



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

Vitor Massao Nishi Ueta

**UMA PROSPECÇÃO DE VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS COM VISTAS À
RECUPERAÇÃO OU AUMENTO DE ESPESSURA DE CHAPAS DE AÇO DE
EMBARCAÇÕES**

Florianópolis - SC

2025

Vitor Massao Nishi Ueta

**UMA PROSPECÇÃO DE VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS COM VISTAS À
RECUPERAÇÃO OU AUMENTO DE ESPESSURA DE CHAPAS DE AÇO DE
EMBARCAÇÕES**

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: Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.

Florianópolis - SC

2025

Ueta, Vitor Massao Nishi

UMA PROSPECÇÃO DE VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS COM
VISTAS À RECUPERAÇÃO OU AUMENTO DE ESPESSURA DE CHAPAS DE
AÇO DE EMBARCAÇÕES / Vitor Massao Nishi Ueta ; orientador,
Régis Henrique Gonçalves e Silva, coorientador, Mateus
Barancelli Schwedersky, 2025.

274 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. Variantes MIG/MAG avançadas.
3. MIG/MAG. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves e . II.
Schwedersky, Mateus Barancelli. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Vitor Massao Nishi Ueta

**UMA PROSPECÇÃO DE VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS COM VISTAS À
RECUPERAÇÃO OU AUMENTO DE ESPESSURA DE CHAPAS DE AÇO DE
EMBARCAÇÕES**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 21 de março de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

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

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Prof. Leandro João da Silva, Dr. Eng.
Universidade Federal do Paraná

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

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

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

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.
Coorientador

Florianópolis - SC, 2025.

Dedico este trabalho aos meus pais, Eduardo e Sueli, que sempre me incentivaram, apoiaram e ofereceram a base necessária para que eu pudesse seguir em frente e alcançar meus objetivos. Sem vocês, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Marinha do Brasil, instituição na qual tenho a honra de servir como militar e engenheiro naval, por me permitir a disponibilidade para cursar o mestrado possibilitando assim o desenvolvimento dos meus conhecimentos na área de processos de soldagem. O conhecimento adquirido certamente foi um investimento que dará retorno para a instituição, e este conhecimento será devidamente disseminado.

Gostaria de dar um agradecimento especial ao meu orientador, Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, e ao meu coorientador, Dr. Eng. Mateus Barancelli Schwedersky, por me orientarem ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Vocês não apenas me forneceram a base técnica necessária, mas também compartilharam seus valiosos conhecimentos na fronteira da ciência. Sem o apoio e a dedicação de vocês, o LABSOLDA não teria a infraestrutura que possui hoje, com diversos equipamentos, consumíveis em estoque, infraestrutura para soldagem e equipamentos de ensaios, que possibilitam a realização de diversas análises, ultrapassando o que se espera de um laboratório de pesquisa acadêmica. O renome do LABSOLDA é tamanho que atrai pessoal de alto nível intelectual, e que tive a honra de trabalhar ao lado de todos eles.

Em especial, agradeço ao Daniel Galeazzi, que sempre me ajudou desde a montagem da fonte de soldagem, configuração do robô antropomórfico e esteve sempre disponível para tirar minhas dúvidas no dia a dia do laboratório.

Agradeço também ao Tiago de Siqueira Lima Marchione, por toda a ajuda prestada desde antes da minha chegada, sempre de forma extremamente solícita, espontânea e dedicada, contribuindo significativamente para a minha adaptação e progresso no mestrado. Agradeço também ao laboratório CERTI e à CAPES.

A toda a equipe do LABSOLDA, meus sinceros agradecimentos. Foi um prazer enorme conviver com todos durante esses dois anos. A disponibilidade e o apoio de cada um de vocês foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. A experiência que tive ao lado de todos não só contribuiu para minha formação profissional, mas também para meu crescimento pessoal. Obrigado por tudo.

RESUMO

O trabalho investiga variantes avançadas do processo de soldagem MIG/MAG, com aplicação ao incremento de espessura em chapas de aço ASTM A36 por sobreposição de cordões paralelos, lado a lado. Utiliza arame ER70S6 e gás de proteção com 85% de argônio e 15% de dióxido de carbono, testando variantes como curto-circuito controlado, curto-circuito com controle eletromecânico e pulsado adaptativo. Investiga o comportamento das variantes ao variar a velocidade de alimentação e, em etapa subsequente, a variação da Distância do Bico de Contato Peça (DBCP), monitorando parâmetros elétricos, velocidade de alimentação de arame e a morfologia da superfície. Avalia a estabilidade da transferência metálica por oscilogramas e filmagens de alta frequência. Define uma equação que estima parâmetros de soldagem para aumentos de espessura predeterminados. Demonstra que a variante de curto-circuito com controle eletromecânico, comercialmente conhecida como Cold Metal Transfer (CMT), se sobressai em altas velocidades por sua robustez no controle da transferência e menor energia de soldagem. Constata que os controles de penetração disponíveis na fonte falham em manter penetração constante com variação da DBCP, na condição avaliada. Conclui que o CMT se destaca como a variante mais promissora para a aplicação em estudo, oferecendo controle robusto, deposição uniforme e baixa energia de soldagem.

Palavras-chave: MIG/MAG; aumento de espessura, curto-circuito controlado; curto-circuito com controle eletromecânico; GMAW-P; Cold Metal Transfer; Low Spatter Control; Pulse Multi Control.

ABSTRACT

This study investigates advanced MIG/MAG welding process variants aimed at thickness increment in ASTM A36 steel plates through side-by-side parallel bead overlays. It employs ER70S6 wire and a shielding gas mixture of 85% argon and 15% carbon dioxide, testing variants such as controlled short-circuit, short-circuit with electromechanical control, and adaptive pulsed modes. The research examines the behavior of these variants by varying wire feed speed (WFS) and, subsequently, the Contact Tip to Workpiece Distance (CTWD), while monitoring electrical parameters, wire feed speed, and surface morphology. Metal transfer stability is evaluated using oscillograms and high-speed filming. An equation is developed to estimate welding parameters for predetermined thickness increments. The study demonstrates that the short-circuit variant with electromechanical control, commercially known as Cold Metal Transfer (CMT), excels at high wire feed speeds due to its robust transfer control and lower welding energy. It finds that the available penetration controls fail to maintain constant penetration with CTWD variation under the evaluated conditions. The study concludes that CMT stands out as the most promising variant for this application, offering robust control, uniform deposition, and low welding energy.

Keywords: MIG/MAG; thickening; controlled short-circuit; short-circuit with electromechanical control; GMAW-P; Cold Metal Transfer; Low Spatter Control; Pulse Multi Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de perda de espessura por corrosão em chapa de convés de navio.....	17
Figura 2 - Custos de soldagem.....	18
Figura 3 - Balanço de forças atuantes na transferência metálica.	20
Figura 4 - Geometria das linhas de corrente em diferentes situações.....	21
Figura 5 – Seção transversal de um cordão depositado, evidenciando as áreas do reforço e do metal de base fundido.	25
Figura 6 – Penetração em função da VS, considerando VA constante.	27
Figura 7 – Controle externo pela VA.....	28
Figura 8 - Característica da fonte de comando de tensão.	31
Figura 9 - Circuito elétrico representando didaticamente o processo MIG/MAG convencional.	33
Figura 10 - Efeito Pinch Durante a Transferência por Curto-Circuito.....	34
Figura 11 - Transferência por Curto-Circuito.	34
Figura 12 – Forma de onda de corrente na variante CCC.....	37
Figura 13 – Tocha e peça.....	38
Figura 14 - Etapas de transferência por curto-circuito com controle eletromecânico.	39
Figura 15 - Comparativo entre variantes convencional (esquerda), CCC (meio) e curto-circuito com controle eletromecânico (direita).	39
Figura 16 – Forma de onda de corrente GMAW-P.	40
Figura 17 - Imagens da sequência de eventos de uma transferência metálica por corrente pulsada e os correspondentes oscilogramas de corrente e tensão. Estes dados são para o arame ER70S-6 de 1,2 mm, gás argônio com 8% CO ₂ , corrente média de 200 A, I _p =380 A, t _p = 2,7 ms, I _b = 63 A, t _b = 3,5 ms, tensão média= 30 V, V _a = 5,4 m/min., V _s = 30 cm/min.....	41
Figura 18 – Faixa de operação na condição.....	43
Figura 19 –Diagramas esquemáticos representando as variantes do processo MIG/MAG empregadas nos ensaios experimentais.	45
Figura 20 – Representação dos experimentos e análises realizados com variações das variáveis VA e VS.....	46

Figura 21 - Representação dos experimentos e análises realizados com variações de DBCP.....	46
Figura 22 – Aparato experimental.....	47
Figura 23 – Identificação dos períodos de pulso (P), base e período total, a partir de limiar de tensão para GMAW-P.....	52
Figura 24 – Identificação de picos de corrente a partir de limiar de corrente.	53
Figura 25 – Esquemático das dimensões das sobreposições de cordões. ..	53
Figura 26 – Posicionamento dos cordões na chapa.....	54
Figura 27 – Movimento da tocha variando DBCP para cordões individuais.	57
Figura 28 – Regiões das macrografias que serão analisadas para cada variante.	57
Figura 29 – Características principais da seção transversal.....	57
Figura 30 – Medição de ângulo de molhamento.....	58
Figura 31 - Movimento da tocha variando DBCP para sobreposição de cordões.	58
Figura 32 – Filmagem em alta frequência variando DBCP.....	59
Figura 33 – Transferência metálica na variante LSC e VA de 4,1 m/min.	64
Figura 34 – Ciclo de transferência na variante LSC e VA de 4,1 m/min.	65
Figura 35 - Sobreposições de cordões lado a lado.	67
Figura 36 – Escaneamento 3D da superfície e perfis transversais das sobreposições de cordões e região analisada em cada VA e VS.	67
Figura 37 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante LSC, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.	68
Figura 38 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	69
Figura 39 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.	69
Figura 40 - Gráfico de altura média e desvio padrão na variante LSC.	70
Figura 41 - Transferência metálica na variante Standard e VA de 4,1 m/min.	72
Figura 42 – Ciclo de transferência na variante Standard com VA de 4,1 m/min.	73

Figura 43 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante Standard, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.....	74
Figura 44 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Standard, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.....	74
Figura 45 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Standard, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.....	75
Figura 46 - Gráfico de altura média e desvio padrão na variante Standard..	75
Figura 47 - Oscilograma de corrente e tensão na variante CMT para VA de 4,3 m/min.	77
Figura 48 - Transferência metálica na variante CMT e VA de 4,3 m/min.	77
Figura 49 – Detalhes da corrente no CMT e energia de soldagem.	78
Figura 50 - Instantes com VA nula e reversão do sentido da VA, Linha superior é o instante que o arame para de retroceder e começa a avançar para a poça, e a linha inferior é o inverso. VA média: (A) 4,3 m/min, (B) 5,8 m/min, (C) 7,9 m/min, (D) 10,0 m/min e (E) 11 m/min.	80
Figura 51 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante CMT, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.	82
Figura 52 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	83
Figura 53 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.	83
Figura 54 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.	84
Figura 55 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.....	84
Figura 56 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 11 m/min e VS de 80 cm/min.	85
Figura 57 – Gráfico de altura média e desvio padrão na variante CMT.....	86
Figura 58 - Transferência metálica na variante PMC e VA de 4,1 m/min.	87
Figura 59 - Ciclo de transferência na variante PMC com VA de 4,1 m/min. .	88
Figura 60 – Forma de corrente no PMC variando velocidades de arame.....	89
Figura 61 – Variantes PMC nos instantes de destacamento da gota. VA (m/min): (A) 4,1; (B) 5,9 e (C) 8,3.....	90

Figura 62 – Variantes PMC nos instantes de destacamento da gota. VA (m/min): (A) 10,3; (B) 12,5 e (C) 14,5.	90
Figura 63 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante PMC, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.	93
Figura 64 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	93
Figura 65 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.	94
Figura 66 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.	94
Figura 67 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.	95
Figura 68 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 12,5 m/min e VS de 90 cm/min.	95
Figura 69 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 14,5 m/min e VS de 105 cm/min.	96
Figura 70 – Gráfico de altura média e desvio padrão na variante PMC.	97
Figura 71 – Cordão PMC com VA de 16,6 m/min e VS de 120 cm/min.	97
Figura 72 – Final do cordão PMC com VA de 16,6 m/min e VS de 120 cm/min.	97
Figura 73 – Gráficos das variantes CMT, LSC, Standard e PMC, variando VA.	98
Figura 74 - Período, Tempo de Arco/Pulso e Tempo de Curto/Base por VA.	100
Figura 75 - Frequência por VA.	101
Figura 76 - Perfis das sobreposições de cordões das quatro variantes, obtidos com DBCP de 15mm e VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	102
Figura 77 – Altura Média com Intervalos (Média ± Desvio Padrão) e valores extremos das regiões analisadas nas superfícies das variantes para VA de 4,1 m/min.	102
Figura 78 - Comparação das fotografias com maior quantidade de respingos para os processos Standard, LSC, CMT e PMC, com VA de 4,1 m/min, capturadas com tempo de exposição prolongado.	103

Figura 79 - Comparação das fotografias com menor quantidade de respingos para os processos Standard, LSC, CMT e PMC, com VA de 4,1 m/min, capturadas com tempo de exposição prolongado.....	104
Figura 80 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante curto-circuito convencional.	107
Figura 81 – Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante convencional...107	
Figura 82 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante Convencional, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	108
Figura 83 – Escaneamento 3D da superfície das sobreposições de cordões e região analisada variando DBCP.	109
Figura 84 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Convencional, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	109
Figura 85 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante Standard.	110
Figura 86 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante Standard.	111
Figura 87 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante Standard, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).	111
Figura 88 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Standard, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	112
Figura 89 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante LSC.....	113
Figura 90 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante LSC.....	113
Figura 91 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante LSC, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).	114
Figura 92 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	114

Figura 93 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante LSC CP.....	115
Figura 94 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante LSC CP.....	116
Figura 95 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante LSC CP, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm). .	116
Figura 96 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC CP, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	117
Figura 97 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante CMT.....	118
Figura 98 - Momento de inversão do sentido de alimentação de arame, de recuo para avanço, nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, na variante CMT.	118
Figura 99 - Momento de inversão do sentido de alimentação de arame, de avanço para recuo, nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, na variante CMT.	119
Figura 100 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante CMT.....	119
Figura 101 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante CMT, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).	120
Figura 102 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	120
Figura 103 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante PMC.....	122
Figura 104 – Forma de corrente no PMC variando DBCPs.....	123
Figura 105 – Comprimento do arco na variante PMC no início do pulso de corrente. DBCP: (A) 12 mm, (B) 21 mm, (C) 30 mm.	124
Figura 106 – Oscilograma de tensão variando DBCP na variante PMC.....	124
Figura 107 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante PMC, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).	125

Figura 108 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	126
Figura 109 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante PMC CP.....	128
Figura 110 - Comprimento do arco na variante PMC CP no início do pulso de corrente. DBCP: (A) 12 mm, (B) 21 mm, (C) 30 mm.	129
Figura 111 – Oscilograma de U variando DBCP na variante PMC CP.....	130
Figura 112 – Curtos-circuitos na DBCP de 30 mm, variante PMC CP.	130
Figura 113 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante PMC, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).	132
Figura 114 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).....	132
Figura 115 - Comprimento do arco na variante pulsado convencional no desprendimento de gota, para DBCPs: (A) 15 mm, (B) 18 mm, (C) 21 mm, (D) 24 mm, (E) 27 mm e (F) 30 mm.	135
Figura 116 - Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante pulsado convencional.	136
Figura 117 – Pulsado convencional na DBCP de 12 mm.	137
Figura 118 - Comparação de parâmetros em diferentes variantes MIG/MAG variando a DBCP (10 a 30 mm).	138
Figura 119 - Distância média e extremos por variante e faixa de DBCP.	140
Figura 120 – Macrografias das seções transversais das variantes apresentadas para três níveis de DBCP.	141
Figura 121 – Gráficos comparativos das características geométricas das seções transversais das variantes em função da DBCP.....	142
Figura 122 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante LSC, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	156
Figura 123 - Ciclograma de corrente (A) e tensão (V) nos eixos horizontal e vertical respectivamente, na variante LSC com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min com duração total de 1 s.	157

Figura 124 – Histogramas referentes à variante LSC, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	158
Figura 125 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante LSC, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.	159
Figura 126 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante LSC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.	160
Figura 127 - Histogramas referentes à variante LSC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	161
Figura 128 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante Standard, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	162
Figura 129 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante Standard, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 1 s.	163
Figura 130 - Histogramas referentes à variante Standard, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	164
Figura 131 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante Standard, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.	165
Figura 132 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante Standard, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.	166
Figura 133 - Histogramas referentes à variante Standard, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	167
Figura 134 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	168
Figura 135 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 1 s.	169

Figura 136 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	170
Figura 137 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.	171
Figura 138 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.	172
Figura 139 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	173
Figura 140 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.	174
Figura 141 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 1 s.	175
Figura 142 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	176
Figura 143 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.	177
Figura 144 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 1 s.	178
Figura 145 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	179
Figura 146 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 11 m/min e VS de 80 cm/min.	180
Figura 147 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 11 m/min, VS de 80 cm/min e duração total de 1 s.	181

Figura 148 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 11 m/min, VS de 80 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	182
Figura 149 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.	183
Figura 150 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 1 s.	184
Figura 151 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	185
Figura 152 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.	186
Figura 153 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.	187
Figura 154 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	188
Figura 155 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.	189
Figura 156 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 1 s.	190
Figura 157 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	191
Figura 158 - – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.	192
Figura 159 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 1 s.	193

Figura 160 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	194
Figura 161 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 12,5 m/min e VS de 90 cm/min.	195
Figura 162 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 12,5 m/min, VS de 90 cm/min e duração total de 1 s.	196
Figura 163 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 12,5 m/min, VS de 90 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	197
Figura 164 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 14,5 m/min e VS de 105 cm/min.	198
Figura 165 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 14,5 m/min, VS de 105 cm/min e duração total de 1 s.	199
Figura 166 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 14,5 m/min, VS de 105 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.	200
Figura 167 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Convencional e DBCP de 12 mm.	206
Figura 168 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 12 mm.	207
Figura 169 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 12 mm.	208
Figura 170 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Convencional e DBCP de 21 mm.	209
Figura 171 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 21 mm.	210
Figura 172 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 21 mm.	211

Figura 173 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Convencional e DBCP de 30 mm.....	212
Figura 174 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 30 mm.	213
Figura 175 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 30 mm.	214
Figura 176 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Standard e DBCP de 12 mm.....	215
Figura 177 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 12 mm.	216
Figura 178 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 12 mm.	217
Figura 179 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Standard e DBCP de 21 mm.....	218
Figura 180 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 21 mm.	219
Figura 181 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 21 mm.	220
Figura 182 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Standard e DBCP de 30 mm.....	221
Figura 183 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 30 mm.	222
Figura 184 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 30 mm.	223
Figura 185 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC e DBCP de 12 mm.	224
Figura 186 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 12 mm.	225
Figura 187 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 12 mm.	226
Figura 188 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC e DBCP de 21 mm.	227

Figura 189 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 21 mm.	228
Figura 190 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 21 mm.	229
Figura 191 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC e DBCP de 30 mm.	230
Figura 192 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 30 mm.	231
Figura 193 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 30 mm.	232
Figura 194 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC CP e DBCP de 12 mm.	233
Figura 195 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 12 mm.....	234
Figura 196 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 12 mm.	235
Figura 197 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC CP e DBCP de 21 mm.	236
Figura 198 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 21 mm.....	237
Figura 199 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 21 mm.	238
Figura 200 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC CP e DBCP de 30 mm.	239
Figura 201 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 30 mm.....	239
Figura 202 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 30 mm.	241
Figura 203 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante CMT e DBCP de 12 mm.....	242
Figura 204 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 12 mm.....	243
Figura 205 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 12 mm.	244

Figura 206 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante CMT e DBCP de 21 mm.....	245
Figura 207 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 21 mm.....	246
Figura 208 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 21 mm.	247
Figura 209 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante CMT e DBCP de 30 mm.....	248
Figura 210 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 30 mm.....	249
Figura 211 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 30 mm.	250
Figura 212 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC e DBCP de 12 mm.....	251
Figura 213 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s (4,75 a 5,75 s), na variante PMC e DBCP de 12 mm.	252
Figura 214 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 12 mm.	253
Figura 215 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC e DBCP de 21 mm.....	254
Figura 216 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 21 mm.	255
Figura 217 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 21 mm.	256
Figura 218 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC e DBCP de 30 mm.....	257
Figura 219 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 30 mm.	258
Figura 220 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 30 mm.	259
Figura 221 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC CP e DBCP de 12 mm.....	260

Figura 222 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 12 mm.	261
Figura 223 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 12 mm.	262
Figura 224 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC CP e DBCP de 21 mm.....	263
Figura 225 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 21 mm.	264
Figura 226 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 21 mm.	265
Figura 227 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC CP e DBCP de 30 mm.....	266
Figura 228 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 30 mm.	267
Figura 229 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 30 mm.	268
Figura 230 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Pulsado convencional e DBCP de 15 mm.....	269
Figura 231 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante Pulsado convencional e DBCP de 15 mm.	270
Figura 232 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Pulsado convencional e DBCP de 21 mm.....	271
Figura 233 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante Pulsado convencional e DBCP de 21 mm.	272
Figura 234 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Pulsado convencional e DBCP de 30 mm.....	273
Figura 235 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante Pulsado convencional e DBCP de 30 mm.	274

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Programas sinérgicos de variantes avançadas.	48
Tabela 2 – Relações de VA e VS para diferentes variantes.	55
Tabela 3 – Intervalo de confiança do índice de acertos na variante LSC.	65
Tabela 4 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante LSC, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.....	70
Tabela 5 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante Standard, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.....	75
Tabela 6 – Dados no período de curto e de arco no CMT.....	79
Tabela 7 – Intervalo de confiança do índice de acertos na variante CMT. ...	81
Tabela 8 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante CMT, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.....	85
Tabela 9 – Tabela comparativa do consumo de arame.....	88
Tabela 10 – Intervalo de confiança do índice de acertos no PMC.....	91
Tabela 11 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante PMC, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.....	96
Tabela 12 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante Convencional, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).	110
Tabela 13 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante Standard, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).	112
Tabela 14 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante LSC, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).	115

Tabela 15 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante LSC CP, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).	117
Tabela 16 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante CMT, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).	120
Tabela 17 – Intervalo de confiança do índice de acertos no PMC variando DBCP.	125
Tabela 18 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante PMC, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).	126
Tabela 19 – Intervalo de confiança do índice de acertos no PMC CP variando DBCP.	131
Tabela 20 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante PMC, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).	132
Tabela 21 - Parâmetros em função da DBCP na variante Pulsado Convencional.....	135
Tabela 22 - Dados relacionados às diferentes variantes de soldagem e às diversas combinações de VA e VS.	154
Tabela 23 - Dados processados e obtidos por meio do SAP das variantes avançadas em diferentes DBCP.	202

