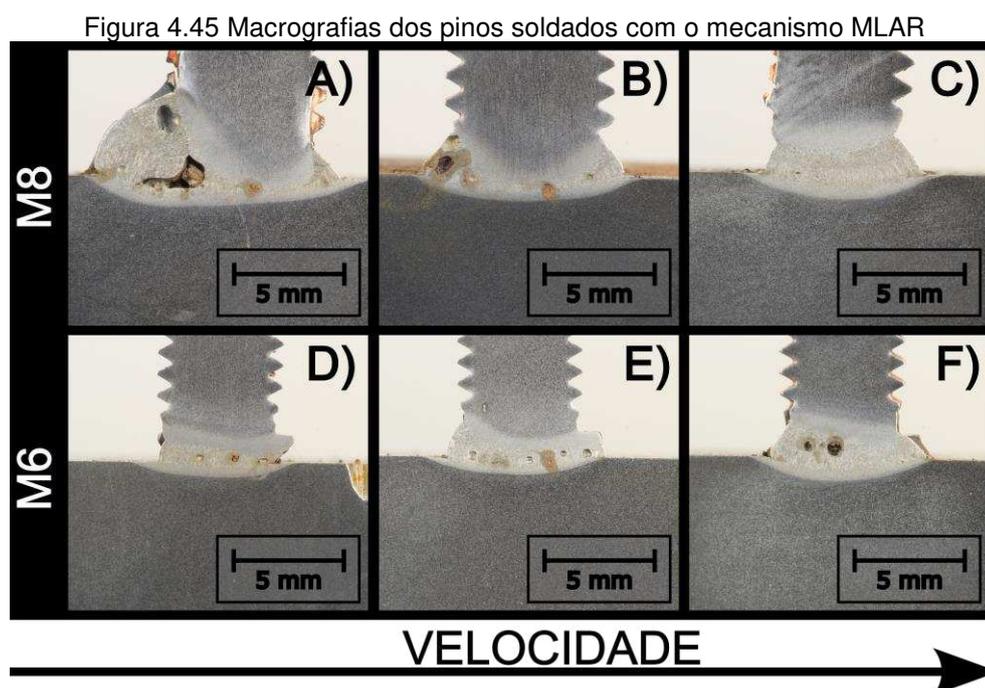
Por outro lado, os pinos M8 apresentaram maior sensibilidade ao PR. Para PR de 100, as falhas foram mais frequentes, indicando que velocidades muito baixas podem não ser suficientes para assegurar uma solda eficiente entre o material fundido e a superfície do pino, conforme sugerido pela bibliografia para esses diâmetros. Já para PR de 200, os resultados melhoraram, com duas falhas registradas. Embora este desempenho não seja o esperado devido à velocidade inferior à recomendada na literatura, ele demonstra que essa condição proporciona uma combinação que poderia se equilibrar tendo em conta parâmetros elétricos no processo. No entanto, ao aumentar o PR para 300, as falhas não foram frequentes, um resultado acertado de acordo ao previsto, já que essa velocidade é indicada como ideal para a faixa de diâmetros soldados segundo Trillmich (2016) embora tenha se observado uma falha que precisaria de maior precisão estatística para conferir se é ou não uma aleatoriedade.

Esses resultados indicam que, embora o PR tenha um papel importante, a geometria do pino e os demais parâmetros, como corrente e tempo de soldagem, são fatores-chave no desempenho do processo. Para os pinos M8, o PR máximo (300) mostrou ser o mais adequado para minimizar falhas induzidas por outros parâmetros e maximizar a confiabilidade.

As macrografias apresentadas na Figura 4.45 mostram diferenças visíveis entre os pinos M8 e M6 em termos de qualidade da solda e comportamento sob diferentes velocidades representadas pelo *Plunge Rate* (PR).