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials
CCC – Curto-Circuito Controlado
CE – Calor Efetivo
CI – Calor Imposto
CMT – Cold Metal Transfer
CP – Controle de Penetração
DBCP – Distância do Bico de Contato Peça
ES – Energia de Soldagem
FEM – Força eletromagnética
GMAW – Gas Metal Arc Welding
GMAW-P – Gas Metal Arc Welding Pulsado
I – Corrente
IB – Corrente de base
IP – Corrente de pulso
IE – Corrente Eficaz
IM – Corrente Média
LSC – Low Spatter Control
MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas
PMC – Pulse Multi Control
SAP – Sistema de Aquisição Portátil
TIG – Tungsten Inert Gas
U – Tensão
UGPP – Uma Gota Por Pulso
VA- Velocidade de alimentação de arame
VS – Velocidade de soldagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	FÍSICA DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG	19
2.2	JATO PLASMA	22
2.3	CONSUMO DO ARAME-ELETRODO	22
2.4	FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA	24
2.5	AUTORREGULAGEM DO COMPRIMENTO DO ARCO	27
2.6	ESTABILIDADE DO PROCESSO	29
2.7	REGULAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	30
2.8	VARIANTE MIG/MAG CONVENCIONAL.....	32
2.8.1	Curto-circuito convencional (Convencional).....	33
2.9	VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS.....	35
2.9.1	Curto-circuito controlado (CCC).....	36
2.9.2	Curto-circuito com controle eletromecânico.....	38
2.9.3	MIG/MAG Pulsado (GMAW-P)	40
3	METODOLOGIA	44
3.1	INTRODUÇÃO	44
3.2	APARATO EXPERIMENTAL	46
3.3	VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS.....	48
3.4	AQUISIÇÕES E ANÁLISE DE DADOS.....	49
3.4.1	Limiar de Tensão.....	50
3.4.2	Limiar de corrente.....	51
3.4.3	Adaptação para Transferência Metálica Goticular com Corrente Pulsada	51
3.5	AUMENTO DE ESPESSURA	53
3.6	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO.....	55
3.7	VARIAÇÃO DE DBCP.....	56
3.7.1	Cordão sobre chapa	56
3.7.2	Aumento de espessura por cordões sobrepostos lado a lado	58
3.8	FILMAGENS EM ALTA FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO	58
3.8.1	Variação da velocidade de deslocamento	59

3.8.2	Variação de DBCP.....	59
3.9	ÍNDICE DE ACERTOS.....	60
3.10	ANÁLISE DA GEOMETRIA DA SUPERFÍCIE	62
3.10.1	Aquisição dos dados	62
3.10.2	Análise de uniformidade e espessura.....	62
3.10.3	Análise de perfis transversais de superfície	62
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	63
4.1	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO.....	63
4.1.1	LSC.....	63
4.1.2	Standard	70
4.1.3	CMT	76
4.1.4	PMC	86
4.1.5	Comparação entre as variantes	98
4.2	VARIAÇÃO DE DBCP.....	106
4.2.1	Curto-circuito convencional.....	106
4.2.2	Standard	110
4.2.3	LSC.....	112
4.2.4	LSC CP	115
4.2.5	CMT	117
4.2.6	PMC	121
4.2.7	PMC CP	126
4.2.8	Pulsado com imposição de forma de onda de corrente.....	133
4.2.9	Resumo comparativo.....	137
4.2.10	Macrografias.....	140
5	OBSERVAÇÕES GERAIS	145
6	CONCLUSÕES.....	148
7	SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS	150
	REFERÊNCIAS	151
	APÊNDICE A – DADOS VARIANDO VA	153
	APÊNDICE B – DADOS VARIANDO DBCP.....	201

1 INTRODUÇÃO

A demanda por novas espessuras de chapas de aço em navios e submarinos surge de diversas exigências, como o reparo (*build-up*) para compensar perdas de espessura devidas à corrosão (Figura 1), ou o aumento de espessura (*thickening*) de chapas devido à exigência de chapas mais espessas por mudanças na carga de projeto, como a substituição ou adição de equipamentos no convés, ou outras novas exigências de projeto. Tradicionalmente, a solução é a substituição completa da chapa por outra de maior espessura. No entanto, essa abordagem se mostra desafiadora quando o acesso à chapa é limitado.

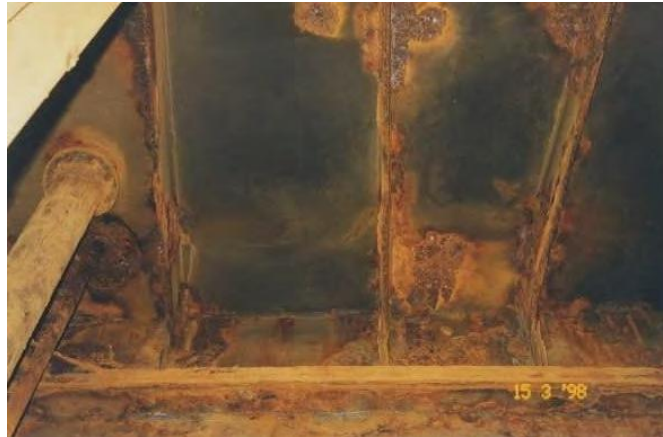
Uma alternativa é o aumento da espessura das chapas por intermédio de processos de soldagem a arco voltaico, com sobreposição de cordões paralelos e metal de adição com propriedades similares às do metal de base. Essa abordagem pode oferecer uma solução prática para o aumento da espessura desejado.

O processo de soldagem MIG/MAG, conhecido também como *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, apresenta-se como opção de boa produtividade e maior facilidade de mecanização e automação do processo. Devido ao seu alto fator operacional e taxa de deposição, a soldagem MIG/MAG tem o potencial de melhorar a produtividade em relação aos processos GTAW e SMAW.

Os avanços tecnológicos no processo MIG/MAG, conhecidos como variantes MIG/MAG avançadas com monitoramento de tensão (U), modulação da corrente (I) e controle da velocidade de alimentação de arame (VA), permitem maior controle da transferência metálica, viabilizando cobrir uma maior faixa de requisitos de soldagem comparados ao MIG/MAG convencional. Essas variantes avançadas do processo MIG/MAG, viabilizadas pelos recentes desenvolvimentos nas tecnologias de fontes de soldagem que permitem o monitoramento e controle em alta velocidade de resposta por meio de software, oferecem benefícios significativos - dependendo da aplicação - em comparação com métodos tradicionais, como o MIG/MAG convencional, *Tungsten Inert Gas (TIG)* e eletrodo revestido. Entretanto, para obter os resultados desejados ao empregar essas variantes avançadas, é imprescindível que o profissional possua um conhecimento mais aprofundado e maior familiaridade com o ajuste das variáveis da fonte, bem como com suas influências no controle, suas vantagens e limitações. Visando facilitar a adoção dessas tecnologias, o conceito de controle sinérgico, por exemplo no processo MIG/MAG Pulsado (GMAW-P), permite que, a partir de poucos parâmetros, como tipo de eletrodo, VA e gás de proteção, a fonte configure outros

parâmetros, como forma de onda de corrente, necessários para a realização do processo com características adequadas à soldagem.

Figura 1 - Exemplo de perda de espessura por corrosão em chapa de convés de navio.



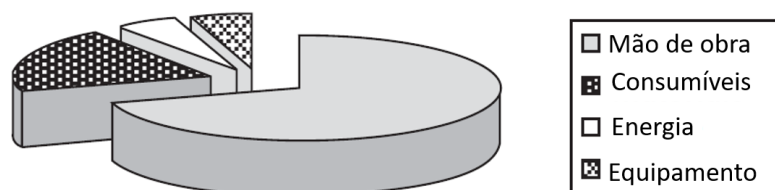
Fonte: (IACS, 2015).

O desenvolvimento de variantes MIG/MAG modernas são impulsionadas pela busca de maior produtividade e redução de custos de fabricação. Além disso, a segurança no ambiente de soldagem e a escassez de soldadores qualificados são fatores adicionais que motivam a pesquisa em processos de soldagem.

O custo de produção de peças soldadas é influenciado por diversos fatores, incluindo mão de obra, materiais, energia e depreciação do capital. Em indústrias que utilizam soldagem pouco automatizada, o custo da mão de obra é o principal componente (Figura 2). Além disso, uma maior taxa de deposição de material de adição pode reduzir o tempo de soldagem e, conseqüentemente, a proporção do custo da mão de obra no custo total.

Desenvolver técnicas que permitam um controle mais eficaz do processo de soldagem tem um impacto significativo nos custos. O uso de equipamentos, automação, monitoramento e controle em tempo real, aumentam o custo inicial, porém contribuem para uma maior produtividade e diminuição de custos totais durante todo o ciclo de vida em indústrias com alta produção.

Figura 2 - Custos de soldagem.



Fonte: adaptado de (Norrish, 2006).

A mecanização de baixo custo, como o uso de “tartarugas de soldagem”, é amplamente reconhecida como uma estratégia econômica para reduzir a demanda de mão de obra, principalmente em processos MIG/MAG. Entretanto, esse recurso não compensa variações na distância entre a tocha e a peça, geradas por irregularidades na planicidade da peça, causando variações na Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP), parâmetro que afeta diretamente as características do cordão. Algumas variantes MIG/MAG avançadas foram desenvolvidas com o intuito de minimizar os efeitos dessas variações na DBCP.

Muitas soluções comerciais chegam ao mercado apresentadas de forma bastante superficial, sem detalhar princípios de funcionamento e, sobretudo, suas limitações. Assim, a falta de conhecimento a respeito dessas tecnologias — incluindo vantagens e desvantagens, impactos da variação da DBCP em cada processo e restrições específicas de cada variante — dificulta sua adoção.

Quando se depositam cordões paralelos para aumentar a espessura de chapas, a superfície resultante exibe irregularidades que exigem desbaste para alcançar maior planicidade. Esse procedimento implica custos adicionais de mão de obra, maior consumo de material de adição para atingir a mesma espessura desejada e menor previsibilidade da espessura final.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral investigar e explorar variantes avançadas do processo MIG/MAG (curto-circuito controlado, curto-circuito com controle eletromecânico e pulsado adaptativo) com vistas à obtenção de aumento de espessura em chapas de aço ASTM A36 por deposição de cordões paralelos, visando o desenvolvimento futuro de procedimentos de reparo na indústria naval com desempenho superior aos métodos tradicionais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

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

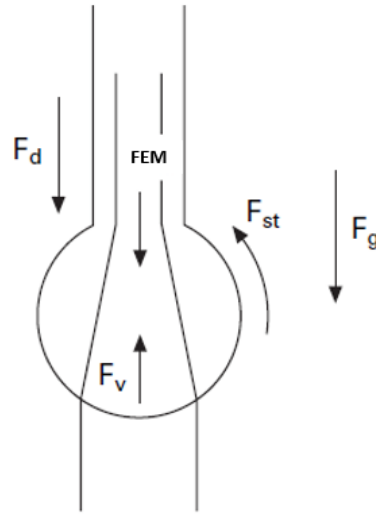
- a) Definir critérios de seleção de parâmetros de soldagem visando alcançar aumentos de espessura pré-determinados;
- b) Analisar a superfície resultante quanto a homogeneidade superficial e aumento de espessura final das deposições resultantes de cada variante;
- c) Investigar os mecanismos de controle de transferência metálica das variantes para diferentes taxas de deposição;
- d) Explorar controles adaptativos de transferência metálica que visam manter a penetração de soldagem constante ao se variar a distância da tocha com a peça;
- e) Avaliar a estabilidade da transferência metálica das variantes modernas a serem abordadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FÍSICA DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG

O metal líquido a ser transferido da ponta do arame-eletrodo à peça está submetido a forças que têm influência no modo de transferência (curto-circuito ou voo livre), na dinâmica da transferência e nas características do cordão de solda. As principais forças envolvidas são força gravitacional (F_g), força de reação por vaporização (F_v), força resultante da tensão superficial (F_{st}), força eletromagnética (FEM), força de arraste do gás (F_d), esta última de menor importância quando comparadas as demais forças já mencionadas (Silva, 2005). A Figura 3 mostra o sentido de atuação das forças atuando na gota na maior parte das condições.

Figura 3 - Balanço de forças atuantes na transferência metálica.



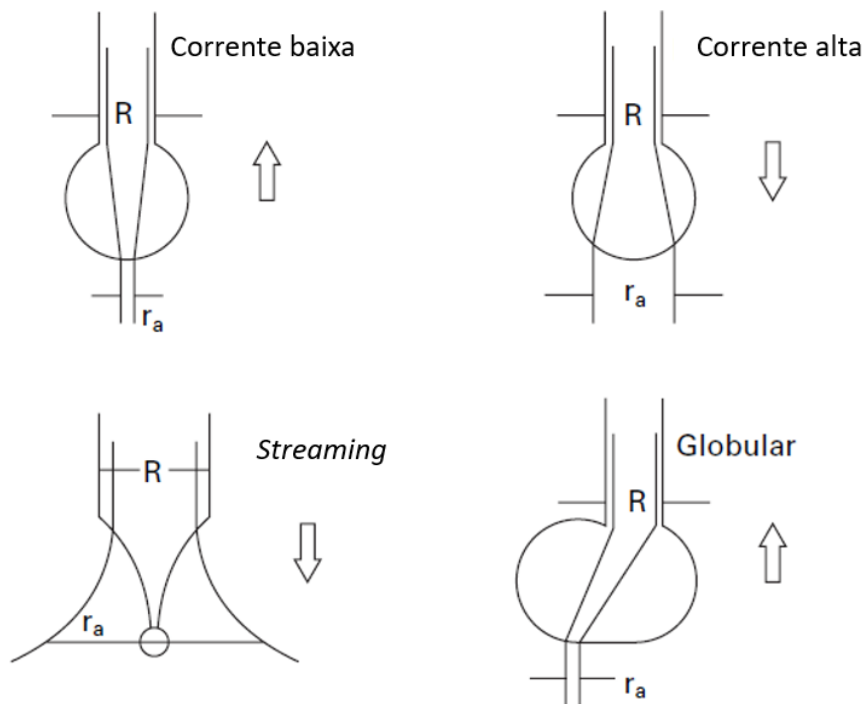
Fonte: adaptado de (Norrish, 2006).

De acordo com Norrish (2006), as FEM são geradas quando uma corrente (I) passa por um condutor, produzindo um campo magnético ao seu redor. Esse fenômeno ocorre na área ao redor da ponta do eletrodo, na gota fundida e no arco, sendo altamente dependente da geometria do fluxo de corrente (Figura 4). A magnitude dessas forças pode ser descrita pela expressão:

$$FEM = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln \left| \frac{r_a^2}{R} \right| \quad (1)$$

Nesta fórmula, μ representa a permissividade magnética do material, I a corrente aplicada, r_a o raio de saída da corrente, e R o raio de entrada. As FEM geradas são predominantes na transferência metálica do tipo *spray* e dependem fortemente do valor da corrente utilizada.

Figura 4 - Geometria das linhas de corrente em diferentes situações.



Fonte: (Norrish, 2006).

Quando a corrente é alta, há mais concentração de fluxo de corrente na parte de cima da gota ($r_a > R$), fazendo com que a maior pressão se dê nesta região, impulsionando o volume de crescimento da gota no sentido de destacamento. No caso de baixa I, a maior concentração se dá na parte de baixo da gota ($r_a < R$), o que faz com que o efeito da FEM seja o de empurrar o volume da gota contra o arame. À medida que a corrente é regulada para valores cada vez mais altos, o raio do acoplamento do arco com a gota cresce até superar, em um determinado ponto, o valor do raio do arame-eletrodo. Neste momento, a força FEM que atuava contrariamente à transferência metálica muda de direção e passa a favorecer o destacamento da gota. (Scotti; Ponomarev, 2014)

A força resultante da tensão superficial da gota exerce influência considerável. Na transferência por voo livre, é a principal força que impede o desprendimento da gota e, na transferência por curto-circuito, após o contato da gota na peça, ajuda a transferência para a poça.

A força gravitacional é de menor influência que a FEM e a devida à tensão superficial, se considerarmos gotas de pequeno tamanho, sua magnitude é o produto da massa da gota pela aceleração da gravidade.

De acordo com Norrish (2006) e Scotti e Ponomarev (2014), a força de reação por vaporização surge sob condições de correntes elevadas, quando ocorre uma vaporização significativa na superfície da gota fundida, especialmente na região do ancoramento do arco. A aceleração das partículas de vapor dentro do plasma gera uma força que se opõe à transferência da gota. Essa força tem relevância apenas em correntes elevadas.

2.2 JATO PLASMA

Quanto maior a corrente ou quanto menor o diâmetro da seção da coluna do arco para uma mesma intensidade de corrente, maior é a pressão. Como as colunas típicas de arcos de soldagem tomam a forma tronco-cônica, surge uma maior pressão eletromagnética na região restrita e menor na região mais larga da coluna de plasma. Esta diferença na pressão eletromagnética provoca o deslocamento do gás ionizado na direção da menor pressão. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Scotti e Ponomarev (2014) destacam a importância de entender este fenômeno, pois o jato de plasma age tanto no sentido de arrastar as gotas durante a transferência metálica, após o destacamento da gota, quanto empurrando o metal líquido para os lados na poça fundida. Esse empurrão facilita a ação térmica da região catódica (ou anódica) no metal de base, o que influencia diretamente a distribuição da transferência de calor, a profundidade de penetração e a largura do cordão de solda.

2.3 CONSUMO DO ARAME-ELETRODO

O consumo (C) do arame-eletrodo no processo de soldagem MIG/MAG é determinado sobretudo pela corrente (I), mas também sofre influência de diversos fatores, incluindo a resistividade elétrica do arame, a composição do gás de proteção e a polaridade da conexão. A equação utilizada para descrever o consumo de arame, equação (2), é apresentada como:

$$C = \alpha I + \beta L I^2 \quad (2)$$

Onde alfa e beta são constantes que, de acordo com Cuiuri (2000) e Norrish (2006), não explicitam uma dependência com o gás de proteção, mas apenas do tipo de arame-eletrodo (diâmetro e material). Além disso, uma das conclusões de Lesnewich (1958a) é que "As taxas de fusão do eletrodo são geralmente

independentes do gás de proteção, embora a adição de pequenas quantidades de gases oxidantes a gases inertes cause uma diminuição geral na taxa com polaridade direta.", ou seja, as constantes alfa e beta não dependeriam dos gases de proteção. O tipo de transferência obtido é determinado pela magnitude da corrente de soldagem e polaridade, pela composição do arame. Também é afetado pelo diâmetro e extensão do arame. Conforme Lesnewich (1958b), a extensão do arame desde o limite do bico de contato até a ponta em contato com o arco, comumente chamado de comprimento do eletrodo (L) ou stick out, influencia diretamente o comportamento da transferência de metal e a estabilidade do processo. Segundo Norrish (2006), valores de alfa e beta para arame de aço carbono de 1,2mm de diâmetro são $0,3 \text{ mm A}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $5 \times 10^{-5} \text{ A}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

O consumo do arame-eletrodo é determinado por duas parcelas distintas na Equação (2). O primeiro termo (αI) está relacionado ao calor gerado no ponto de contato entre o arco e a ponta do eletrodo, denominado calor de conexão anódica ou catódica, a qual se manifesta na fase em que o arco se encontra aberto. Esse calor depende diretamente da corrente de soldagem, sendo responsável pela fusão inicial do arame. (Scotti; Ponomarev, 2014)

O segundo termo ($\beta L I^2$) refere-se ao efeito Joule ao longo do arame-eletrodo, que ocorre tanto em condições de arco aberto quanto em curtos-circuitos. Esse efeito considera a resistividade elétrica do arame, a corrente de soldagem ao quadrado (I^2), bem como o comprimento do arame (L). Tanto Cuiuri (2000) quanto Scotti e Ponomarev (2014) demonstram que a corrente no primeiro termo da equação equivale à corrente média de soldagem (IM), enquanto o segundo termo da corrente equivale à corrente eficaz (IE) ou valor RMS da corrente de soldagem. Esses valores são de fácil aquisição e ajudam a entender a dinâmica do consumo de arame no processo de soldagem, facilitando a aplicação prática da equação (3) e a otimização do processo. Em soldagens que utilizam arames de grande diâmetro ou em processos com baixa resistividade elétrica, como arames de alumínio, a contribuição do efeito Joule pode ser relativamente pequena, resultando em uma menor parcela do calor total sendo gerado por esse mecanismo. (Scotti; Ponomarev, 2014)

$$C = \alpha IM + \beta L (IE)^2 \quad (3)$$

Durante o período em que o eletrodo está em curto-circuito, o consumo de arame é governado predominantemente pelo efeito Joule, pois o arco está extinto e a

conexão anódica ou catódica não existe mais. Nesse cenário, o calor gerado é resultado da passagem da corrente pelo arame, o que gera aquecimento devido à resistência elétrica do material. Cuiuri (2000), em seu trabalho, também não considera a influência da primeira parcela da equação durante o período de curto-circuito justamente por não existir a região anódica neste instante. Por outro lado, quando o arco está aberto, ambas as parcelas contribuem para o consumo do arame, sendo o calor da conexão anódica/catódica responsável por uma fusão mais localizada e concentrada, enquanto o efeito Joule se distribui ao longo do comprimento do arame. (Scotti; Ponomarev, 2014)

De acordo com Scotti e Ponomarev (2014), a determinação precisa das constantes alfa e beta é desafiadora devido às variações na resistividade elétrica e no comprimento do arame, além de depender de medições experimentais precisas.

2.4 FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Nesta seção serão discutidos os processos envolvidos na formação do cordão de solda, especificamente em relação ao aporte de calor ao metal de base. De maneira geral, a formação do cordão está associada a dois principais efeitos: o efeito térmico e o efeito mecânico. O efeito térmico se deve ao acoplamento do arco elétrico com o material da peça a ser soldada, ocorrendo por intermédio das manchas catódicas ou anódicas, dependendo da polaridade da peça. Nessas manchas, devido à alta concentração de corrente, há uma queda significativa de tensão (U), gerando calor que é transferido para o metal de base por condução. Parte deste calor é utilizado na fusão do metal, enquanto o restante se difunde para a região ao redor da zona fundida, sem, no entanto, ser suficiente para fundi-la. (Scotti; Ponomarev, 2014)

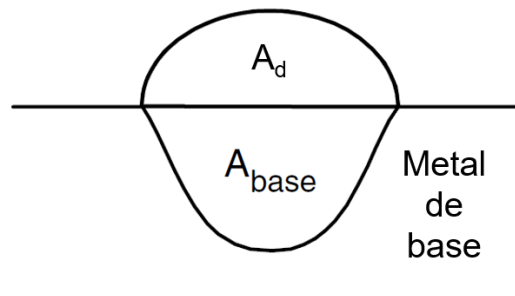
Além disso, outra importante fonte de calor que contribui para o efeito térmico é a entalpia dos gases de proteção. Esses gases transferem calor à peça por meio de convecção forçada e radiação, sendo este um processo que ocorre quando o gás passa do estado gasoso para o estado plasmático – um processo endotérmico que absorve energia. Ao retornar ao estado gasoso, o gás transfere essa energia acumulada para a peça, de maneira exotérmica. No entanto, é relevante ressaltar que a distribuição de temperatura e corrente durante o acoplamento do arco com o metal de base não é uniforme, resultando em maior aquecimento na região central do arco. (Scotti; Ponomarev, 2014)

A área transversal do reforço do cordão de solda (A_d), ver Figura 5, está intimamente relacionada à quantidade de material de adição fornecido ao cordão por unidade de comprimento da solda, e é expressa matematicamente pela equação (4):

$$A_d = \phi \cdot \frac{A_w \cdot VA}{VS} \quad (4)$$

Na equação, ϕ representa a eficiência do eletrodo, definida como a razão entre a massa do metal de adição efetivamente depositada na peça (excluindo perdas por respingos ou vaporização) e a massa total consumida do eletrodo. A_w é a área da seção transversal do arame eletrodo, VA corresponde à velocidade da alimentação de arame, e VS refere-se à velocidade de soldagem. Esses parâmetros são fundamentais no controle do processo de deposição, uma vez que o reforço do cordão de solda é diretamente afetado pela VA e pela VS.

Figura 5 – Seção transversal de um cordão depositado, evidenciando as áreas do reforço e do metal de base fundido.



Fonte: Próprio autor.

O emprego da equação (4), possibilita uma boa estimativa do reforço. A eficiência do eletrodo é a porcentagem de massa do metal de adição consumido (arame) que efetivamente se converte em metal depositado no cordão de solda. Ou seja, da massa de arame alimentada, parte é depositada na peça e parte se perde em respingos ou vaporização.

É importante compreender o conceito de aporte de calor. A energia de soldagem (ES) é definida pela relação entre a potência elétrica do arco e a VS, conforme a Equação (5). O calor imposto (CI) é a parcela do calor que efetivamente se transfere para o metal de base, desconsiderando as perdas para o ambiente, como descrito pela Equação (6). Por fim, o calor efetivo de fusão (CF) é a parcela do calor que realmente contribui para a fusão do material, descontando o calor que se difunde

para o metal não fundido, como mostrado na Equação (7). Dessa forma, o rendimento de fusão é essencial para otimizar a formação do cordão, enquanto o rendimento térmico está mais associado às propriedades metalúrgicas e suscetibilidades a defeitos da solda. (Scotti; Ponomarev, 2014)

$$ES = \frac{\sum u i}{VS} \quad (\text{ENERGIA DE SOLDAGEM}) \quad (5)$$

$$CI = \left(\frac{\sum u i}{VS} \right) \eta_{\text{térmico}} \quad (\text{CALOR IMPOSTO}) \quad (6)$$

$$CF = \left(\frac{\sum u i}{VS} \right) \eta_{\text{térmico}} \eta_{\text{fusão}} \quad (\text{CALOR EFETIVO}) \quad (7)$$

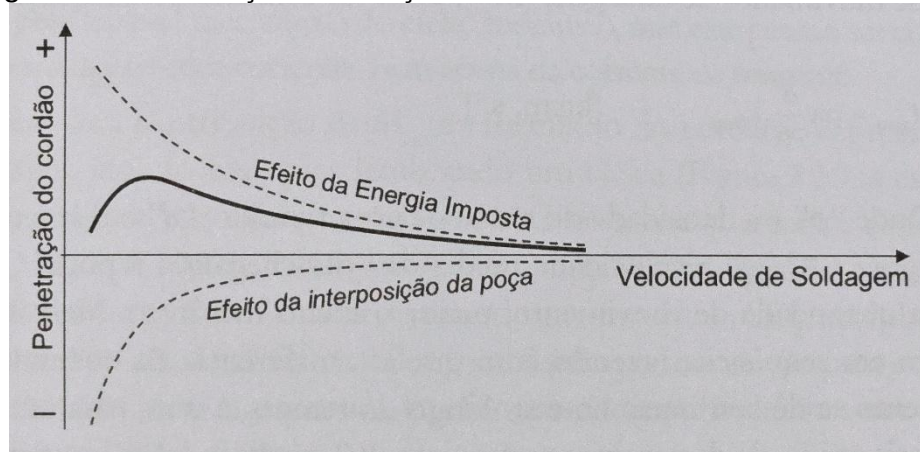
Apesar da complexidade nos fenômenos de transferência de calor do arco para o metal de base, maiores correntes e concentração do arco tendem a aumentar a penetração no metal de base. Entretanto, a complexidade cresce ao se analisar em maiores detalhes o ancoramento do arco na poça de fusão, ou peça, e a transferência de calor nesse ponto, sobretudo ao se considerar a VS. A Figura 6 ilustra a influência da velocidade de soldagem (VS) na penetração, mantendo constantes a velocidade de avanço (VA) e o comprimento do arco. O aumento da VS tende a reduzir o volume da poça de fusão acumulada entre o arco e o metal de base em estado sólido, facilitando a ação térmica da região catódica (ou anódica) sobre o metal de base, que favorece maior penetração. De forma contrária, ao se diminuir a VS, o “efeito da interposição da poça” entre o arco e a peça atua como uma barreira à transferência de calor, reduzindo a penetração. Outro efeito que afeta diretamente a penetração é o “efeito da energia imposta” em que a tendencia de aumento de penetração é inversamente proporcional à VS (conforme expresso na equação (6)). (Scotti; Ponomarev, 2014)

De forma simplificada, a penetração final é resultado desses dois efeitos, embora existam outros fatores secundários. Em geral, quanto maior a VS, menor a penetração, pois a redução na energia imposta se torna dominante. Por outro lado, em velocidades mais baixas, o efeito do aumento da energia de soldagem predomina até determinada VS, em que ao se diminuir ainda mais a VS, a sobreposição da poça predomina, e a penetração voltar a cair. Assim, a penetração em função da VS segue uma curva com ponto de máximo, o que explica frustrações frequentes entre

engenheiros de soldagem que tentam aumentar a penetração apenas reduzindo a VS. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Dutra (2023) também aborda a questão em que a relação indissociável entre a corrente necessária e a velocidade do arame resulta em uma taxa de fusão excessiva e um excesso de material adicionado ao se tentar obter maior penetração.

Figura 6 – Penetração em função da VS, considerando VA constante.



Fonte: (Scotti; Ponomarev, 2014).

2.5 AUTORREGULAGEM DO COMPRIMENTO DO ARCO

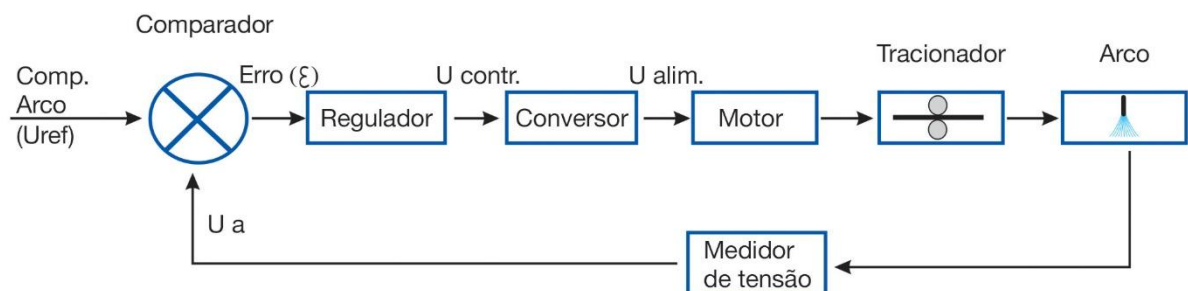
No modo de transferência por voo livre, a autorregulagem do comprimento do arco, juntamente com a intensidade de corrente de soldagem, são parâmetros cruciais no processo MIG/MAG, pois são os principais responsáveis pela concentração e intensidade da transferência de calor para a chapa. Segundo Scotti e Ponomarev (2014), o comprimento do arco está diretamente relacionado à U do arco, que, por sua vez, é um parâmetro crítico para a estabilidade da transferência metálica e para a qualidade da solda. Por exemplo, arcos mais longos tendem a reduzir a concentração de corrente na chapa, o que pode impactar a intensidade do calor transferido.

A constância do comprimento do arco é essencial para garantir a estabilidade da transferência metálica. Como a U é proporcional ao comprimento do arco para uma dada condição, e considerando que medir o comprimento do arco diretamente é desafiador, a U é frequentemente usada como um parâmetro indireto para controlar o processo. Durante a soldagem, é desejável manter estáveis tanto os valores da corrente quanto do comprimento do arco (ou, indiretamente, a U), a fim de assegurar a consistência da transferência de calor e a qualidade do cordão de solda. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Scotti e Ponomarev (2014) também destacam que, em sistemas que utilizam fontes de U constante, a autorregulagem do comprimento do arco ocorre de forma mais eficaz. Nesse tipo de fonte, qualquer variação no comprimento do arco resulta em um ajuste automático na corrente e na velocidade de fusão do arame, o que ajuda a manter o processo estável. Em contrapartida, em fontes de imposição de corrente, a manutenção do comprimento do arco requer um sistema mais complexo de controle externo, pois o aumento do comprimento do arco não afeta significativamente a corrente, e a velocidade de fusão permanece praticamente inalterada.

Buscando manter o comprimento do arco constante em fontes de corrente constante, pode-se empregar uma ação externa, como a retroalimentação do motor do sistema de alimentação do arame. Por exemplo, se a distância entre a tocha e a peça aumentar, o arco tende a se alongar, uma vez que a corrente permanece constante. Consequentemente, a U do arco aumenta devido à maior resistência elétrica. Nesse caso, um dispositivo eletrônico compara a U de soldagem com uma U de referência previamente ajustada pelo operador, correspondente ao comprimento de arco desejado. Caso a U medida seja maior que a de referência, o sistema aumenta temporariamente a VA até restabelecer o comprimento do arco, acompanhado por uma redução progressiva da VA até o valor inicial. Esse controle é necessário para ajustar a taxa de fusão à nova extensão livre do eletrodo, que resulta em maior aquecimento por efeito Joule. (Dutra, 2023)

Figura 7 – Controle externo pela VA.



Fonte: (Dutra, 2023).

De forma similar, se a distância entre a tocha e a peça for reduzida, a U medida será menor que a U de referência, fazendo com que o sistema reduza a VA para manter o comprimento do arco constante. Este método é conhecido como "controle externo" ou "controle pela VA". Fontes eletrônicas modernas de corrente

constante utilizam a U como sinal de referência e, em vez de ajustar diretamente a VA, podem agir sobre a própria forma de corrente, ajustando temporariamente a intensidade da corrente de soldagem. Esse método de controle é mais rápido, pois não depende da inércia do motor do sistema de alimentação, garantindo uma resposta mais ágil às variações durante o processo de soldagem. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Segundo Dutra (2023), o controle externo pela VA não é tão eficaz nas situações dinâmicas acentuadas, como na transferência por curto-circuito.

2.6 ESTABILIDADE DO PROCESSO

A estabilidade do processo MIG/MAG é um dos principais fatores para garantir a consistência da solda. Scotti e Ponomarev (2014) apontam que a estabilidade depende tanto da manutenção do comprimento do arco quanto da transferência metálica. A estabilidade do arco influencia diretamente a distribuição de calor e, conseqüentemente, a forma da poça e a geometria do cordão. A transferência metálica estável assegura que o material de adição seja depositado de forma contínua e uniforme, reduzindo a ocorrência de respingos e porosidade.

A estabilidade do processo é analisada por meio de oscilações da corrente e da U durante a soldagem. Durante a transferência por curto-circuito, por exemplo, há períodos em que a corrente aumenta rapidamente devido ao fechamento do circuito elétrico pelo arame, seguido por uma queda abrupta quando ocorre a fusão e abertura do arco. Esses ciclos repetitivos devem ser mantidos de forma controlada para garantir a estabilidade da solda. Uma maneira ágil de avaliar a repetibilidade de um processo é por meio do desvio padrão dos períodos de transferência nas transferências por contato. Histogramas dos períodos de arco, períodos de curto-circuito e períodos de transferência são comumente empregados para analisar a dispersão desses valores.

Mesmo ao se considerar apenas as variantes do processo MIG/MAG, não existem critérios padronizados que atendam a todas as variantes, dificultando assim a comparação de sua estabilidade. Da mesma forma, não há consenso quanto à forma de quantificá-la. Ainda assim, algumas características são geralmente reconhecidas como indicativas de uma solda estável, como a redução de respingos, a transferência metálica regular (com uma gota por ciclo de parâmetros elétricos), a minimização da repulsão da gota no início do curto-circuito (evitando o destacamento em voo livre nas

variantes com transferência por contato) e a ausência de curto-circuito em variantes com transferência por voo livre.

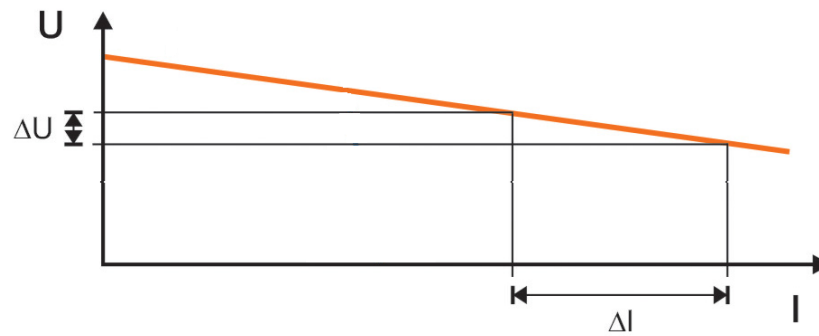
Nas variantes avançadas, as particularidades no controle da transferência metálica demandam atenção especial e um entendimento aprofundado dos princípios de cada variante para avaliar a estabilidade. Uma estratégia geral para quantificá-la envolve a adoção de um “índice de acertos”, no qual se analisa um número de ciclos de transferência e se calcula a porcentagem de transferências bem-sucedidas, conforme critérios previamente definidos pelo pesquisador. Essa foi uma das abordagens empregadas por Galeazzi (2024). É importante ressaltar que o que se define como “acerto” pode variar, o que reforça a importância de compreender a física dos controles de transferência em cada variante.

2.7 REGULAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Fixando-se na variante conhecida como MIG/MAG convencional, existem basicamente duas variáveis principais que são reguladas, a regulação da U e a regulação da VA. Além disso, existe algumas vezes outros tipos de regulação que estão ligadas à dinâmica de variação da corrente. Essas regulações, mantidas outras variáveis constantes, determinam o comportamento do processo de soldagem, incluindo o tipo de transferência metálica, a produtividade e o acabamento do cordão.

A “característica estática” de uma fonte de soldagem descreve como a tensão (U) e a corrente (I) da fonte se comportam quando submetidas a diferentes níveis de carga. No caso de uma fonte com comando de tensão (Figura 8), a fonte tende a manter a tensão quase constante enquanto a corrente varia. Além disso, a indutância presente no circuito tem o papel de controlar a taxa de variação da I, ou seja, determina a rapidez com que a corrente sobe ou desce durante as mudanças no processo, influenciando diretamente na estabilidade do arco e na qualidade da solda.

Figura 8 - Característica da fonte de comando de tensão.



Fonte: adaptado de Dutra (2023).

Ao ajustar a U e a VA, determina-se um ponto na característica estática da fonte que irá definir o comportamento do arco. No modo voo livre, o ponto de trabalho é estabelecido no encontro da característica estática do arco (CEA) com a característica estática da fonte (CEF), resultando nos valores médios de corrente e U de soldagem. (Dutra, 2023)

A VA é a segunda regulagem fundamental. Em condições de regime, a VA deve ser igual ao consumo do arame-eletrodo. Caso contrário, se a VA for maior que o consumo, o arame pode se embolar na peça, enquanto se for menor, o arco pode se apagar ou atingir o bico de contato. Dessa forma, a VA é expressa pela equação geral de consumo (Equação (3)), que pode ser reescrita no formato da Equação (8): (Scotti; Ponomarev, 2014)

$$VA = C = \alpha IM + \beta L (IE)^2 \quad (8)$$

Para uma dada VA, existe um valor específico de IM e IE e comprimento da extensão do arame eletrodo (L) que satisfaça a equação (8), garantindo a estabilidade do processo de soldagem.

No modo de transferência por voo livre, quando se utiliza uma fonte em comando de U e a VA é aumentada, o consumo de arame também aumenta para manter o equilíbrio, resultando no aumento tanto da corrente quanto do comprimento do eletrodo (L), e conseqüentemente na diminuição do comprimento do arco. Se o aumento na VA continuar, o processo pode entrar em uma faixa de instabilidade devido ao arco muito curto. Nessa situação, a U regulada deve ser aumentada para restabelecer a estabilidade do processo, resultando em um aumento da corrente e uma redução no L. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Em uma fonte em comando de corrente, os mesmos princípios se aplicam, mas de forma diferente. Um aumento na VA sem alterar a corrente regulada resulta em um arco mais curto e menor U. Por outro lado, um aumento na corrente regulada sem alterar a VA provoca um arco mais longo e maior U. O aumento da Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP), mantendo as outras variáveis constantes, resulta em arcos mais longos. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Além disso, Norrish (2006) explica que, em fontes de energia com imposição de corrente, existe um mecanismo inerente de autoajuste que opera com arames resistivos. Nesse contexto, se a corrente e a VA forem mantidas fixas, um valor único de L é definido pela equação de consumo de arame. Se L diminuir momentaneamente devido a alguma perturbação do processo, o segundo termo na equação diminui e a taxa de fusão também diminui. Como a VA se mantém constante, o comprimento inicial de L se restaura ao valor inicial. Assim, em fontes de imposição de corrente e utilizando VA constante, o L tende a se manter constante, mesmo com variações da DBCP, enquanto a altura do arco e a U variam livremente. (Norrish, 2006)

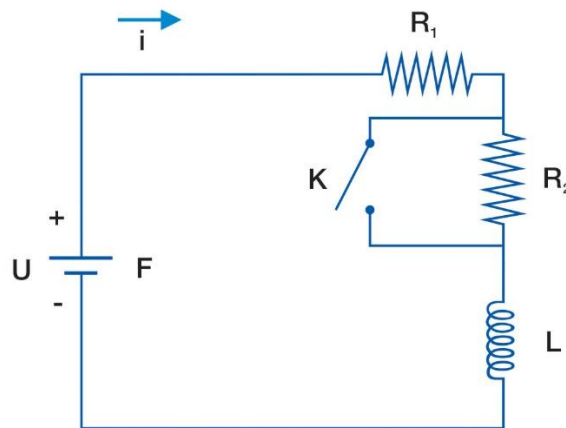
Entretanto, essa autorregulação do comprimento de L não ocorre em materiais de alta condutividade, como o alumínio, devido aos baixos valores de beta. Para esses materiais, é necessário utilizar fontes de corrente constante juntamente com uma unidade de alimentação de arame de velocidade variável que responda às mudanças no comprimento do arco (identificado pela medição da U), ajustando a VA. Sistemas eletrônicos de controle de U do arco, costumam estar presente em fontes de energia mais modernas para lidar com essas situações, garantindo maior estabilidade e qualidade no processo de soldagem. (Norrish, 2006)

2.8 VARIANTE MIG/MAG CONVENCIONAL

O termo "MIG/MAG convencional" se refere aos processos MIG/MAG que utilizam fontes de soldagem eletromagnéticas com comando de tensão elétrica. Esse processo também pode ser realizado em fontes eletrônicas modernas, desde que estas consigam emular o comportamento característico das fontes eletromagnéticas, replicando as mesmas características de imposição de tensão. O MIG/MAG convencional é robusto, pois possui um autocontrole inerente, fazendo com que o processo tenda a se estabilizar dentro de uma faixa ampla de parâmetros de U e VA selecionados. (Dutra, 2023)

Simplificando, o processo de soldagem MIG/MAG convencional pode ser descrito como um circuito elétrico em série (Figura 9), composto por uma fonte de soldagem (F) com comando de tensão elétrica (U), uma resistência (R_1), um indutor (L) e a conexão entre a tocha de soldagem e a peça de trabalho. Em arco aberto, o arco cria uma resistência (R_2); já em curto-circuito, o circuito se fecha, como se a chave K fosse acionada. O autocontrole inerente do convencional permite que o sistema se adapte a diferentes condições de operação, proporcionando uma estabilidade natural do arco (Dutra, 2023).

Figura 9 - Circuito elétrico representando didaticamente o processo MIG/MAG convencional.

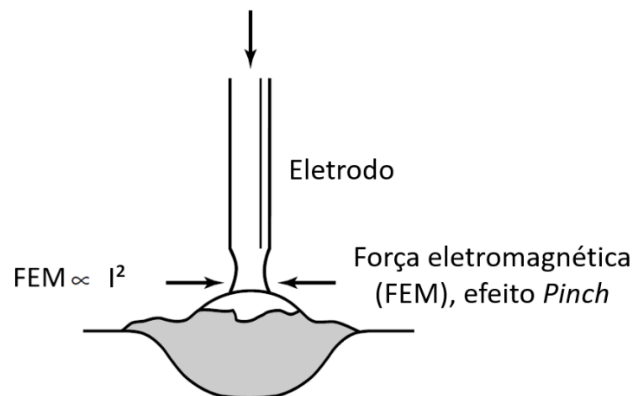


Fonte: (Dutra, 2023).

2.8.1 Curto-circuito convencional (Convencional)

A transferência de metal por curto-circuito é um modo de transferência de baixa potência onde o metal é depositado durante repetidos curtos-circuitos. A transferência de metal ocorre pela ação das forças eletromagnéticas (FEM) e tensão superficial quando o eletrodo está em contato físico com o metal de base ou com a poça de fusão, conforme Figura 10.

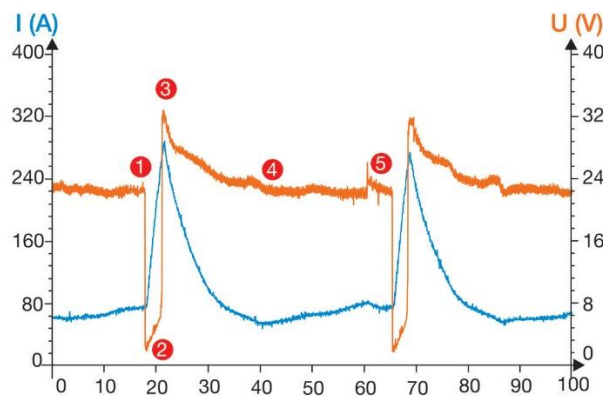
Figura 10 - Efeito Pinch Durante a Transferência por Curto-Circuito.