Nas macrografias apresentadas na Figura 4.45, para os pinos M8, observa-se que, na velocidade baixa (A) correspondente ao PR 100, o colar apresenta morfologia irregular, com poros de grande porte e descontinuidades internas que comprometem a homogeneidade, como evidenciado na Tabela 4.29. O aumento da energia média registrada para esse parâmetro é atribuído à baixa velocidade, que retarda o contato com a poça de fusão. Isso gera um pequeno intervalo adicional de arco aberto, aumentando a entrega de energia. Contudo, essa energia extra não resultou em melhorias na fusão, como evidenciado pelas áreas fundidas obtidas. Já em velocidade média (B) PR 200, há redução no número e no tamanho das cavidades, resultando em perfil mais uniforme, embora persistam defeitos isolados. Na velocidade alta (C) PR 300, o colar torna-se mais compacto e liso, com poucas bolhas internas.

Por sua vez, os pinos M6 revelam excelente estabilidade em todas as velocidades testadas. Na velocidade baixa (D) PR 100, o colar é homogêneo e praticamente isento de poros. Na condição de velocidade média (E), surgem apenas descontinuidades pontuais de pequeno porte, sem alteração significativa na área fundida. Já na velocidade alta (F), identificam-se pequenos poros localizados, porém sem comprometer a integridade estrutural do colar.



Fonte: elaborado pelo autor

Em síntese, o aumento da velocidade de avanço favorece a obtenção de colares mais densos e uniformes nos pinos M8. Já os pinos M6 mantêm-se consistentes em termos de área fundida e distribuição de defeitos ao longo de todo o espectro de velocidades, demonstrando menor sensibilidade ao parâmetro velocidade, ainda assim tem que se ter em conta os poros observados nas radiografias apresentadas para todas as amostras apresentadas podendo perder essa exposição de defeitos em processos como corte, polido e lixamento pelo que as macrografias devem ser analisadas em conjunto das radiografias, sendo elas a mesma amostra utilizada para as macrografias, um último dado importante a destacar foi a presença de sopro magnético na realização deste teste, provavelmente devido a características elétricas da fonte como a utilização de só um cabo terra (padrão da fonte), efeito que pode ser relevante para formação de defeitos.

Tabela 4.29 Áreas e energias experimentais (MLAR)

<i>Plunge Rate</i>	M6			M8		
	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostra (J)	Energia Média (J)	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia Amostra (J)	Energia Média (J)
300	9,79	1558	1555,2	11,15	3558	3290,8
200	9,52	1566	1581,8	11,84	3919	3897,4
100	9,59	1682	1696,2	13,42	3638	4714,4

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.5.4 Teste com *Short-Cycle*

Neste item, busca-se esclarecer uma possível confusão levantada no item anterior, onde se sugeriu que os sistemas com motores e controle eletrônico seriam superiores em termos de qualidade de soldagem quando comparados aos sistemas acionados por molas. Contudo, os resultados experimentais mostraram a presença de porosidade nas soldagens realizadas, mesmo com uma repetitividade satisfatória da velocidade de soldagem e com uma energia fornecida acertada, apresentando baixos desvios padrão. Este fato sugere que a diferença na qualidade das soldas não está diretamente associada ao tipo de controle da velocidade do sistema, mas pode estar relacionada a outros fatores operacionais ou de configuração do processo.

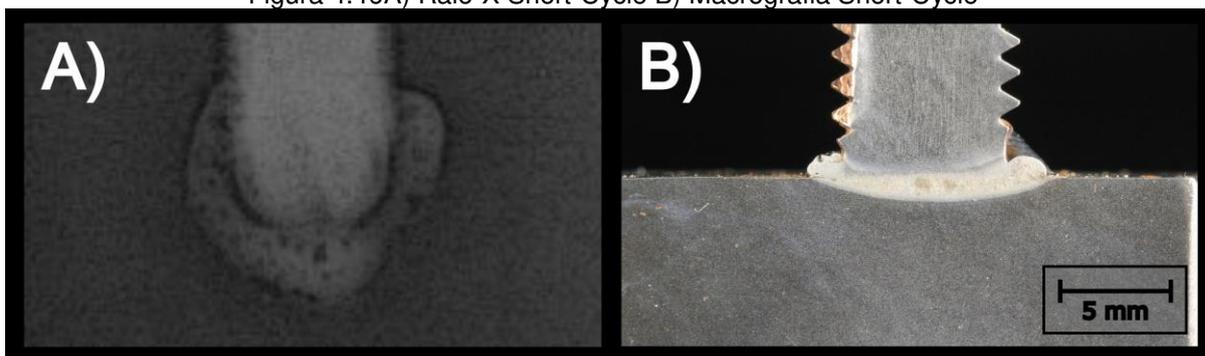
Além disso, é importante destacar que a fonte de alimentação utilizada foi projetada para operações de soldagem em ciclo curto (*short cycle*), enquanto a base de dados interna de parâmetros de soldagem corresponde ao processo de arco retraído. Dada essa discrepância, foi necessária uma investigação mais aprofundada