Fonte: adaptado de (LINCOLN ELECTRIC COMPANY, 2014).

No curto-circuito a corrente fornecida pela fonte de soldagem aumenta. O aumento da corrente resulta em um aumento na força eletromagnética, também conhecida como força de Lorentz, aplicada na ponte metálica (região de acoplamento arame e poça de fusão), em direção ortogonal às linhas de corrente e proporcional ao quadrado da corrente. Essa força estricciona a ponte metálica e junto com a tensão superficial, são responsáveis pelo destacamento da gota para a peça. Os principais instantes de um ciclo de destacamento estão apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Transferência por Curto-Circuito.



Fonte: (Dutra, 2023).

As etapas da transferência metálica são:

- a) O arame eletrodo faz contato físico com a poça de fusão. A tensão tende a zero, e o nível de corrente aumenta. A taxa de aumento para a corrente é inversamente proporcional à indutância secundária da fonte;
- b) As forças eletromagnéticas atuam ortogonalmente às linhas de corrente ao redor do eletrodo e estreitam a ponte metálica que une a gota ao eletrodo. A tensão sobe lentamente devido ao estreitamento da ponte metálica durante o período de curto-circuito, e a corrente aumenta até um valor de pico;
- c) A gota fundida é destacada do eletrodo. A corrente atinge seu valor máximo neste ponto;
- d) Este é o período de arco, e é durante essa descida da corrente que a nova gota fundida se forma;
- e) O eletrodo neste ponto está, mais uma vez, fazendo contato com a poça de fusão, preparando-se para a transferência de outra gota.

O autocontrole no modo voo livre foi detalhado no item 2.5. Já para as transferências no modo curto-circuito, o “controle interno” do processo ocorre da seguinte forma: ao aumentar a velocidade do arame, elevam-se a frequência das transferências e de picos de corrente, o que, por consequência, incrementa a IM e a IE, equilibrando o consumo de arame com a VA.

2.9 VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS

Os objetivos dos desenvolvimentos do processo MIG/MAG têm sido controlar a transferência metálica, melhorar a estabilidade do processo e ampliar o campo de aplicações. A introdução de fontes eletrônicas permitiu que sistemas de controle aprimorados fossem desenvolvidos. As faixas operacionais do processo também foram ampliadas e técnicas de alta taxa de deposição foram introduzidas para proporcionar uma maior produtividade. (Norrish, 2006)

Os avanços no controle da transferência metálica resultaram inicialmente no desenvolvimento do MIG/MAG pulsado (GMAW-P) e posteriormente no curto-circuito controlado (CCC). Em seguida, surgiram variantes como o curto-circuito com controle eletromecânico, entre outras menos difundidas. Vale ressaltar que cada fabricante costuma atribuir nomes comerciais próprios a essas tecnologias, mesmo quando elas são essencialmente semelhantes.

Um programa sinérgico em uma fonte de soldagem eletrônica é um recurso que ajusta parâmetros de soldagem (como tensão, forma de onda de corrente e velocidade de alimentação) com base em configurações pré-definidas pela própria máquina. Ao selecionar o tipo de material, o diâmetro do arame eletrodo e o gás de proteção, o operador escolhe apenas um parâmetro principal (por exemplo, a corrente ou a velocidade de alimentação), enquanto o programa sinérgico ajusta automaticamente os demais parâmetros conforme valores presentes no banco de dados da fonte. Dessa forma, espera-se que o processo funcione adequadamente, garantindo um arco estável e transferência regular.

Entretanto, nessas fontes sinérgicas, os algoritmos de controle não se modificam de forma ativa (ou seja, não monitoram sinais elétricos para fazer ajustes no algoritmo em tempo real, como ocorre em sistemas adaptativos). Por exemplo, caso surja alguma variação na DBCP, o processo pode perder estabilidade, sobretudo se a variante em uso for propensa a essa desestabilização.

Um programa sinérgico adaptativo não apenas simplifica o ajuste inicial, como ocorre em programas sinérgicos convencionais, mas também utiliza o monitoramento contínuo de sinais elétricos para realizar correções em tempo real. O monitoramento se concentra em variáveis como tensão (U) e corrente (I), cuja medição é relativamente simples para a fonte de soldagem ao longo do processo. Esses dados servem de base para que um ou mais parâmetros de soldagem sejam ajustados automaticamente, por meio de algoritmos internos da fonte frequentemente tratados como segredos industriais do fabricante. Mesmo diante de pequenas variações operacionais, a principal finalidade é buscar que o sistema mantenha características de qualidade adequadas ao propósito de cada sistema adaptativo. O algoritmo visa o controle de uma ou mais característica, como a estabilidade do arco, estabilidade na transferência metálica e penetração constante, tudo isso com o mínimo de intervenção do operador.

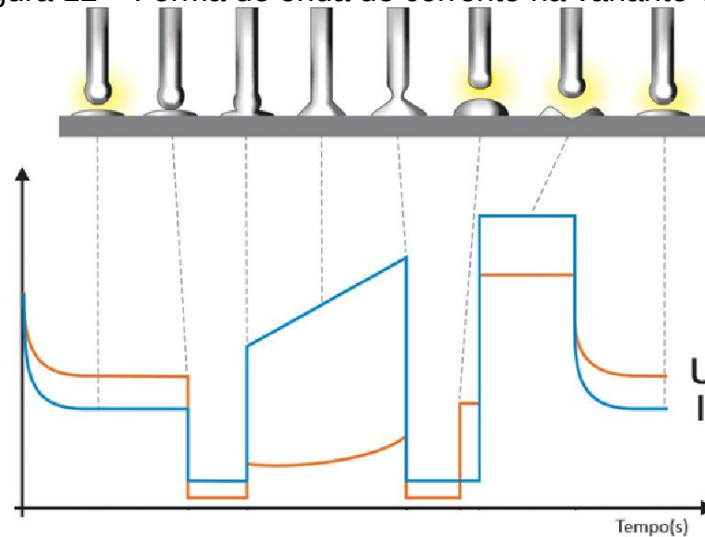
2.9.1 Curto-circuito controlado (CCC)

Técnicas controladas de transferência de curto-circuito modificam a forma de onda da corrente para melhorar a estabilidade do processo convencional e reduzir respingos.

Diferentes fabricantes adotam seus próprios nomes comerciais para a tecnologia de transferência por curto-circuito controlado como LSC, CCC, STT, RDM,

Fastroot, Optarc, Cold Arc (Norrish; Cuiuri, 2014). O princípio básico do processo de curto-circuito controlado é mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Forma de onda de corrente na variante CCC.



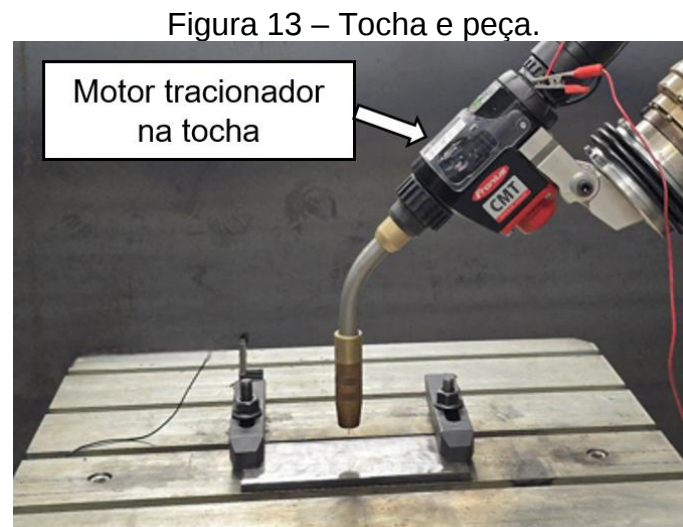
Fonte: adaptado de Dutra (2023).

A corrente é reduzida do nível de arco por um curto período assim que um curto-circuito é detectado (por uma queda de U). Esse atraso no aumento normal da corrente garante que a gota entre em contato com a poça de fusão e evita a instabilidade inicial do curto-circuito. A corrente é aumentada para um nível predeterminado (geralmente menor do que ocorre durante a transferência por curto-circuito convencional). Antes do destacamento da gota, a corrente é reduzida para um nível baixo para evitar a ruptura explosiva da ponte metálica, que une o arame à gota. Esta técnica elimina quase completamente o respingo, se o algoritmo estiver bem ajustado. A gota é transferida para a poça sob a influência da tensão superficial. A detecção da iminência da ruptura da ponte metálica pode ser alcançada usando medições de U , taxa de aumento da U no tempo ou valores calculados a partir da corrente instantânea e U . (Norrish, 2017)

Apesar das vantagens oferecidas, o algoritmo de controle deve prever com precisão a iminência da ruptura da ponte metálica e agir com rapidez, derrubando a corrente. Caso a fonte não detecte corretamente esse evento, o resultado pode ser a formação indesejada de respingos e irregularidades nas transferências entre os ciclos.

2.9.2 Curto-circuito com controle eletromecânico

O processo curto-circuito com controle eletromecânico é uma variante do processo de curto-circuito controlado, porém com controle da velocidade e sentido de alimentação de arame. Esta abordagem proporciona controle adicional da transferência metálica. O sistema de soldagem como um todo emprega um motor tracionador no alimentador de arame e um motor tracionador adicional na tocha (Figura 13), sendo este capaz de alterar o sentido da VA. Entre o alimentador de arame e a tocha, o arame passa por um dispositivo denominado *buffer*. O buffer tem a função de disponibilizar a quantidade de arame instantaneamente requerida pelo motor da tocha, absorvendo também os movimentos de recuo do arame. De forma simplificada, o motor do alimentador de arame fornece a velocidade média de alimentação ao buffer, enquanto o motor da tocha é responsável pelo movimento de avanço e recuo instantâneo do arame, sendo suprido pelo arame armazenado no buffer.



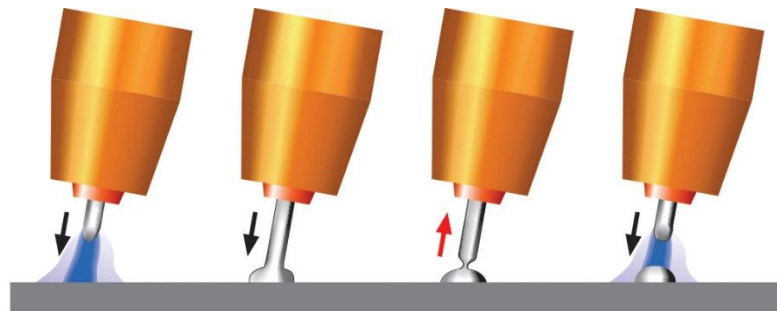
Fonte: Próprio autor.

Quando a ponta do arame eletrodo faz contato com a poça de fusão, o motor da tocha de solda é revertido pelo controle da fonte. Isso faz com que o sentido de alimentação do arame seja revertido, promovendo a transferência da gota, como representado na Figura 14. Durante a transferência do metal, a corrente cai para um nível baixo, evitando assim a geração de respingos. Assim que a transferência do metal é completada, o arco é reaberto e o arame é alimentado para frente mais uma vez com a corrente de solda reestabelecida. (Selvi; Vishvaksenan; Rajasekar, 2018)

Em distinção aos processos descritos nos itens 2.8.1 e 2.9.1, a constrição da ponte metálica ocorre predominantemente pelo movimento de recuo do arame, contribuindo para uma transferência metálica mais suave. (Marques, 2013)

Segundo a Fronius do Brasil (2020), o motor da tocha da fonte Fronius TPS 400i permite acelerações superiores aos modelos antigos e consequentemente maiores frequências de destacamento de gota e velocidades de soldagem.

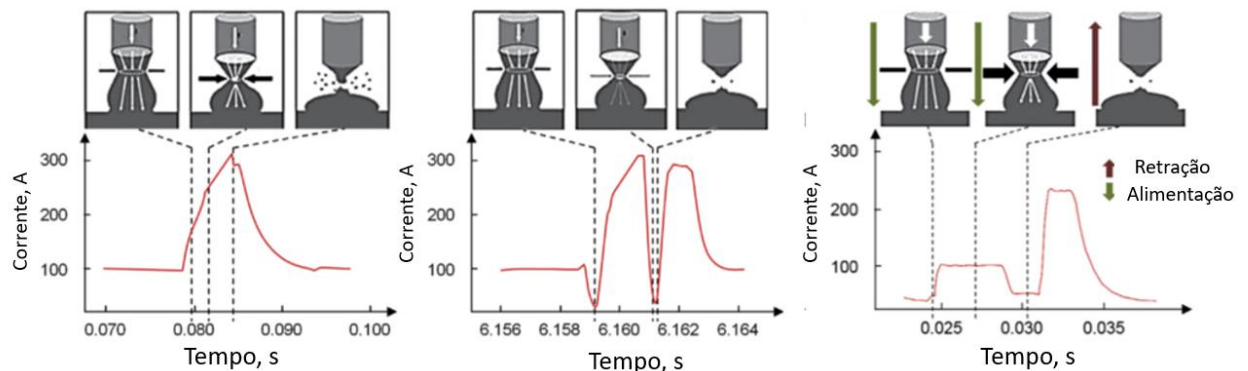
Figura 14 - Etapas de transferência por curto-circuito com controle eletromecânico.



Fonte: (Dutra, 2023).

A Figura 15 mostra um comparativo entre as tecnologias Curto-circuito convencional, CCC e curto-circuito com controle eletromecânico. No curto-circuito com controle eletromecânico é possível observar uma menor dependência das FEM para o destacamento da gota, uma vez que o processo utiliza a reversão do sentido de alimentação de arame para o processo.

Figura 15 - Comparativo entre variantes convencional (esquerda), CCC (meio) e curto-circuito com controle eletromecânico (direita).

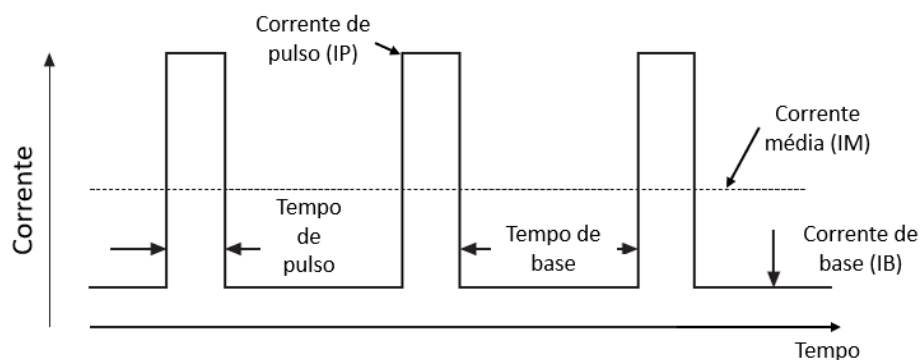


Fonte: Adaptado de (KAH, 2021).

2.9.3 MIG/MAG Pulsado (GMAW-P)

O processo MIG/MAG pulsado (GMAW-P) caracteriza-se pelo uso de fonte com imposição de forma de onda de corrente (ver Figura 16) que alterna entre dois níveis: a corrente de base (IB), responsável por manter o arco aberto em baixa intensidade, e a corrente de pulso (IP), encarregada de destacar a gota na extremidade do arame-eletrodo, em modo voo livre, por meio de um aumento relevante da força eletromagnética. Embora esta explicação seja feita considerando uma forma de onda retangular, o pulso pode sofrer variações ou suavizações, mantendo, porém, o mesmo princípio físico de transferência. A condição de transferência mais estável ocorre em regime “uma gota por pulso” (UGPP). Quando os parâmetros de forma de onda estão adequadamente ajustados, o processo realiza uma transferência estável e regular, reduzindo respingos em comparação ao curto-circuito convencional e proporcionando melhor acabamento do cordão de solda, permitindo transferência por voo livre mesmo com a corrente média (IM) abaixo do valor de transição. (Scotti; Ponomarev, 2014)

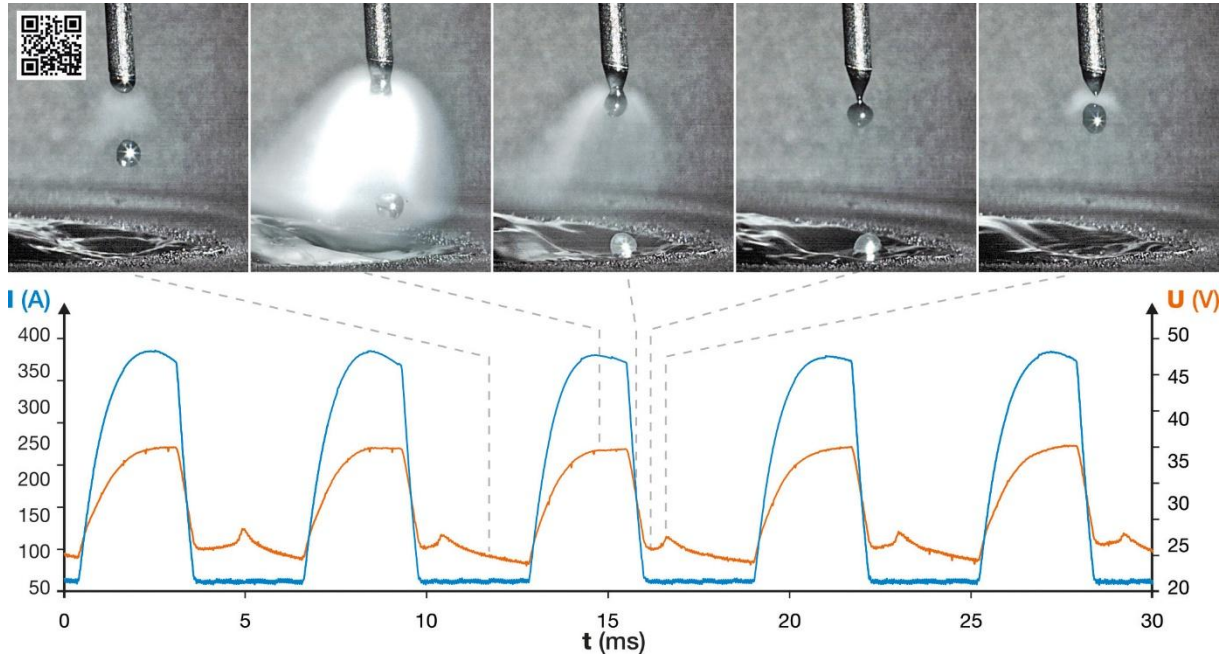
Figura 16 – Forma de onda de corrente GMAW-P.



Fonte: Adaptado de (Norrish, 2006).

A U acompanha a modulação da corrente, sendo sua amplitude dependente do tipo de gás de proteção e do comprimento do arco. A IM é determinada pela média ponderada entre a IB e a IP. A Figura 17 ilustra a sequência de eventos de uma transferência pulsada.

Figura 17 - Imagens da sequência de eventos de uma transferência metálica por corrente pulsada e os correspondentes oscilogramas de corrente e tensão. Estes dados são para o arame ER70S-6 de 1,2 mm, gás argônio com 8% CO₂, corrente média de 200 A, $I_p=380$ A, $t_p=2,7$ ms, $I_b=63$ A, $t_b=3,5$ ms, tensão média= 30 V, $V_a=5,4$ m/min., $V_s=30$ cm/min.



Fonte: (Dutra, 2023).

Uma característica importante do GMAW-P é que a U média é cerca de 20% maior do que a soldagem por curto-circuito para a mesma IM. Esse aumento de U média não necessariamente reflete diretamente em maior calor imposto (parcela do calor que efetivamente se transfere para o metal de base), mas é consequência do maior comprimento de arco e não ocorrências de curtos-circuitos. A relação entre o valor da I_p e o tempo de pulso é o principal fator que governa o destacamento da gota, sendo que valores baixos de I_b têm pouco efeito sobre o destacamento. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Para um arame eletrodo de aço de 1,2 mm, é possível conseguir uma transferência goticular com IM abaixo de 50 A, enquanto a corrente de transição para esse caso é em torno de 220 a 240 A. Isso permite a soldagem de chapas finas e em múltiplas posições, mantendo um bom acabamento e reduzindo os respingos. Embora a corrente de soldagem mais baixa possa resultar em menor produtividade em relação ao MIG/MAG goticular, há um ganho de 10 a 15% na taxa de alimentação quando comparado ao MIG/MAG por curto-circuito para a mesma IM, devido à maior IE do pulsado. Essa diferença pode ser ainda maior, considerando-se o uso de uma

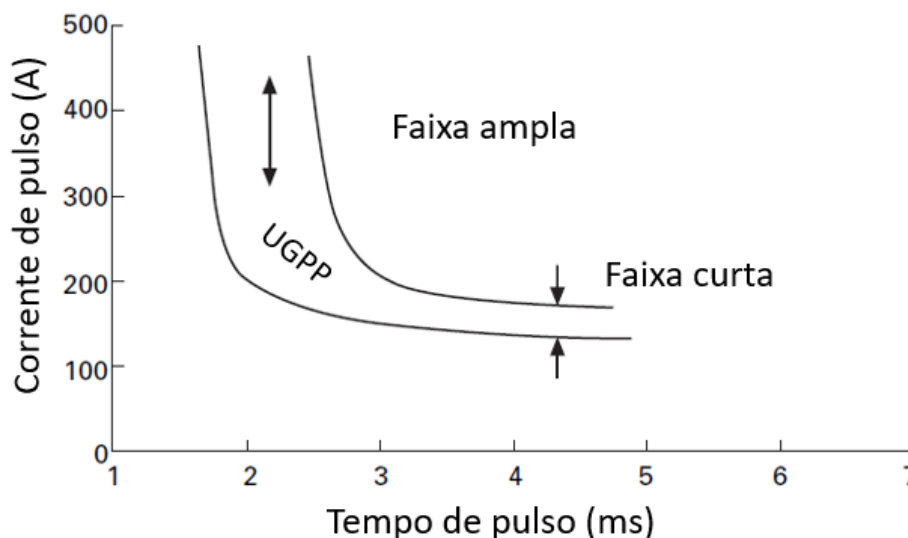
Distância do Bico de Contato Peça (DBCP) maior no processo pulsado. (Scotti; Ponomarev, 2014)

O GMAW-P é particularmente vantajoso quando se utilizam arames de maior diâmetro, pois esses requerem correntes muito altas para alcançar a transferência goticular, mas no GMAW-P é possível obter correntes médias menores com taxas de deposição semelhantes às obtidas com arames de diâmetros menores. Isso é especialmente útil na soldagem de alumínio, pois arames de maior diâmetro têm melhor alimentabilidade e custo mais baixo por unidade de massa. (Scotti; Ponomarev, 2014)

O tempo de pulso é determinante para o número de gotas formadas e destacadas durante o pulso de corrente. Caso o tempo de pulso seja grande, mais de uma gota pode se formar e ser destacada, resultando em desbalanceamento e instabilidade no arco. Já um tempo de pulso muito curto pode ser insuficiente para a formação da gota, levando a transferências irregulares e a problemas como desuniformidade na superfície do cordão e na geometria, especialmente na penetração. Portanto, se não for possível trabalhar na condição de uma gota por pulso, é mais recomendável utilizar as variantes convencionais por curto-circuito ou goticular, a depender da aplicação. (Scotti; Ponomarev, 2014)

Em programas sinérgicos adaptativos, a incorporação de controle por microprocessadores possibilita a adoção de estratégias de controle diversas e algumas relativamente complexas, como o uso de uma abordagem não linear em que o algoritmo de controle é variado com a corrente. A condição de UGPP é mais facilmente garantida utilizando alta corrente de pulso e curta duração, uma vez que estes são menos sensíveis às variações de corrente (Figura 18). (Norrish, 2006)

Figura 18 – Faixa de operação na condição



Fonte: Adaptado de (Norrish, 2006).

Segundo Scotti e Ponomarev (2014), essa faixa teórica da Figura 18 não seria uma região tão bem definida conforme evidenciado em seus experimentos, porém é possível observar pelos resultados apresentados que a corrente de pulso tem uma faixa mais ampla para tempos de pulso mais curtos.

Embora o MIG/MAG pulsado ofereça vantagens consideráveis quando bem ajustado, o processo MIG/MAG em curto-circuito convencional continua sendo o mais utilizado em aplicações de baixas correntes e potências, principalmente pela simplicidade de operação, menor investimento (tanto de aquisição quanto de manutenção) e robustez do processo. Uma das dificuldades do MIG/MAG pulsado é a ampla gama de variáveis que precisam ser definidas (IP, IB, tempo de base e de pulso), o que exige soldadores experientes e equipamentos eletrônicos mais avançados.

Nos MIG/MAG pulsados convencionais (sem controles adaptativos), ao se alterar a distância bico-contacto-peça (DBCP), a extensão livre do eletrodo permanece inalterada, resultando em variações no comprimento de arco. Como consequência, o ponto de ancoragem do arco na peça e a energia de soldagem também oscilam, tornando a regularidade do cordão e o aporte térmico menos constantes. Além disso, se a DBCP for muito reduzida o eletrodo pode entrar em contato com a peça, não mais realizando transferência em voo livre e provocando instabilidade no processo.

Em contrapartida, esse problema pode ser mitigado pelo uso de fontes de soldagem modernas, que — embora mais caras em relação às convencionais —

contam com programas sinérgicos e controles adaptativos, ajustando as variáveis de soldagem de forma automática e tornando o processo mais simples e confiável para o soldador. Assim, a seleção entre o curto-circuito convencional e pulsado depende das exigências de produtividade, da qualidade desejada, do investimento disponível e do grau de especialização da equipe de soldagem.

3 METODOLOGIA

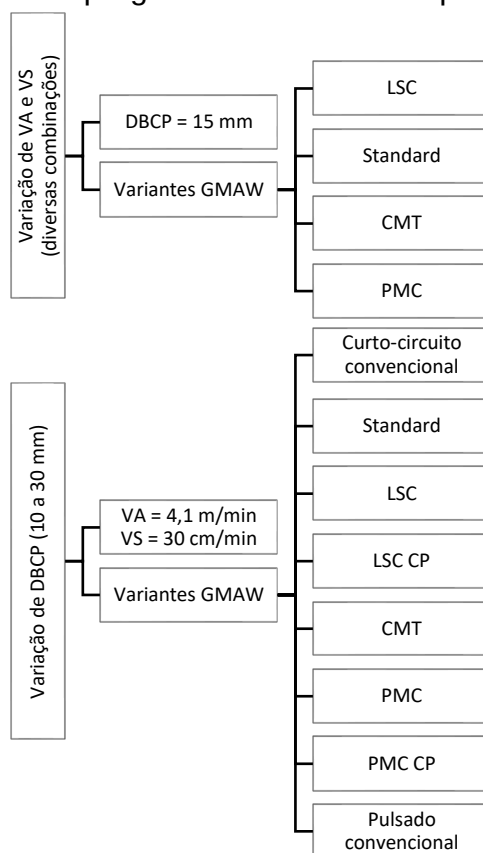
3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se em detalhes a metodologia adotada para a realização dos experimentos de soldagem MIG/MAG, com foco na análise da camada resultante das sobreposições de cordões, além da matriz de ensaios e das análises subsequentes. A metodologia abrange a descrição do aparato experimental, os parâmetros de soldagem utilizados, as características das sobreposições de cordões depositados e os métodos de análise adotados para a avaliação dos resultados obtidos.

Em síntese, para proporcionar ao leitor uma visão global dos experimentos, as variantes do processo MIG/MAG foram avaliadas em duas etapas distintas (vide Figura 19). Na primeira etapa (vide Figura 20), as variáveis VA e VS foram testadas mantendo constante a relação VA/VS – com o intuito de garantir a mesma quantidade de material de adição depositado por cordão – iniciando com VS de 30 cm/min e aumentando gradualmente esses valores até atingir o limite de estabilidade de cada variante. Na segunda etapa (vide Figura 21), com VA e VS fixos, variou-se a DBCP para avaliar o desempenho de cada variante sob diferentes distâncias.

Os detalhes sobre cada variante, os procedimentos experimentais e as análises correspondentes serão apresentados nos subitens que se seguem.

Figura 19 –Diagramas esquemáticos representando as variantes do processo MIG/MAG empregadas nos ensaios experimentais.

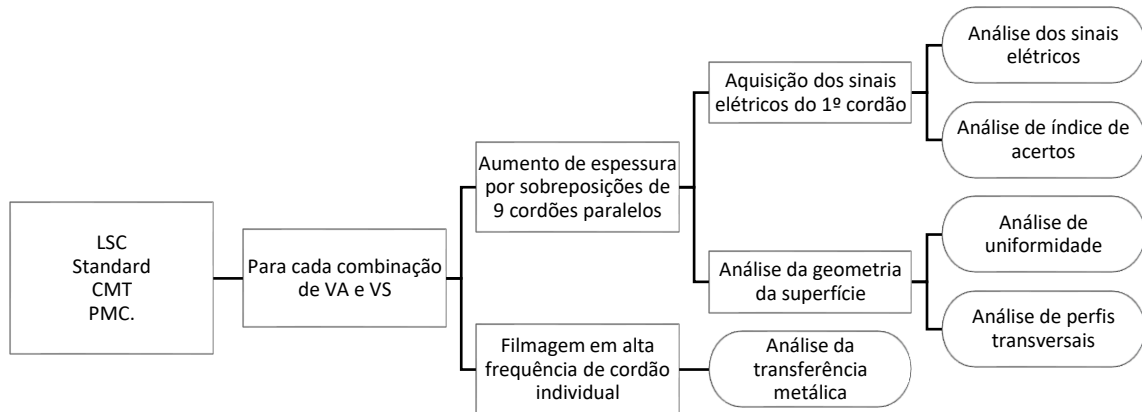


Fonte: Próprio autor.

Observa-se que as variantes de curto-circuito convencional e pulsado convencional foram analisadas apenas quanto à variação da DBCP. Essa decisão foi tomada considerando que esses processos não dispõem de controles adaptativos e exigem ajustes dos parâmetros sempre que as VA são alteradas, o que demandaria o desenvolvimento de uma metodologia para definir tais parâmetros em função da VA – abordagem que foge ao escopo principal deste estudo. Assim, os experimentos para essas variantes foram realizados variando-se unicamente a DBCP.

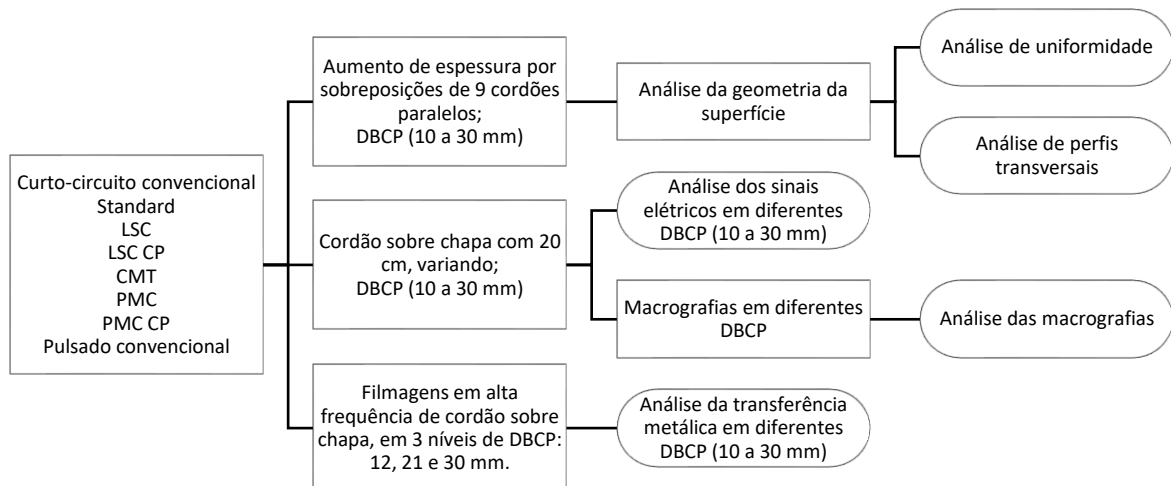
Em ambas as etapas experimentais, foram realizadas análises de oscilogramas e das filmagens em alta frequência, visando compreender detalhadamente o comportamento das variantes. Paralelamente, os depósitos formados pela sobreposição de cordões paralelos foram analisados para determinar o nível de regularidade alcançado em cada caso.

Figura 20 – Representação dos experimentos e análises realizados com variações das variáveis VA e VS.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Representação dos experimentos e análises realizados com variações de DBCP.



Fonte: Próprio autor.

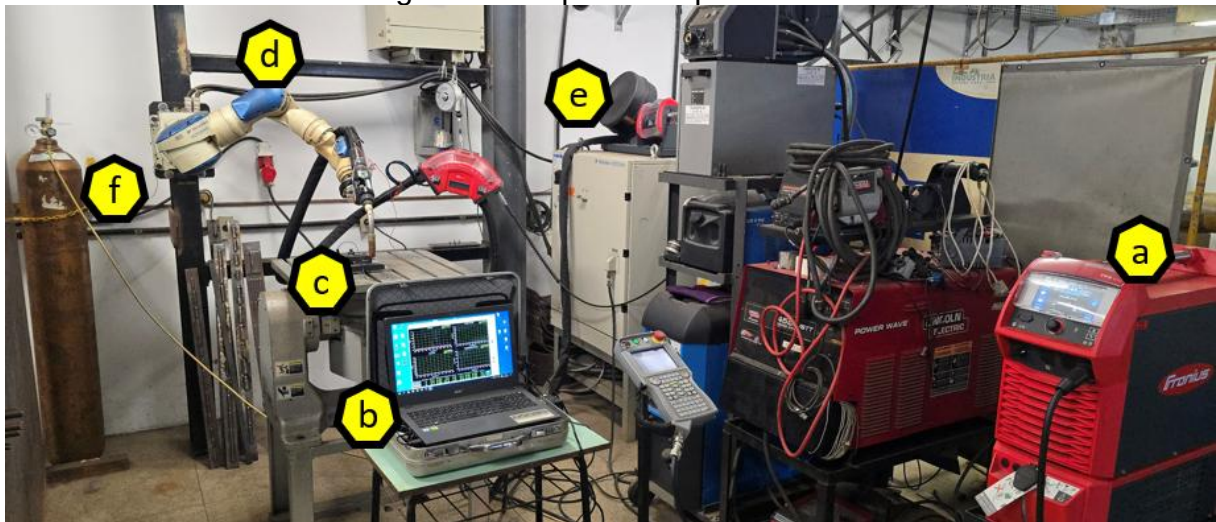
3.2 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental utilizado para a realização dos ensaios foi composto por uma série de equipamentos e componentes selecionados. Os principais elementos, como mostrado na Figura 22, são:

- Fonte de soldagem Fronius TPS 400i;
- Sistema de aquisição portátil (SAP-2), empregado para a medição dos sinais elétricos de U, I e VA;
- Chapas de aço carbono ASTM A36, com dimensões de 76,2 mm de largura e 9,52 mm de espessura, utilizadas como peça para a deposição dos cordões de solda;

- d) Robô antropomórfico MOTOMAN modelo SIAD010D-A0 da empresa YASKAWA, responsável pelo controle preciso da movimentação da tocha de soldagem, garantindo a repetibilidade dos ensaios;
- e) Arame eletrodo ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro, que foi utilizado como material de adição para os cordões de solda;
- f) Gás de proteção composto por 85% de Argônio e 15% de CO_2 .

Figura 22 – Aparato experimental.



Fonte: Próprio autor.

Bom destacar que quanto à VA instantânea no bico de contato, apenas a variante curto-circuito com controle eletromecânico utiliza o recuo do arame. Nas demais variantes MIG/MAG, não há inversão do sentido de alimentação do arame. No entanto, o motor da tocha garante um maior controle da VA instantânea, evitando problemas de folgas e atritos no conduíte de arame que ocorreriam caso o arame fosse alimentado exclusivamente pelo motor do alimentador.

Vale destacar que, neste estudo, a medição da VA pelo sistema de aquisição portátil é realizada entre o rolo de arame e o alimentador de arame, não capturando as variações instantâneas de velocidade promovidas pelo motor da tocha, mas registrando os valores médios de alimentação.

3.3 VARIANTES MIG/MAG AVANÇADAS

A partir da fonte Fronius TPS 400i, as variantes MIG/MAG avançadas foram exploradas. Os nomes comerciais adotados, assim como o número de identificação dos programas sinérgicos adaptativos pelo fabricante, estão relacionados com as variantes controladas de transferência, descritos no item 2.9, na Tabela 1.

Tabela 1 - Programas sinérgicos de variantes avançadas.

Variante	Nome comercial	ID do sinérgico
Curto-circuito controlado	Low Spatter Control (LSC)	3729
Curto-circuito com controle eletromecânico	Cold Metal Transfer (CMT)	3542
GMAW-P	Pulse Multi Control (PMC)	4315
-	Standard	2566

Fonte: Próprio autor.

Para cada variante avançada mencionada, é fundamental destacar que existem subcategorias de programas sinérgicos desenvolvidos para aplicações específicas, sendo cada programa identificado por um número de identificação (ID) fornecido pelo fabricante. A disponibilidade desses programas sinérgicos depende das características do arame e do gás de proteção utilizado. No presente trabalho, serão explorados os programas sinérgicos de aplicação "universal", cujos números de identificação estão listados na Tabela 1. Conforme descrito pelo fabricante, os programas sinérgicos universais possuem características gerais voltadas para a maioria dos problemas.

Os programas sinérgicos utilizados realizam o controle automático dos valores médios dos parâmetros de U, I, potência e VA de maneira que, ao ajustar um dos parâmetros, os demais são automaticamente ajustados. Neste estudo, o foco será na regulação da VA, com os demais parâmetros variando em função da VA. Os parâmetros mencionados apresentam variações ao longo do processo de soldagem, não sendo exatamente os valores médios apresentados no ajuste na fonte.

Além dos parâmetros principais, as variantes LSC, CMT e Standard dispõem de ajustes secundários, como a “correção do comprimento do arco” e a “correção dinâmica” da forma de onda de corrente, enquanto o PMC possui os ajustes “correção

de pulso” e “estabilizador do comprimento de arco”. Entretanto, esses parâmetros não serão explorados neste estudo, sendo mantidos os valores padrão iniciais de cada recurso. Embora ajustes mais precisos pudessem melhorar os resultados e reduzir limitações relacionadas à VA, essa otimização não faz parte da metodologia da presente pesquisa.

Ambas as variantes comerciais, LSC e Standard, realizam transferência metálica por contato com controle de corrente. Entretanto, o Standard não incorpora o controle de corrente detalhado no item 2.9.1, o que dificulta sua classificação entre as tecnologias conhecidas. Nos resultados apresentados neste trabalho, a denominação “curto-circuito controlado” refere-se exclusivamente ao uso da variante Low Spatter Control (LSC), enquanto a outra variante será denominada simplesmente como Standard.

Quanto ao programa sinérgico adaptativo Pulse Multi Control (PMC), este é uma variante com transferência metálica goticular com corrente pulsada, como descrito no item 2.9.3, porém é um sistema adaptativo que varia uma ou mais variáveis da forma de corrente ou a VA para manter o processo estável. Neste trabalho será referido como pulsado adaptativo ou PMC. Não foram encontradas informações detalhadas que esclareçam o princípio de funcionamento desse sistema adaptativo.

Para a soldagem na variante curto-circuito convencional, será utilizada a opção “MIG/MAG convencional manual” na fonte, que emula uma fonte com comando de U conforme descrito no item 2.8. Nesta variante, será regulada uma U de referência, VA e uma indutância. A indutância é referenciada na fonte como “dinâmica”, que pode ser regulada em um valor entre zero e dez.

Tanto o PMC quanto o LSC possuem a opção de ativar, ou manter desativado, o recurso de “controle de penetração (CP)”, que neste trabalho será referenciado como PMC CP e LSC CP, respectivamente. Quando omitida a sigla CP, fica implícito que o recurso não foi habilitado. Não foram encontradas explicações detalhadas de como este recurso funciona, de forma que será explorado mais adiante.

3.4 AQUISIÇÕES E ANÁLISE DE DADOS

O SAP-2 realiza a aquisição dos valores de U, I e VA em função do tempo. Com base nesses dados, o software possibilita a definição de valores de referência (limiares) de U e I. Os valores calculados a partir desses limiares são particularmente

úteis para análises de transferência metálica por contato. Mais detalhes podem ser encontrados no manual do fabricante.

3.4.1 Limiar de Tensão

A partir da definição de um limiar de U , o SAP-2 é capaz de calcular os seguintes parâmetros:

- a) Período;
- b) Picos de tensão;
- c) Fase de arco:
 - Tempo de arco médio;
 - Desvio padrão do tempo de arco;
 - U média;
 - U eficaz;
 - IM ;
 - IE ;
 - Potência.
- d) Fase de curto-circuito:
 - Tempo de arco médio;
 - Desvio padrão do tempo de curto;
 - U média;
 - U eficaz;
 - IM ;
 - IE ;
 - Potência.
- e) Volume e diâmetro da gota, calculados com base na VA e o período médio, utilizando a U de referência.

Como observado, diversos parâmetros calculados pelo software dependem da definição de um limiar de U adequado. Para este estudo, foi utilizado um limiar de U de 10V, sendo que valores abaixo desse limiar caracterizam a fase de curto-circuito, enquanto valores acima representam a fase de arco.

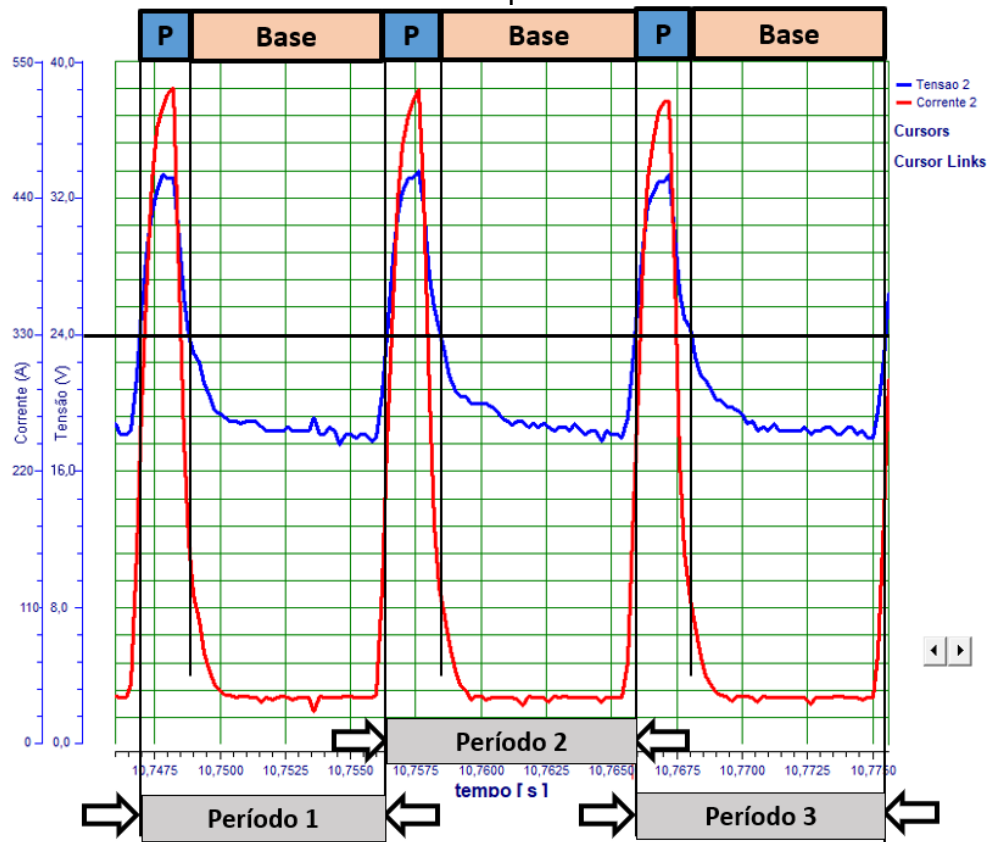
3.4.2 Limiar de corrente

O SAP-2 contabiliza os picos de corrente a partir da definição de um limiar de corrente. Quando a forma da corrente apresenta baixa repetibilidade ou o limiar é cruzado várias vezes por período (ou seja, quando o número total de picos difere significativamente do número total de períodos), os valores dos picos tornam-se imprecisos, impossibilitando a identificação precisa da fase em que cada pico ocorre. Nessas situações, os valores serão registrados como "Não se aplica (N/A)" nas tabelas comparativas dos apêndices.

3.4.3 Adaptação para Transferência Metálica Goticular com Corrente Pulsada

Conforme mencionado no item 3.4.1, o limiar de U permite a separação do período total em duas fases distintas: curto-circuito e arco, para o modo de transferência por contato. Para a transferência metálica goticular com corrente pulsada, é possível utilizar os valores calculados pelo software, porém é necessário definir cuidadosamente o limiar de U, que deve ser superior à faixa de U da fase de corrente de base. Na Figura 23, observa-se a existência de fases de pulso e de base. Utilizar o limiar de U no pulsado para definir esses períodos, em vez de um limiar de I, resulta em valores menos precisos para os períodos de pulso e de base, se comparado à transferência por contato, na qual os patamares de U definem claramente os períodos de curto-circuito e arco. Essa adaptação proporciona resultados razoáveis para a média dos períodos e seu desvio padrão. Essa abordagem foi utilizada por conveniência, visto que o software SAP-2 já opera dessa maneira. No entanto, para trabalhos futuros ou atualizações do fabricante, sugere-se a inclusão de uma opção específica para análise de pulsados, empregando limiar de I para separar os períodos de pulso e base.