dos parâmetros de operação para avaliar se a utilização da fonte com a parametrização de ciclo curto poderia eliminar ou atenuar os defeitos observados, como a porosidade. Essa exploração de parâmetros foi fundamental para entender as possíveis limitações do equipamento em relação ao tipo de processo utilizado e oferecer direções para ajustes que possam otimizar a qualidade da solda.

O teste foi realizado utilizando pinos M8, com os seguintes parâmetros de soldagem: 90 ms de tempo de soldagem, corrente de 800 A, 1,2 mm de lift e 1,5 mm de mergulho. Foram realizadas dez soldagens, as quais foram submetidas a ensaio de raios X. Posteriormente, duas das soldagens foram selecionadas aleatoriamente para análise macroscópica, enquanto as outras sete foram submetidas a testes de flexão. Todos os testes de flexão foram aprovados, sem nenhuma ruptura nas soldas na seção transversal da zona fundida.

Quanto às análises macroscópicas (Figura 4.46b), observou-se uma área fundida menor as das soldas por arco retraído, porém consistente, sem presença de porosidade na área transversal da solda. Alguns poros foram observados nas bordas da área fundida, mais especificamente na região do colar, provavelmente causados pela interação da poça de fusão com a rosca do pino, resultando em uma falta de fusão entre essas regiões. No entanto, este efeito não é relevante para a resistência estrutural do pino, uma vez que ocorre fora da área transversal principal.

Figura 4.46A) Raio-X Short-Cycle B) Macrografia Short-Cycle



Fonte: elaborado pelo autor

Esses poros foram confirmados nas radiografias (Figura 4.46a), com uma presença significativa na região do colar. As sombras observadas no centro do pino, por outro lado, são atribuídas à presença das ranhuras na geometria da rosca do pino, e não indicam porosidade. Este diagnóstico foi confirmado por meio das análises de macrografias comentados anteriormente, que não mostraram a presença do defeito mencionado, corroborando a ausência de porosidade na região central do pino.

Em resumo, observou-se uma melhora significativa nos defeitos ao utilizar a fonte com parâmetros de processo configurados para ciclo curto. No entanto, constatou-se uma incoerência entre o propósito original da fonte e a base de dados interna programada, a qual está ajustada para o processo de arco retraído. Além disso, foi identificado que a fonte não possui a estrutura necessária para a adição de gás de proteção, o qual é imprescindível para ciclos superiores a 100 ms.

Vale ressaltar que, para os testes realizados com o processo de arco retraído, foi necessário o desenvolvimento de acessórios específicos para permitir a introdução de gás de proteção, com o intuito de mitigar os defeitos observados. Este ajuste foi essencial para alcançar uma maior qualidade na solda, garantindo que os resultados se alinhassem às expectativas do processo e minimizando a formação de porosidade e outros defeitos associados ao processo de soldagem.

#### 4.6 COMPARAÇÃO GERAL

Os mecanismos baseados unicamente em mola destacaram-se pela simplicidade e consistência operacional. Com velocidades médias de 427,8 mm/s para pinos M6 e 327,33 mm/s para pinos M8, apresentaram alta repetitividade, embora seus desvios-padrão sejam maiores que os do mecanismo SMDC. A pré-carga da mola demonstrou influência significativa, especialmente em condições de pré-carga máxima, onde foi observada maior dispersão nos resultados. Essa dispersão se observou junto com um aumento de defeitos, como bolhas internas, devido ao menor tempo de escape dos gases durante o arco. Apesar disso, a simplicidade estrutural e a confiabilidade em condições padronizadas tornam este mecanismo uma escolha viável para aplicações onde a robustez supera a necessidade de ajustes finos.