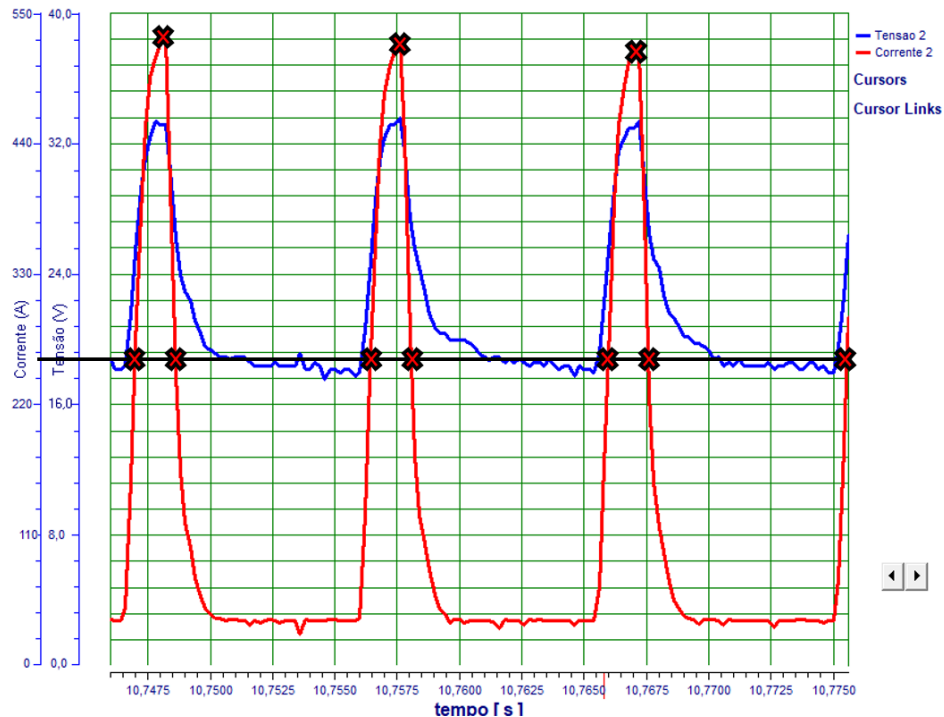
Figura 23 – Identificação dos períodos de pulso (P), base e período total, a partir de limiar de tensão para GMAW-P.



Fonte: Próprio autor.

A definição do limiar de I (Figura 24) deve ser realizada como um valor intermediário entre a I_B e o pico de corrente, sendo o valor (do limiar) arbitrado a partir de alguns ciclos no oscilograma de corrente.

Figura 24 – Identificação de picos de corrente a partir de limiar de corrente.

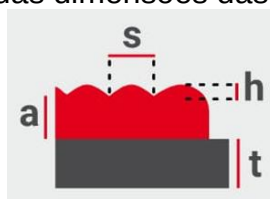


Fonte: Próprio autor.

3.5 AUMENTO DE ESPESSURA

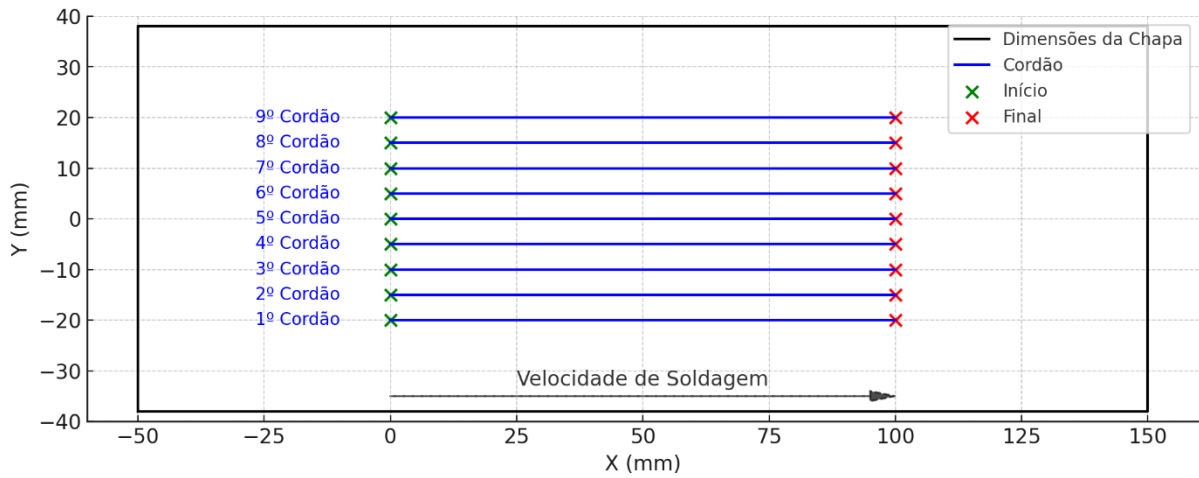
Para obter o aumento de espessura desejado, conforme ilustrado na Figura 25, serão aplicados nove cordões sobrepostos (Figura 26), cada um com 10 cm de comprimento, mantendo um espaçamento (s) de 5 mm entre os centros dos cordões, visando atingir um aumento de espessura (a) de 3 mm. Os valores de " s " e " a " foram arbitrados sem nenhuma razão específica, mas escolhidos para permitir a aplicação da metodologia entre diferentes processos. Além disso, valores muito grandes de " s " não fariam sentido, pois os cordões ficariam tão distantes que não iriam se sobrepor. Para simplificar a estimativa inicial da morfologia final, considerou-se que a diferença de altura entre os picos e vales da camada em relação ao plano da chapa base (h) é igual a zero.

Figura 25 – Esquemático das dimensões das sobreposições de cordões.



Fonte: aplicativo "WeldConnect" da empresa Fronius.

Figura 26 – Posicionamento dos cordões na chapa.



Fonte: Próprio autor.

Assim, adaptando a equação (4) e considerando a área transversal do eletrodo (A_w) e a eficiência do eletrodo (ϕ), a igualdade da equação (9) deve ser preservada.

$$a \cdot s \cdot VS = VA \cdot A_w \cdot \phi \quad (9)$$

O objetivo é manter "a" constante, os parâmetros "s" e " A_w " também permanecem constantes, enquanto a eficiência do eletrodo (ϕ) apresenta pouca variação. Portanto, a relação entre a VA e a VS deve ser mantida constante para garantir a igualdade da equação (9), assegurando assim uma taxa constante de deposição de metal de adição por unidade de comprimento de solda. Separando VA, temos a equação (10). Em cada amostra composta por 9 cordões sobrepostos, os mesmos valores de VS e VA serão mantidos para todos os cordões.

$$VA = \frac{a \cdot s \cdot VS}{A_w \cdot \phi} \quad (10)$$

As deposições de cordões serão realizadas em chapas limpas, mantidas a uma temperatura inferior a 100°C. Após cada cordão de solda, a peça será limpa com escova de aço para a deposição do próximo cordão. O ângulo da tocha com a peça

será mantido sempre em 90°, ou seja, perpendicular ao plano da superfície da chapa. A soldagem será sempre realizada na posição plana.

3.6 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO

Nesta etapa do estudo, além dos equipamentos e dos parâmetros previamente mencionados nos itens 3.2 e 3.4, a Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP) será mantida constante em 15 mm. Os cordões, conforme descrito no item 3.5, serão realizados nas variantes de soldagem LSC (Low Spatter Control), CMT (Cold Metal Transfer), Standard e PMC (Pulse Multi Control).

Valores elevados de VA e VS estão diretamente relacionados com alta produtividade. A VS será iniciada em 30 cm/min e aumentada em incrementos de 15 cm/min. A VA será calculada conforme a equação (10), considerando uma eficiência do eletrodo estimada em 96%, de modo a permitir a comparação entre as variantes nas mesmas condições de VS e VA.

A VA está diretamente relacionada à IM, e a corrente de transição acaba sendo um limitador para a estabilidade de algumas variantes. A corrente de transição para o gás e arame utilizado é na faixa de 250 a 270 A de acordo com Scotti e Ponomarev (2014).

Vale ressaltar que a VS e consequentemente a VA serão aumentadas até o limite no qual o processo se mantenha estável. Para cada valor de VA, utilizado como parâmetro de entrada na fonte de soldagem, outros parâmetros serão automaticamente ajustados pelo programa sinérgico da própria fonte de soldagem. A Tabela 2 apresenta um resumo dos ensaios que serão realizados nesta fase do estudo.

Tabela 2 – Relações de VA e VS para diferentes variantes.

Variantes	VA (metros / minuto) e VS (centímetros / minuto)						
LSC	VA: 4,1	VA: 5,9	VA: 8,3	VA: 10,3	VA: 11	VA: 12,5	VA: 14,5
Standard	VS: 30	VS: 43	VS: 60	VS: 75	VS: 80	VS: 90	VS: 105
CMT							
PMC							

Fonte: Próprio autor.

3.7 VARIAÇÃO DE DBCP

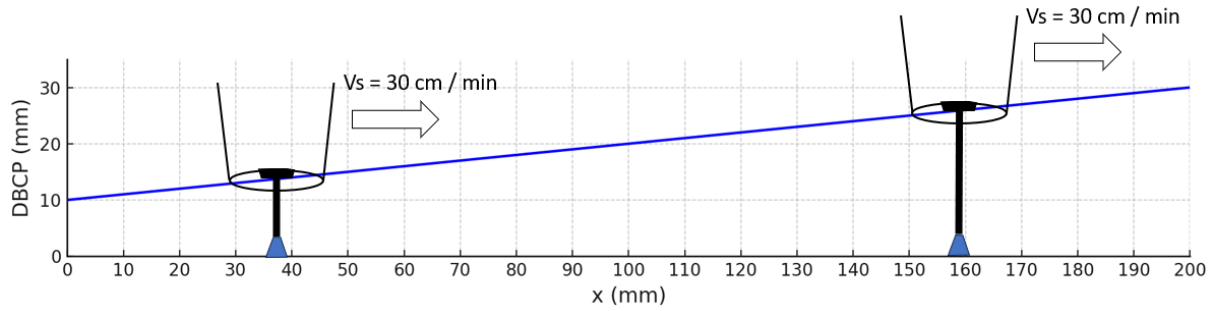
Como já exposto no item 2, a variação da DBCP exerce influência nos processos de soldagem MIG/MAG. Assim, será investigado o comportamento das diferentes variantes MIG/MAG em relação à variação da DBCP. O estudo será dividido em duas partes: cordão individual sobre chapa e sobreposição de cordões paralelos sobre chapa. Em ambos os casos, os ensaios serão realizados nas variantes de soldagem LSC, LSC CP, PMC, PMC CP, CMT, Standard, convencional e pulsado com imposição de forma de onda de corrente (sem controle adaptativo). Para limitar o número de ensaios, estes serão conduzidos apenas na velocidade de soldagem de 30 cm/min e VA ajustada na fonte para 4,1 m/min., Vale ressaltar que a VA é um valor ajustado podendo variar dependendo do algoritmo de controle de cada variante. Os equipamentos e parâmetros são os mesmos descritos nos itens 3.2 e 3.4. Busca-se, assim, analisar o comportamento das variantes com e sem controle adaptativo e analisar os resultados quanto à forma de controle, morfologia do cordão e acabamento superficial.

Por meio do cordão sobre chapa, serão analisados os sinais elétricos e a VA, e a morfologia desse cordão será analisada por meio de macrografias de seções transversais. Já o aspecto da superfície será analisado nas sobreposições de cordões paralelos.

3.7.1 Cordão sobre chapa

Cada cordão será depositado variando a DBCP (Figura 27), iniciando em 10 mm e aumentando a uma taxa constante de 0,5 mm/s, por meio do robô antropomórfico, até atingir 30 mm de DBCP. O comprimento total do cordão será de 20 cm. A baixa taxa de incremento da DBCP visa eliminar os efeitos de atrasos nos algoritmos de controle da fonte de soldagem, evitando assim conclusões incorretas decorrentes desses atrasos.

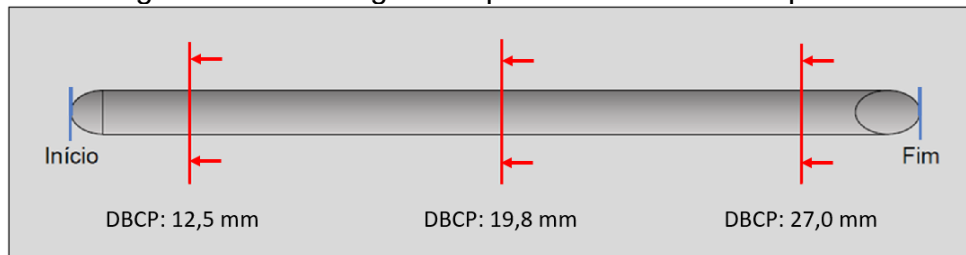
Figura 27 – Movimento da tocha variando DBCP para cordões individuais.



Fonte: Próprio autor.

A caracterização geométrica dos cordões depositados será efetuada por meio de macrografias em três seções transversais, cada uma representando um valor de DBCP, ver Figura 28.

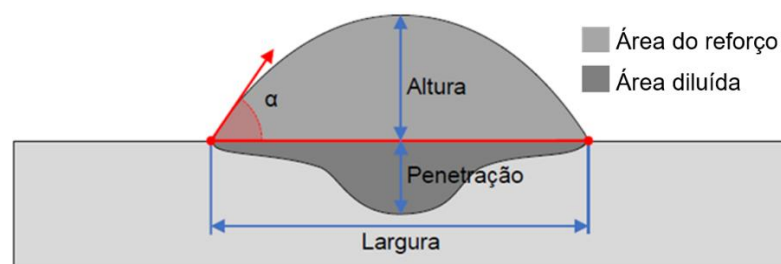
Figura 28 – Regiões das macrografias que serão analisadas para cada variante.



Fonte: Adaptado de Galeazzi (2024).

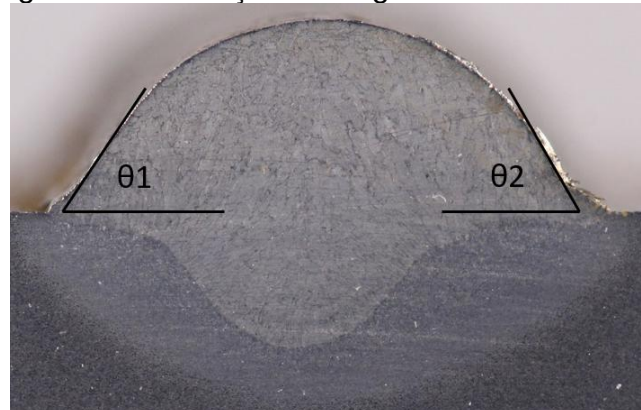
A partir das macrografias (ver Figura 29), serão mensuradas a altura, a largura, a penetração, o ângulo de molhamento (α), a área do reforço e a área diluída. O ângulo de molhamento será calculado como a média dos valores obtidos nos dois lados do cordão. Para registrar a convexidade do cordão, a medição não será realizada exatamente na interface entre o pé do cordão e a superfície da chapa, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 29 – Características principais da seção transversal.



Fonte: Adaptado de Galeazzi (2024).

Figura 30 – Medição de ângulo de molhamento.

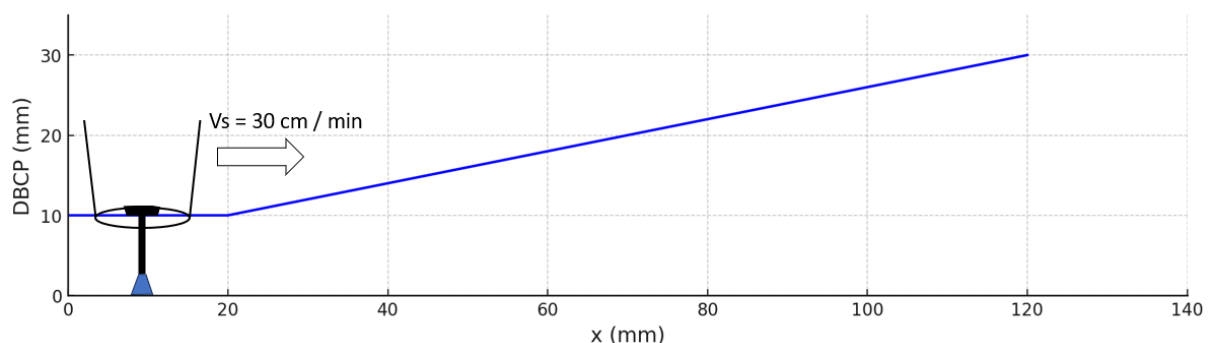


Fonte: Próprio autor.

3.7.2 Aumento de espessura por cordões sobrepostos lado a lado

Os aumentos de espessura, conforme descrito no item 3.5 e ilustrado na Figura 26, serão realizados com variação da DBCP. Como pode ser observado na Figura 31, durante o início do deslocamento da tocha, a DBCP será inicialmente ajustada em 10 mm, mantida por 2 cm de deslocamento nessa condição, e posteriormente aumentada a uma taxa constante de 1 mm/s até atingir 30 mm, sendo esta taxa de subida o dobro daquela utilizada nos cordões individuais. O comprimento total do cordão será de 12 cm, com 2 cm mantendo a DBCP em 10 mm e 10 cm com variação progressiva da DBCP.

Figura 31 - Movimento da tocha variando DBCP para sobreposição de cordões.



Fonte: Próprio autor.

3.8 FILMAGENS EM ALTA FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO

A filmagem em alta frequência de aquisição, realizada simultaneamente com a aquisição de U e I, possibilita uma análise detalhada do processo, permitindo verificar se a transferência metálica está ocorrendo conforme esperado, considerando

as peculiaridades de cada variante. As filmagens são conduzidas com uma frequência de cinco mil frames por segundo, totalizando 500 frames, o que corresponde a um período de 0,1 segundo e 0,5 mm de deslocamento.

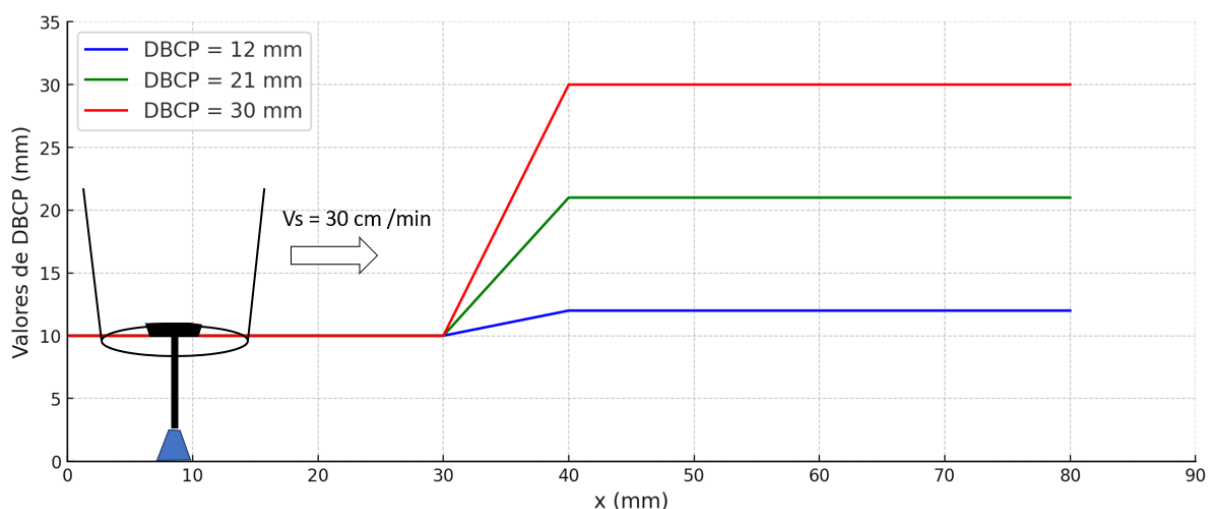
3.8.1 Variação da velocidade de deslocamento

Para cada conjunto de parâmetros dos cordões, conforme descrito no item 3.4, serão realizados cordões individuais, utilizando os mesmos parâmetros, com filmagem em alta frequência de aquisição para documentar o processo.

3.8.2 Variação de DBCP

Para cada conjunto de parâmetros dos cordões, conforme descrito no item 3.5, serão realizados três cordões individuais, cada um com uma DBCP de 12, 21 e 30 mm, respectivamente, utilizando filmagem em alta frequência de aquisição. A soldagem inicia-se com uma DBCP de 10 mm, mantida por 30 mm de comprimento do cordão. Em seguida, a DBCP é aumentada linearmente ao longo dos próximos 10 mm até atingir o valor desejado. A soldagem é então mantida por mais 40 mm com a DBCP estabelecida (12 mm, 21 mm ou 30 mm), momento em que a filmagem é realizada. Vale destacar que a velocidade de soldagem, componente da velocidade paralela à peça, é mantida constante em 30 cm/min. Para mais detalhes, consultar a Figura 32.

Figura 32 – Filmagem em alta frequência variando DBCP.



Fonte: Próprio autor.

3.9 ÍNDICE DE ACERTOS

Para estimar o índice de acertos dos ciclos de transferência metálica, definidos conforme o item 2.9 desta dissertação, empregou-se um procedimento estatístico de construção de Intervalo de Confiança (IC) para proporções. Considerando que cada ciclo de transferência de gota metálica pode ser avaliado quanto ao seu acerto, e representando a quantidade de ciclos bem-sucedidos por uma variável discreta k , obtém-se a fração amostral como:

$$\hat{p} = \frac{k}{n} \quad (11)$$

Onde n é o número total de ciclos analisados. O número de ciclos será definido a depender dos critérios de cada variante e forma de análise.

Seguindo a abordagem recomendada por Montgomery e Runger (2014), assume-se a existência de uma população de ciclos de tamanho efetivamente infinito, já que, em teoria, a coleta de dados pode ser reestabelecida a qualquer momento sem um limite superior pré-definido. Além disso, adota-se a simplificação de que cada ciclo analisado é independente dos demais, ainda que se reconheça que esta suposição é uma aproximação que facilita a aplicação da metodologia.

Para um intervalo de confiança do nível de 95,45% de probabilidade (aproximadamente ± 2 desvios-padrão na distribuição normal padrão), a fórmula aproximada do intervalo de confiança para a proporção de acertos é dada por:

$$\hat{p} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}} \quad (12)$$

Onde $z_{\frac{\alpha}{2}} \approx 2$ para valores de “n” maiores ou iguais a 20.