O sistema que combina solenoide e mola proporcionou maior flexibilidade operacional através do ajuste do gap na descarga capacitiva, mas apresentou inconsistências no gap efetivo, principalmente para pinos maiores como o M8. Velocidades médias de 371,8 mm/s para M6 e 304,86 mm/s para M8 foram registradas. Em condições intermediárias de gap (4 mm), o dispositivo demonstrou os melhores resultados em termos de qualidade de solda e confiabilidade mecânica, enquanto gaps extremos comprometeram a formação do colar. Apesar de possuir uma repetitividade levemente superior ao mecanismo MDC, a faixa efetiva de operação é mais limitada. A principal vantagem deste mecanismo reside no uso de uma mola de menor força, o que permite soldar em chapas mais finas sem causar deformações

pelo impacto da solda. No entanto, essa característica também reduz sua aplicabilidade em cenários que demandam maior robustez estrutural, restringindo suas aplicações a contextos específicos.

Este sistema solenoide mola aplicado ao arco retraído destacou-se pela dependência crítica do recuo para estabilizar o arco e assegurar a qualidade do processo. A velocidades intermediárias da faixa de operação (204 mm/s para M10 e M12), os pinos apresentaram soldas homogêneas e colares bem formados. Contudo, em condições de recuo máximo, defeitos como bolhas e descontinuidades foram comuns devido ao aumento da potência do arco e instabilidades provocadas pela elevada altura do arco.

A introdução do amortecedor no mecanismo solenoide mola melhorou significativamente o controle de velocidade e reduziu respingos mantendo ao tempo as características elétricas do processo. Velocidades de 91,46 mm/s para M16 e 91,32 mm/s para M22 foram alcançadas, garantindo boa qualidade e colares consistentes. Apesar disso, os pinos M22 exibiram descontinuidades devido às interações complexas na solidificação do material.

Os mecanismos com motor linear mostraram o maior controle e precisão. Velocidades ajustáveis de 50 a 233 mm/s em conjunto com uma monitoração e correção do recuo, permitiram alta repetitividade e consistência no processo. Pinos M6 e M8 embora tenham sido atribuídos à geometria inadequada e parâmetros elétricos inconsistentes apresentaram áreas fundidas com defeitos.

De maneira geral, os mecanismos eletrônicos e amortecidos com compensação de recuo (SMAAR e MLAR) destacaram-se em controle e flexibilidade. Enquanto sistemas baseados em mola (MDC, SMDC e SMAR) são eficientes para condições robustas e repetitivas, os sistemas eletrônicos superaram em precisão e adaptação. A qualidade da solda foi mais consistente em parâmetros intermediários da faixa de operação, e a independência entre recuo e protrusão nos mecanismos SMAAR ampliou o intervalo operacional. A escolha do mecanismo ideal depende diretamente das necessidades específicas de aplicação, como controle fino, pinos de tamanhos maiores ou simplicidade para operações padronizadas.

Respeito ao recuo no arco retraído, em síntese, se o recuo não for ajustado corretamente, a entrega de potência pode ser insuficiente ou excessiva, o que pode causar uma série de defeitos na soldagem. Um recuo do pino demasiado grande pode levar ao superaquecimento, provocando porosidade ou inclusões, mesmo com o arco

dispensando calor sobre uma área mais ampla e conseqüentemente reduzindo a concentração de calor. Sob o mesmo ponto de vista, um retrocesso insuficiente é incapaz de gerar uma fusão adequada, aumentando o risco de falta de fusão ou uniões fracas.