Passo a Passo:

- a) Coleta de Dados: Identificar “n” ciclos de transferência metálica extraídos do processo em análise, conforme o item 2.9, registrando-se a número (k) de ocorrência de ciclos bem-sucedidos (acertos);
- b) Cálculo da fração amostral de acertos: Determinar $\hat{p}$, sendo k o número de ciclos com acertos;

- c) Verificação dos critérios para aproximação normal: Conferir se $(n \cdot p \geq 5)$ e $(n \cdot (1 - p) \geq 5)$.
- Se ambos os critérios forem atendidos, considera-se que a aproximação normal é adequada para a construção do intervalo de confiança.
 - Caso um ou ambos os critérios não sejam satisfeitos (por exemplo, $(n \cdot (1 - p) < 5)$), reconhece-se a limitação da metodologia em fornecer intervalos de confiança robustos nesta situação.
- d) Cálculo do Intervalo de Confiança: Aplicar a fórmula do intervalo de confiança para proporção, obtendo o intervalo dentro do qual se espera, com 95,45% de confiança, que se encontre o verdadeiro índice de acertos na população infinita de ciclos;
- e) Interpretação dos resultados
- Se a condição $(n \cdot p \geq 5)$ e $(n \cdot (1 - p) \geq 5)$ for satisfeita:
 - i. Interpretar o intervalo de confiança como a faixa dentro da qual, com o nível de confiança estabelecido, espera-se encontrar a verdadeira proporção populacional de acertos.
 - Se a condição não for satisfeita:
 - i. Reconhecer que a estimativa pontual $\hat{p} = \frac{k}{n}$ ainda oferece uma indicação da proporção populacional de acertos observada na amostra, porém sem a possibilidade de se obter um intervalo de confiança confiável a partir desta abordagem;
 - ii. Nesta situação, não é possível inferir com a mesma segurança sobre a variabilidade real do processo, e as conclusões acerca da proporção real de acertos devem ser feitas com ressalvas.

Dessa forma, será possível quantificar, de modo estatisticamente embasado, a proporção de ciclos que atendem integralmente aos critérios de acerto definidos.

3.10 ANÁLISE DA GEOMETRIA DA SUPERFÍCIE

Este subitem descreve detalhadamente as etapas e métodos utilizados para a caracterização da superfície soldada após a realização do processo de sobreposição de cordões paralelos. A análise da superfície tem como objetivo avaliar a uniformidade, a altura média do aumento de espessura, além de identificar descontinuidades ou irregularidades que possam comprometer a integridade ou funcionalidade da peça.

3.10.1 Aquisição dos dados

A superfície será escaneada em 3D utilizando equipamento de medição por luz estruturada, com tolerância de $\pm 0,01$ mm. Os dados obtidos permitirão a análise e visualização tridimensional da superfície.

3.10.2 Análise de uniformidade e espessura

A uniformidade da superfície será analisada por meio de mapas de altura e de uma tabela contendo os valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão. Para mensurar as distâncias da superfície em relação ao plano original da chapa, será estabelecido um plano de referência no modelo 3D, representando a condição da peça antes das deposições dos cordões.

Além disso, será analisada uma região específica da superfície, correspondente a área central que abrange do terceiro ao sétimo cordão depositado. Essa seleção tem como objetivo excluir as transições iniciais e finais e minimizar os efeitos de deformação da peça, considerando que a análise se baseará em um plano de referência, e não em uma superfície curva. Essa abordagem busca mitigar possíveis erros decorrentes das deformações da chapa. Por fim, um intervalo curto ao longo do eixo X será selecionado para reduzir os impactos dessas deformações nessa direção.

3.10.3 Análise de perfis transversais de superfície

Perfis transversais da superfície serão extraídas utilizando o software GOM Inspect para análise qualitativa. Esses perfis permitirão verificar as variações das superfícies dos cordões sobrepostos, a uniformidade do espaçamento e possíveis distorções causadas pelo processo de soldagem.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO

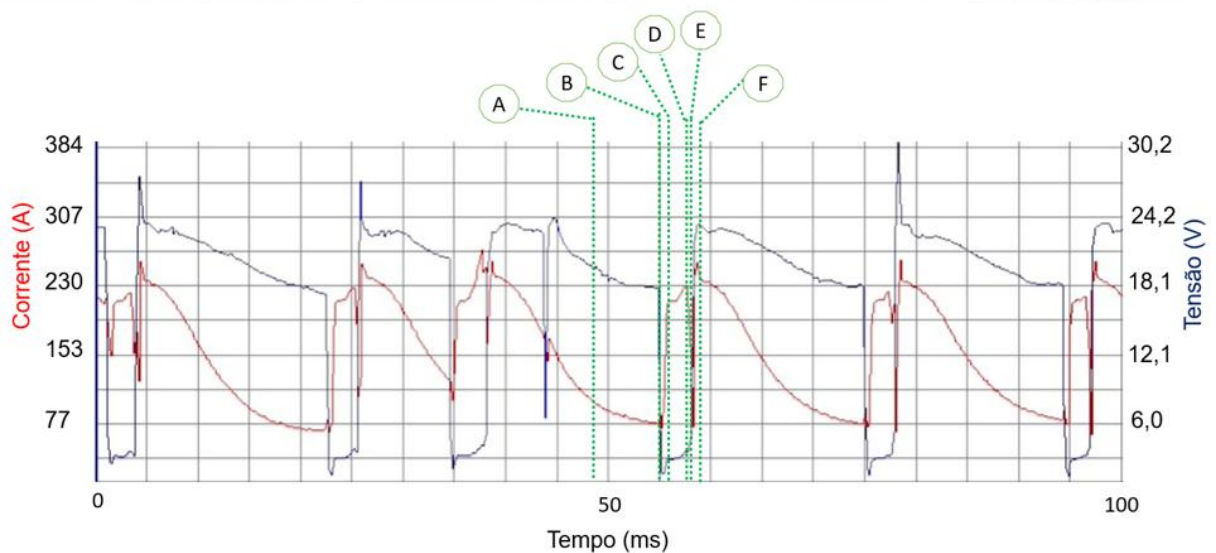
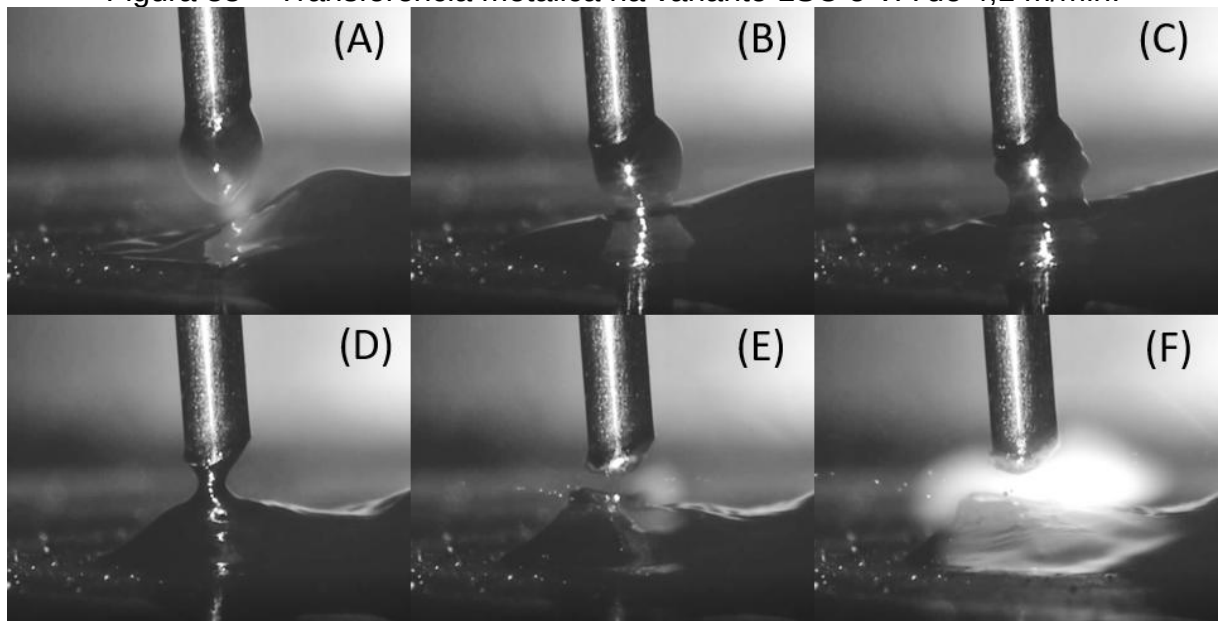
Os dados detalhados das variantes avançadas, incluindo os principais valores elétricos do processo, oscilogramas, ciclogramas e histogramas para diferentes velocidades de alimentação e soldagem, estão disponíveis no Apêndice A.

4.1.1 LSC

A partir da filmagem em alta velocidade, foi escolhida uma sequência de frames onde se identificou um ciclo com comportamento adequado do processo, considerando a transferência metálica. Os seis frames escolhidos, da Figura 33, detalham os principais comportamentos da transferência LSC na VA de 4,1 m/min:

- a) Em arco aberto, o arame eletrodo avança com a gota formada. Neste momento, reduz-se a corrente para um valor de referência inferior ao da IM, visando minimizar a repulsão da gota ao iniciar-se o curto-circuito;
- b) No início do curto-circuito, a fonte detecta a brusca queda de U e mantém a I em patamares próximos ao valor imediatamente antes do curto, de forma a reduzir a repulsão da gota;
- c) Ainda durante o curto-circuito a I aumenta, assim como a FEM, de forma a estreitar a ponte metálica (efeito pinch);
- d) Com o estreitamento da ponte metálica a fonte detecta por intermédio do aumento da resistência, devido à menor área da seção transversal da ponte metálica, que a gota está próxima do desprendimento, não mais necessitando da FEM para que o desprendimento ocorra, diminuindo de forma repentina a I para valores baixos;
- e) Em valores baixos de I a ponte metálica é rompida com poucos respingos, devido à baixa FEM neste instante;
- f) Após a ruptura da ponte metálica, a I volta a subir para patamares elevados abrindo o arco e fundindo nova gota.

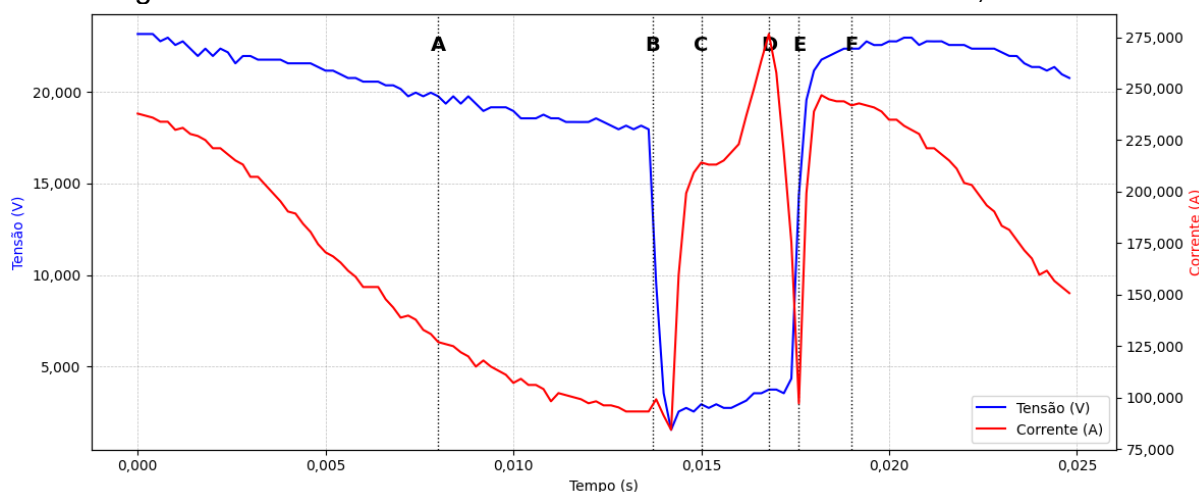
Figura 33 – Transferência metálica na variante LSC e VA de 4,1 m/min.



Fonte: Próprio autor.

Diante da dificuldade em identificar cada etapa da transferência nos oscilogramas do sistema de aquisição da câmera, foi realizado um cordão adicional utilizando os mesmos parâmetros de soldagem. Os sinais elétricos correspondentes estão apresentados na Figura 34, com os instantes previamente descritos devidamente destacados na imagem.

Figura 34 – Ciclo de transferência na variante LSC e VA de 4,1 m/min.



Fonte: Próprio autor.

O índice de acertos para o LSC considerou como critério de contabilização de acertos, que a U suba do curto para o arco em um patamar de I inferior à I média na fase de curto e também inferior à I média dos quatro primeiros milissegundos da abertura de arco. De forma prática, a U sobe em patamares baixos de I. A Tabela 3 apresenta os limites inferiores e superiores do índice de acertos com intervalo de confiança de 95,45%.

Tabela 3 – Intervalo de confiança do índice de acertos na variante LSC.

VS (cm/min)	VA média (m/min)	Ciclos bem- sucedidos (k)	Total de ciclos (n)	Fração amostral de acertos, $\hat{p}$ (%)	Limite inferior (%)	Limite superior (%)	Critérios
30	4,1	17	30	56,67%	38,57%	74,76%	Satisfeitos
43	5,9	11	30	36,67%	19,07%	54,26%	Satisfeitos

Fonte: Próprio autor.

Para a VA de 4,1 m/min, o algoritmo de controle atuou sobre a forma de onda da corrente visando minimizar o efeito explosivo decorrente da ruptura da ponte metálica. No entanto, a precisão desse controle mostrou-se limitada. Os dados apresentados na Tabela 3 fornecem um indicativo da eficácia do controle exercido pelo algoritmo. Contudo, é relevante destacar que a contabilização dos acertos foi realizada de maneira simplificada, sendo recomendada a utilização de metodologias mais detalhadas em estudos futuros para uma avaliação mais precisa do índice de acertos nas transferências desta variante.

Nesta mesma VA, foram calculadas as médias de cinco medições da derivada da corrente em função do tempo, tanto durante a queda da corrente na iminência da ruptura da ponte metálica quanto durante a subida imediatamente após a ruptura. O valor médio da derivada durante a queda foi de -156.143,0 A/s, enquanto o da subida foi de 554.555,0 A/s.

Para a VA de 5,9 m/min, observou-se que as transferências apresentaram comportamento errático, sem regularidade, apresentando repulsão em alguns momentos do contato da gota com a poça de fusão. Cada evento de repulsão foi contabilizado como um erro na avaliação do índice de acertos.

Na VA de 8,3 m/min, a transferência metálica se deu em voo livre, sem contato. É importante mencionar que não foram realizados ajustes finos nos parâmetros relacionados à "correção do comprimento do arco" e à "correção dinâmica" da forma de onda da corrente. Tais ajustes poderiam ter contribuído para uma melhora no controle do processo de transferência metálica.

Após a realização das sobreposições de cordões lado a lado (vide Figura 35), a região onde os cordões foram depositados foi escaneada em três dimensões, conforme ilustrado na Figura 36. A imagem apresenta o mapeamento da superfície nas coordenadas X (eixo horizontal), Y (eixo vertical) e Z (sentido positivo de dentro para fora da imagem). O escaneamento 3D permitiu uma análise detalhada da morfologia das sobreposições e da distribuição de altura ao longo da região soldada.

Para a medição das distâncias da superfície em relação ao plano original da superfície da chapa, foi estabelecido um plano de referência no modelo 3D, utilizando a seleção de três pontos específicos na superfície escaneada. O primeiro ponto foi definido em $X = 60$ mm; $Y = -25$ mm, no local em que a chapa foi tocada imediatamente antes do primeiro cordão depositado. O segundo ponto foi determinado em $X = 60$ mm; $Y = +25$ mm, logo após o último cordão depositado. Por fim, o terceiro ponto foi selecionado em uma posição com X entre 40 mm e 70 mm, imediatamente antes do primeiro cordão ou logo após o último cordão. Esses pontos de referência foram essenciais para estabelecer um plano de medição que representasse a peça antes das deposições de cordões.

Além disso, buscou-se analisar uma região específica da superfície delimitada pelo intervalo de Y entre -10 mm e +10 mm, correspondente à área central que abrange do terceiro ao sétimo cordão depositado. No eixo X, foi escolhido o intervalo

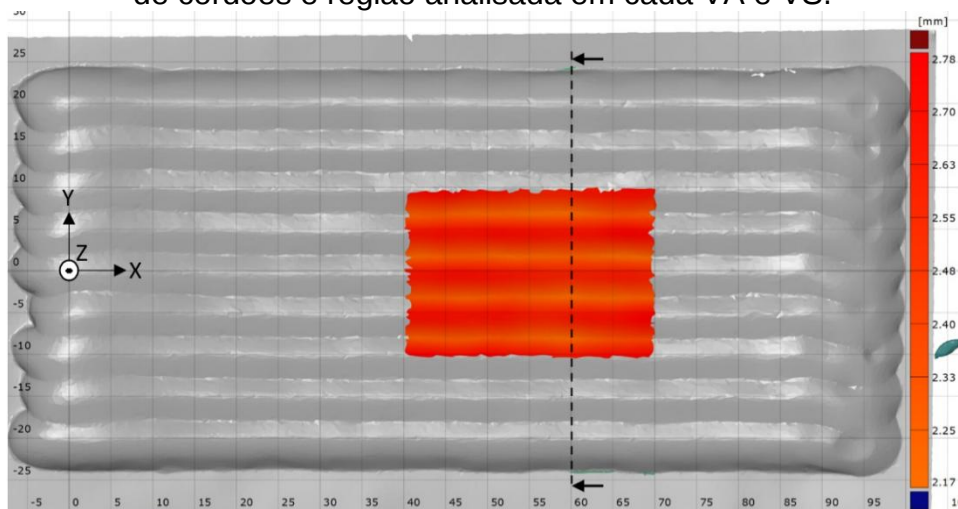
delimitado entre $X = 40 \text{ mm}$ e $X = 70 \text{ mm}$. Procedimento similar foi adotado para as demais variantes.

Figura 35 - Sobreposições de cordões lado a lado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Escaneamento 3D da superfície e perfis transversais das sobreposições de cordões e região analisada em cada VA e VS.



Fonte: Próprio autor.

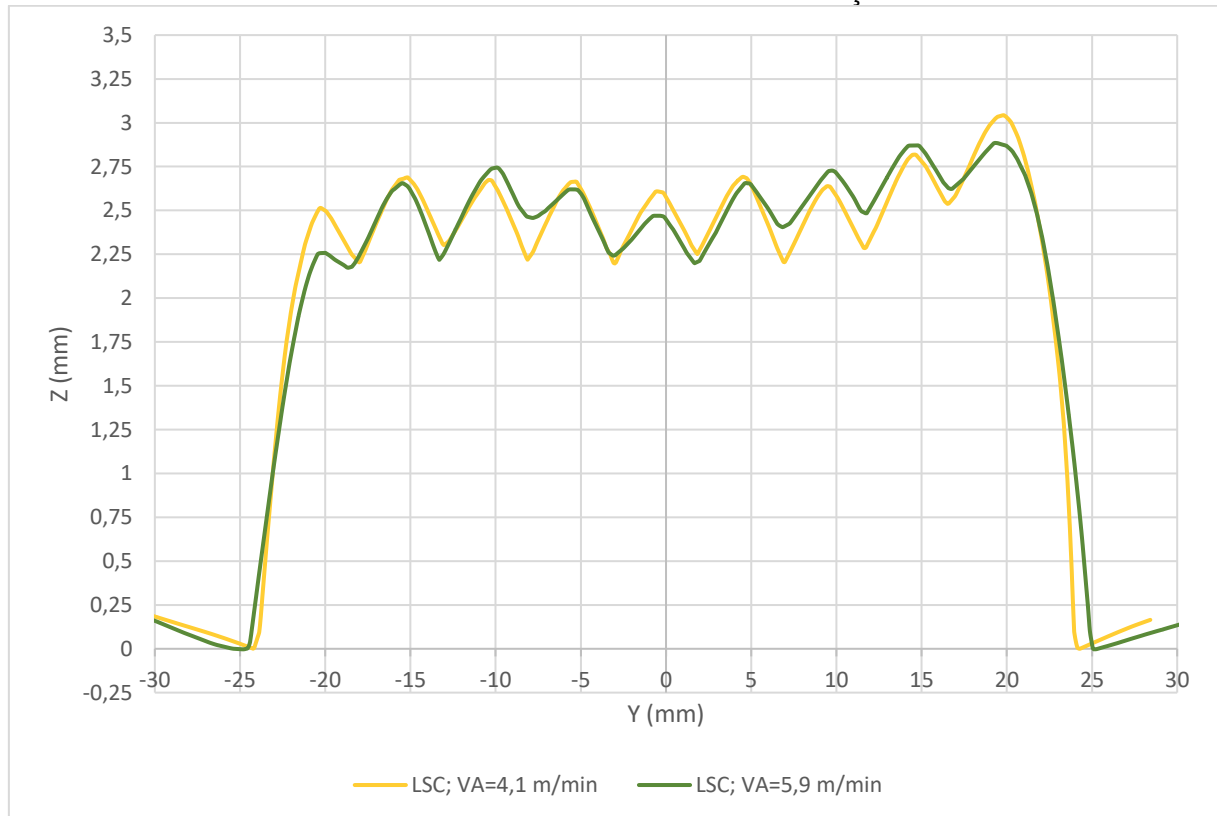
A Figura 37 apresenta os perfis transversais no plano $X = 60 \text{ mm}$, elaborados para diferentes combinações de VA e VS, em relação à distância do plano da chapa. Observa-se que as chapas nos pés dos cordões inicial e final apresentam uma inclinação, evidenciando uma deformação em relação ao plano da chapa ($Z=0$), o que demanda atenção na análise de qualquer dado relacionado ao eixo Z. Entretanto, as amplitudes entre picos e vales da superfície ao longo do eixo Y são mensuradas com menor influência da deformação da chapa, uma vez que a extensão considerada neste

caso é reduzida, cerca de 2,5 mm (metade da distância entre cordões). Essas amplitudes são relevantes, pois podem indicar a quantidade de material que precisaria ser removida por desbaste para nivelar a superfície, dependendo das exigências da aplicação final da peça.

A análise comparativa das superfícies revela, conforme ilustrado na Figura 37, que ambas apresentam padrões similares, embora a superfície correspondente a VA de 4,1 m/min exiba amplitudes de picos e vales ligeiramente superiores e com maior regularidade em comparação àquela obtida com VA de 5,9 m/min. Essa observação é reforçada pelas Figura 38 e Figura 39, que complementam a análise visual das variações de altura ao longo da superfície.