Um resumo das anteriores comparações é apresentado na Tabela 4.30

Tabela 4.30 Resumo Comparação de Características

<b>Mecanismo</b>	<b>Faixa de Velocidade (Aprox.)</b>	<b>Repetitividade</b>	<b>Qualidade da Solda</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
MDC	300 - 460 (mm/s)	Baixa (Alto Desvio Padrão)	Boa na totalidade da faixa de operação	Simplicidade e Robustez	Formação de bolhas com pré-carga máxima; danifica chapas finas
SMDC	270 - 480 (mm/s)	Levemente superior ao MDC	Melhor em GAPs intermediários, piora nos extremos	É possível soldar em chapas finas sem danificar devido a sua mola fraca	Condições extremas da faixa de operação produzem soldas insatisfatórias
SMAR	80 - 290 (mm/s)	Boa com Recuos intermediários atingindo velocidades recomendadas na literatura	Boa seguindo os recuos recomendados pelo fabricante	Processo robusto em uma faixa de operação pequena	Impossível regular velocidade sem mexer nas características do arco
SMAAR	40 - 270 (mm/s)	Alta com compensação na velocidade fornecida pelo amortecedor	Consistente com recuo e protrusão independentes	Ampla faixa de operação	Não possui escalas na regulagem do amortecimento promovendo defeitos por parâmetros inadequados
MLAR	50 - 250 (mm/s)	Muito alta e com monitoração inclusa	Boa na faixa de velocidade recomendada	Precisão, controle total com monitoramento	Necessidade de controle eletrônico sofisticado

Fonte: elaborado pelo autor

## 5 CONCLUSÕES

A caracterização mecânica dos mecanismos internos das pistolas de *Stud Welding* permitiu identificar como molas, solenoides, amortecedores e motores influenciam diretamente a estabilidade do processo e a qualidade geométrica das soldas. A integração entre os componentes mecânicos e os sistemas eletrônicos demonstrou impacto significativo na execução dos movimentos, com reflexos na repetitividade, robustez e controle da soldagem.

Parâmetros como como pressão de mola, recuo, gap, amortecimento e *plunge rate* que influenciam a velocidade de avanço, mostraram-se decisivos para a qualidade da solda e estabilidade do processo. No arco retraído, recuos intermediários e velocidades compatíveis com as faixas sugeridas favoreceram a formação de colares homogêneos e sem defeitos, enquanto valores extremos resultaram em bolhas, cavidades ou descontinuidades ou diretamente numa solda falida. Mecanismos com molas apresentaram maior robustez frente a variações na velocidade, mas não no recuo, ao passo que mecanismos com controle eletrônico demonstraram maior precisão, porém com maior sensibilidade paramétrica no momento de variar o diâmetro do pino.

No mecanismo MDC, as velocidades registradas foram de 427,8 mm/s para pinos M6 e 327,33 mm/s para pinos M8. Apesar de estarem abaixo da faixa de valores sugerida pela literatura técnica (500–700 mm/s), as soldas apresentaram colares funcionais e sem falhas evidentes, indicando que outros fatores do sistema podem compensar a insuficiência de velocidade. No entanto, velocidades abaixo de 330 mm/s demonstraram maior propensão a falha.

O SMDC operou com velocidades de 371,8 mm/s (M6) e 304,86 mm/s (M8), inferiores ao intervalo de velocidade sugerido pela literatura para soldagem com *gap*. Os resultados mostraram que a faixa de *gap* projetado no dispositivo é eficiente para a não formação de defeitos relevantes em faixas intermediárias, mas a limitação do sistema em superar 450 mm/s restringe sua comparação com faixas de velocidades estabelecidas na literatura. Outra limitação observada no sistema foi a incapacidade de realizar soldagens com gap nulo (0 mm), impedindo a emulação do processo de *Stud Welding* por contato. Esse resultado evidencia que o dispositivo não possui os requisitos dinâmicos necessários para operar nessas condições.

O mecanismo SMAR alcançou velocidades de avanço próximas a 204 mm/s, alinhadas ao desempenho esperado para seu tipo construtivo conforme a literatura. Recuos intermediários resultaram em colares bem formados e fusões consistentes, enquanto recuos elevados geraram instabilidade de arco e defeitos associados à solidificação irregular.

O SMAAR, com sistema de amortecimento, obteve maior controle da velocidade e formação mais estável de colares em pinos M22, com velocidades próximas a 91,32 mm/s. Apesar disso, velocidades muito baixas, como 42,08 mm/s, acentuaram descontinuidades na base do pino, evidenciando a importância de respeitar os limites mínimos operacionais descritos pela literatura.

Por fim, o MLAR, equipado com motor linear, demonstrou alta precisão, repetitividade e capacidade de ajuste em tempo real. No entanto, a geometria dos pinos e os parâmetros elétricos impactaram negativamente a formação dos colares, sinalizando a necessidade de ajustes na parametrização para melhorar sua aplicabilidade em diferentes condições operacionais.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma das principais limitações observadas no presente trabalho foi a impossibilidade de operar em regimes de alta velocidade, acima de 700 mm/s, especialmente nos mecanismos de descarga capacitiva. Estudos futuros poderiam projetar dispositivos capazes de alcançar estas velocidades, permitindo validar os limites teóricos sugeridos pela literatura e compreender os impactos na fusão e solidificação.

Nos mecanismos de arco retraído, é necessário desenvolver e testar diferentes configurações de amortecedores devido a uma falta de ajustes precisos por parte dos fabricantes. A otimização e correta caracterização e parametrização destes sistemas poderia reduzir respingos e melhorar a homogeneidade dos colares, principalmente em pinos de maior diâmetro, como M22, onde as discontinuidades foram mais frequentes.

A integração de sensores de alta precisão para monitoramento em tempo real de parâmetros como velocidade de avanço, recuo e força aplicada é outra proposta promissora. Este avanço permitiria um controle adaptativo mais preciso, melhorando a repetitividade e a eficiência do processo ainda em mecanismos comandados por molas, isso permitiria aplicar estratégias como pulsos no solenoide para um controle indireto da velocidade.

Além disso, o uso de simulações numéricas é uma abordagem que pode complementar os estudos experimentais. Modelos computacionais detalhados poderiam prever o comportamento dos mecanismos em diferentes condições operacionais, reduzindo a necessidade de testes iniciais e otimizando o design dos sistemas.

Por fim, seria de grande valor explorar a relação entre a força de impacto e os resultados da soldagem. A caracterização detalhada dos diferentes tipos de molas usadas nos mecanismos, considerando a rigidez e como ela afeta a dinâmica do pino durante a soldagem, pode oferecer subsídios importantes para melhorar a consistência e a qualidade do processo. Este estudo poderia incluir testes com molas de diferentes materiais e configurações, bem como a integração de sistemas de controle eletrônico que permitam ajustes em tempo real da força aplicada, velocidade e recuo.

Adicionalmente, a eficiência geral do processo de soldagem é um aspecto ainda pouco explorado na literatura. Estudos futuros poderiam focar em avaliar o consumo energético em diferentes mecanismos e condições de operação, correlacionando-o com a qualidade final da solda. Isso permitiria identificar parâmetros que maximizem a eficiência energética sem comprometer a robustez do colar e a consistência do processo.

## REFERÊNCIAS

- ABBASSI, Rouzbeh *et al.* An integrated method for human error probability assessment during the maintenance of offshore facilities. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 94, p. 172–179, mar. 2015.
- ANDOLZ BIELSA, Javier. **Cálculo y Diseño de un Motor Lineal Tubular de Imanes Permanentes**. [S.l.: S.n.].
- CANON. **Câmera EOS 60D**. [S.l.: S.n.].
- CANON. **Extender EF 2x III**. [S.l.: S.n.].
- CANON. **EF 180mm f/3.5L Macro USM**. [S.l.: S.n.].
- CAVITAR. **Cavilux HF**. [S.l.: S.n.].
- CHAMBERS, Harry A. Principles and Practices of Stud Welding. **PCI Journal**, v. 46, n. 5, p. 46–58, 1 set. 2001.
- EYRES, D. J.; BRUCE, G. J. Welding and cutting processes used in shipbuilding. *In*: **Ship Construction**. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 81–101.
- FANCIERSTUDIO. **VL576 LED Light Panel**. [S.l.: S.n.].
- FERNANDES DA ROSA, Alisson *et al.* Analysis and thermal characterization of Stud Welding in shipbuilding applications. 25 out. 2022.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electrical Machinery**. 6<sup>a</sup> ed. [S.l.: S.n.].
- FLIR. **HD Handheld Thermal Imaging Camera - T1030SC**. [S.l.: S.n.].
- GERDAU. **Certificado de Qualidade nº 8132313755/000010**. Brasil: [S.n.].
- IMAGE INDUSTRIES INC. **Important Facts And Considerations About Stud Welding**. Disponível em: <<https://imageindustries.com/resources/blog/important-facts-and-considerations-about-stud-weld/>>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- IMC. **Manual do Usuário - SAP - V4 + V4Ti + V4CTi** (IMC, Org.). [S.l.: S.n.].
- ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **ISO 13918 Welding — Studs and ceramic ferrules for arc stud welding**. ISO 14555 ed. [S.l.: S.n.].
- ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **ISO 14555 Welding — Arc stud welding of metallic materials**. ISO 14555 ed. [S.l.: S.n.].
- KAPLER, Mateusz; NOWACKI, Jerzy; SAJEK, Adam. The Development of Arc Stud Welding. **Biuletyn Instytutu Spawalnictwa**, v. 2019, n. 4, p. 27–38, 2019.

LIMA MARCHIONE, Tiago de Siqueira. **Desenvolvimento de Ferramenta de Suporte à Parametrização do Processo “Stud Welding” em Aplicações com Restrição Térmica na Indústria Naval**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2024.

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**, v. 416, p. 012015, 26 out. 2018.

NELSON. **Operating The Arc Charger N550C**. [S.l.: S.n.].

NELSON, E. F. **Stud Welder**. United States, 27 fev. 1940.

NISHIKAWA, W. The principle and application field of stud welding. **Welding International**, v. 17, n. 9, p. 699–705, set. 2003.

NORFAS. **Safer Cars with Automotive Stud Weld Fastening Systems**. Disponível em: <<https://norfas.com/safer-cars-with-automotive-stud-weld-fastening-systems/>>. Acesso em: 2 jun. 2025.

NSW NIPPON STUD WELDING CO. **History of Stud Welding**. Disponível em: <<https://www.nsw-j.com/en/stud/history/>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

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**, v. 12, n. 3, p. 274–281, 4 abr. 2007.

PETER GERMANESE. **The Different Types of Stud Welder Systems and Stud Guns**. Disponível em: <<https://blog.red-d-arc.com/types-stud-welder-guns/>>. Acesso em: 10 mar. 2025.

PHOTRON INC. **The FASTCAM NOVA brings together unique CMOS image sensor technologies**. [S.l.: S.n.].

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 6<sup>a</sup> ed. [S.l.: S.n.].

SCHMITT, K. G.; KNETSCH, H. **Control of stud-welding apparatus**. United Kingdom, 22 ago. 1990.

SOYER. **Operating Instructions: Stud Welder BMS-10N and BMS-10NV**. Germany: [S.n.].

SOYER. **Operating Instructions: BMH-22i Stud Welder**. Germany: [S.n.].

SOYER. **Operating Instructions: BMK-16i Stud Welder**. Germany: [S.n.].

STANLEY. **Stanley Engineered Fastening**. Disponível em: <<https://www.stanleyengineeredfastening.com/resources/stud-welding-methods>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

STEELE, L. J.; MARTIN, H.; MCCARTHY, A. E. **Electric Welding**. United States, 21 mar. 1922.

TAYLOR STUD WELDING. **Stud Welding Terminology**. Disponível em: <<https://www.taylor-studwelding.com/blog/stud-welding-terminology>>. Acesso em: 2 jun. 2025.

TRILLMICH, R.; WELZ, W. **Stud Welding Principles and application**. English Edition ed. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2016. v. 12

TRILLMICH, Rainer. **Advantages with careful planning – Shear connector welding through galvanized profiled sheet**. [S.l.: S.n.].

VINNEM, Jan Erik; HAUGEN, Stein; OKOH, Peter. Maintenance of petroleum process plant systems as a source of major accidents? **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 40, p. 348–356, mar. 2016.

WAYGATE TECHNOLOGIES. **ERESCO 65 MF4**. [S.l.: S.n.].

WEMAN, Klas. Other methods of welding. *In*: **Welding Processes Handbook**. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 133–142.

ZHANG, Qian *et al.* Effect of the Welding Process on Microstructure, Microhardness, and Residual Stresses of Capacitor Discharge Stud Welded Joint. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 144, n. 1, 1 jan. 2022.