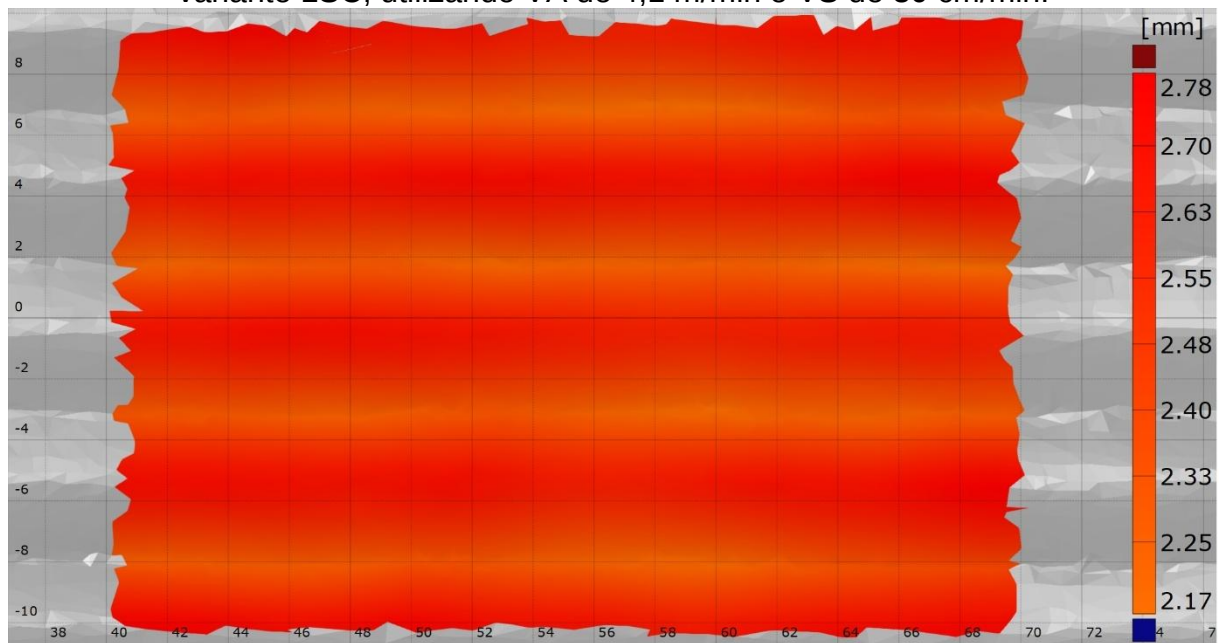
A Tabela 4 e Figura 40 mostram os valores máximos, mínimos, médios e o desvio padrão das alturas das superfícies analisadas. Ressalta-se que esses valores não consideram os efeitos da deformação da chapa, sendo importante ter cautela ao interpretá-los.

Figura 37 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante LSC, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.



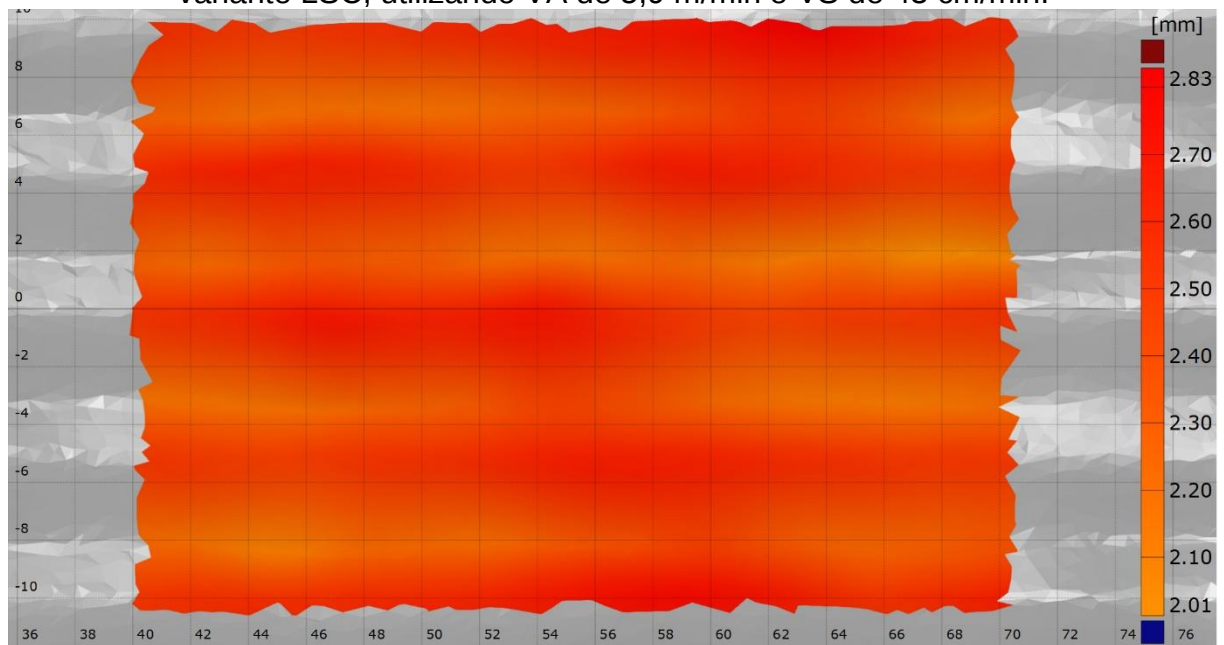
Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.



Fonte: Próprio autor.

Figura 39 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.



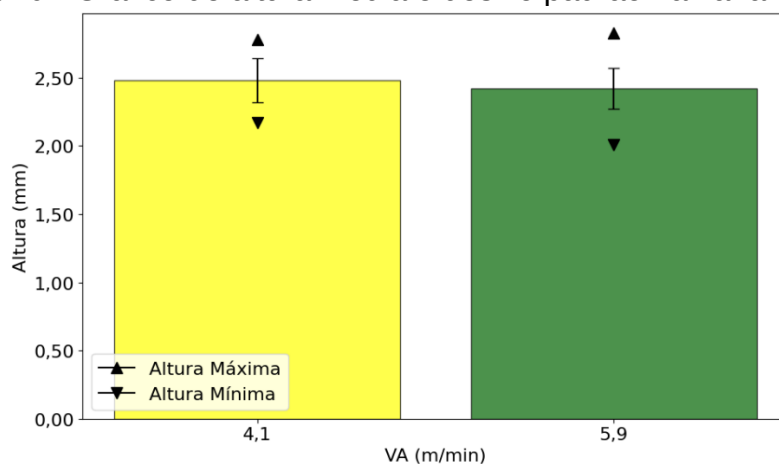
Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante LSC, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.

VA (m/min)	4,1	5,9
Altura Máxima	+2,78	+2,83
Altura Mínima	+2,17	+2,01
Altura Média	+2,48	+2,42
Desvio Padrão da Altura	+0,16	+0,15

Fonte: Próprio autor.

Figura 40 - Gráfico de altura média e desvio padrão na variante LSC.



Fonte: Próprio autor.

O valor da altura média medida, que reflete o aumento de espessura pretendido, apresentou-se ligeiramente inferior ao esperado de 3 mm em ambos os casos, considerando-se uma eficiência estimada do eletrodo de 96%. Essa discrepância pode ser parcialmente atribuída à curvatura da chapa provocada pelos efeitos de deformação térmica, além de uma possível diferença entre a eficiência real do eletrodo e a eficiência previamente estimada. Ainda assim, os valores médios obtidos estão alinhados com a formulação da equação (10).

4.1.2 Standard

Na variante Standard não foram encontradas referências explicando seu princípio de funcionamento, de forma que serão levantadas algumas hipóteses de controle explicadas com auxílio de um ciclo na filmagem em alta velocidade na VA de 4,1 m/min (Figura 41):

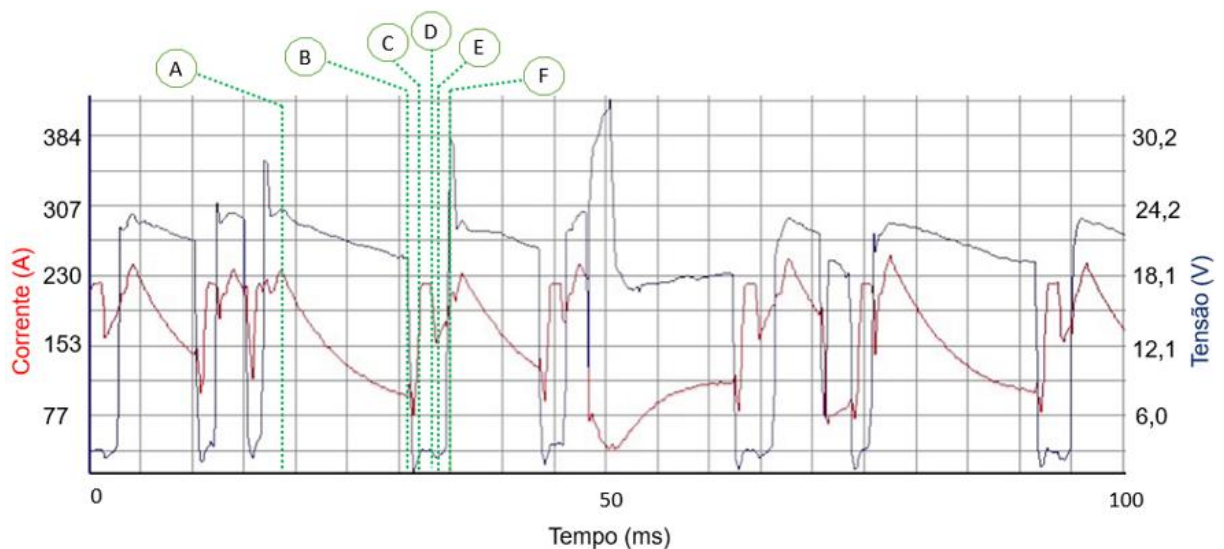
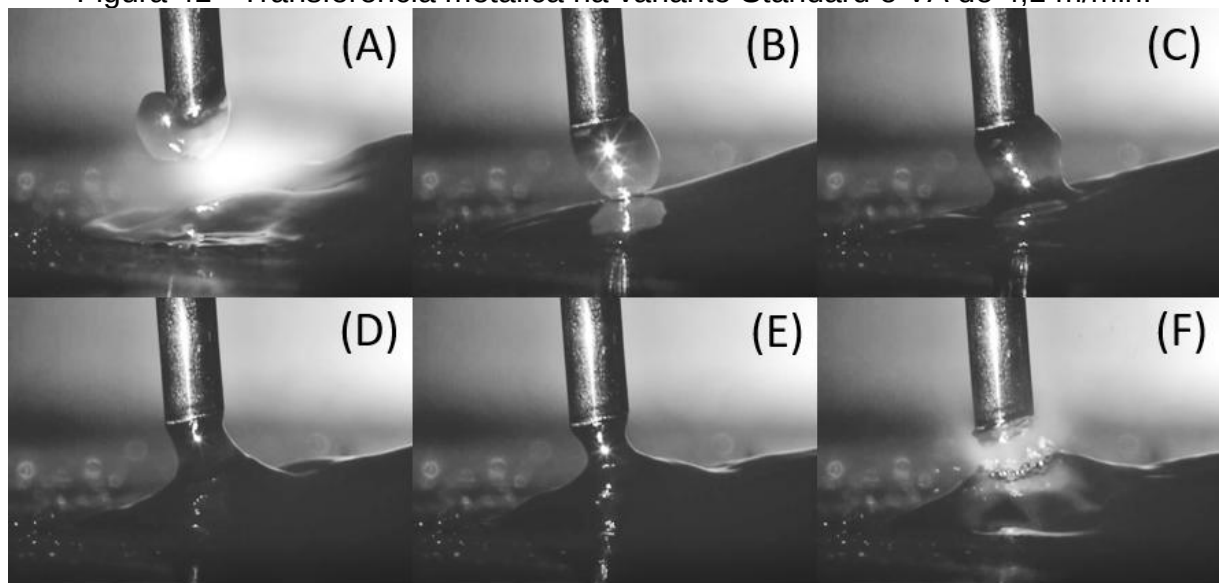
- a) Na fase de arco a I se eleva até um valor máximo e depois diminui. Ressalta-se que esse pico não depende do instante em que ocorre a ruptura da ponte metálica;
- b) De forma similar à variante LSC, ao detectar a brusca queda de U a fonte parece identificar que se iniciou o curto-circuito e diminui a I no início do curto por um pequeno intervalo de tempo visando prevenir a repulsão da gota;
- c) Ainda no curto a I é elevada para um patamar alto, favorecendo o estreitamento da ponte metálica pela força eletromagnética;
- d) Após um tempo predeterminado, a fonte diminui a I ;
- e) A I é diminuída para um valor entre o mencionado em “b” e “d” e volta a subir a uma taxa constante;
- f) Em dado momento a ponte metálica é rompida em um patamar de I intermediário entre o que seria esperado de um processo curto-circuito convencional e um LSC. A I continua a subir seguindo a tendência da derivada de subida de I mencionada em “e” até o patamar de I mencionado em “a”, repetindo o ciclo.

De forma geral, o algoritmo de controle parece reduzir a corrente imediatamente no início do curto-circuito na tentativa de evitar repulsão e instabilidade no assentamento da gota na poça de fusão. Outro ponto é que a ruptura da ponte metálica não ocorre no pico de corrente, diminuindo de alguma forma a geração de respingos decorrentes da força eletromagnética. Por outro lado, o controle de corrente, embora busque prevenir a repulsão no assentamento da gota, não se mostra preciso, uma vez que, em alguns casos, o assentamento é mais suave em comparação à variante convencional, enquanto em outros ocorrem repulsões.

Comparado à variante LSC, a queda de I mencionada na alínea “e” não depende de detecção de aumento de resistência elétrica da ponte metálica, sendo menos propensa a falhas de detecção de variação da U . No entanto este controle resulta em patamares de I superiores ao LSC no estágio do rompimento da ponte. Na VA de 4,1 m/min, foram calculadas as médias de cinco medições da derivada da corrente em função do tempo, tanto durante a queda da corrente até o patamar da alínea “e” quanto na subsequente elevação. O valor médio da derivada durante a descida foi de -95.022,0 A/s, enquanto o da subida foi de 22.622,0 A/s.

De forma geral, foram observadas muitas instabilidades em momentos aleatórios do processo, como repulsão da gota em alguns curtos-circuitos, curtos-circuitos prematuros, rompimento de ponte metálica prematuras sem assentamento adequado do volume da gota. O desvio padrão relativo do período de transferência para a VA de 4,1 m/min foi de 45,6%, um valor alto que é indicativo de alta variação no tamanho de gota. Na VA de 8,3 m/minuto o algoritmo de controle realiza transferência em voo livre, não mais por contato.

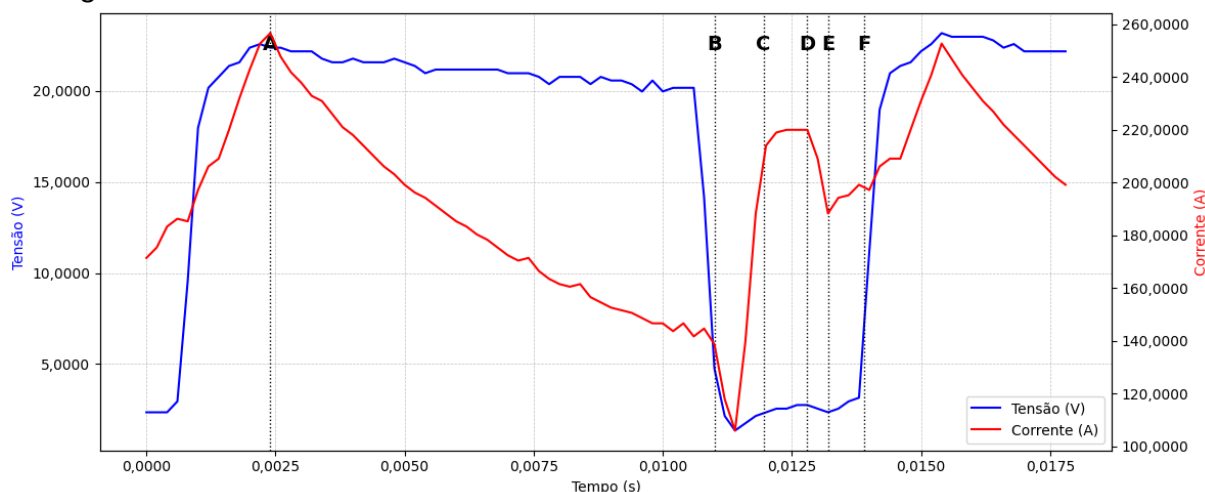
Figura 41 - Transferência metálica na variante Standard e VA de 4,1 m/min.



Fonte: Próprio autor.

Diante da dificuldade em identificar cada etapa da transferência nos oscilogramas do sistema de aquisição da câmera, foi realizado um cordão adicional utilizando os mesmos parâmetros de soldagem. Os sinais elétricos correspondentes estão apresentados na Figura 42, com os instantes previamente descritos devidamente destacados na imagem.

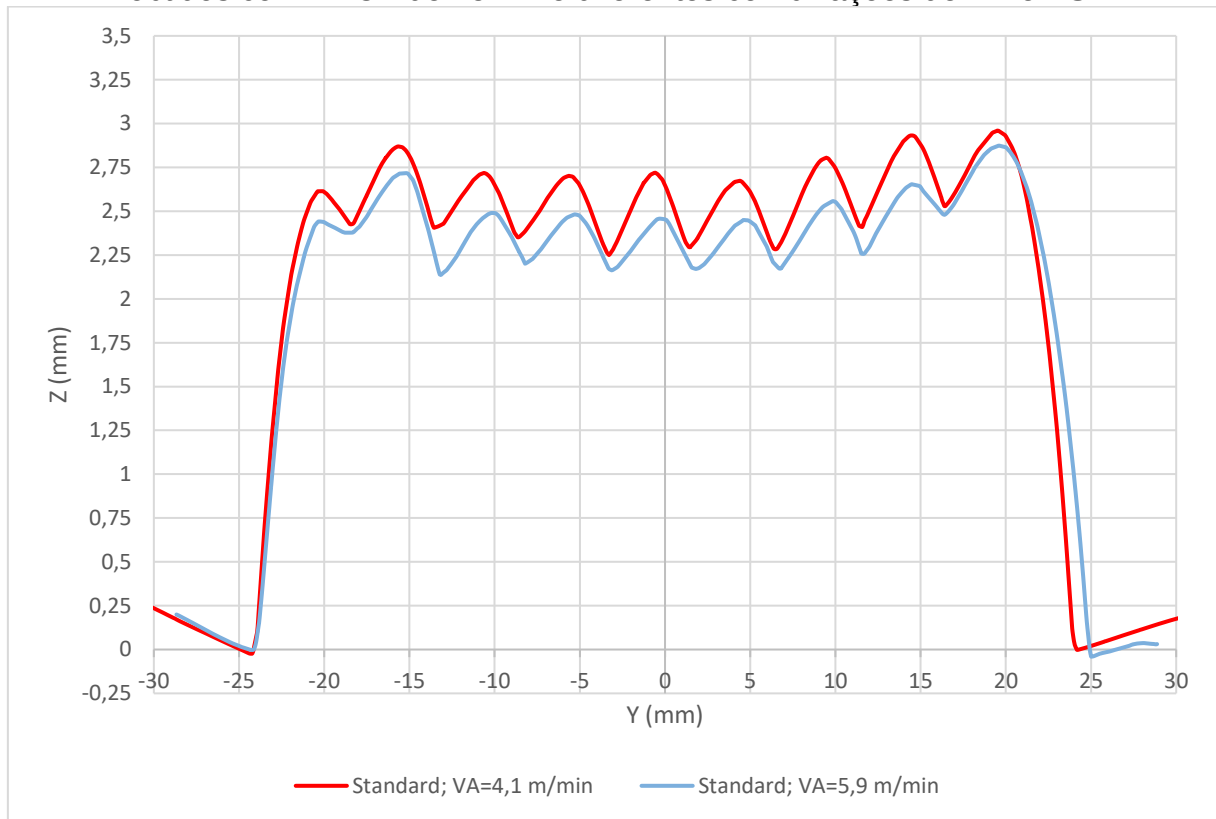
Figura 42 – Ciclo de transferência na variante Standard com VA de 4,1 m/min.



Fonte: Próprio autor.

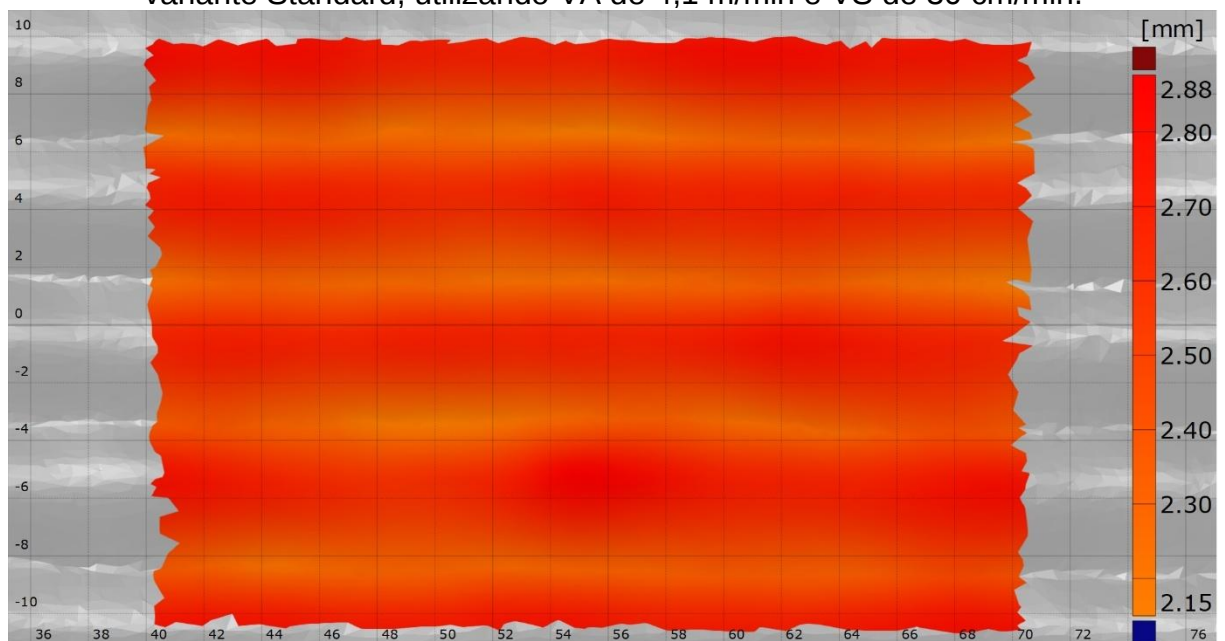
A análise comparativa das superfícies, apresentada na Figura 43, revela que a superfície obtida com VA de 4,1 m/min apresenta um aumento médio de espessura ligeiramente superior em relação àquela gerada com VA de 5,9 m/min. Essa tendência é corroborada pela Figura 44, Figura 45 e Tabela 5. Considera-se que o principal fator para essa diferença seja a maior quantidade de respingos observada na condição de VA de 5,9 m/min, o que pode ter impactado negativamente a eficiência de deposição do material.

Figura 43 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante Standard, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.



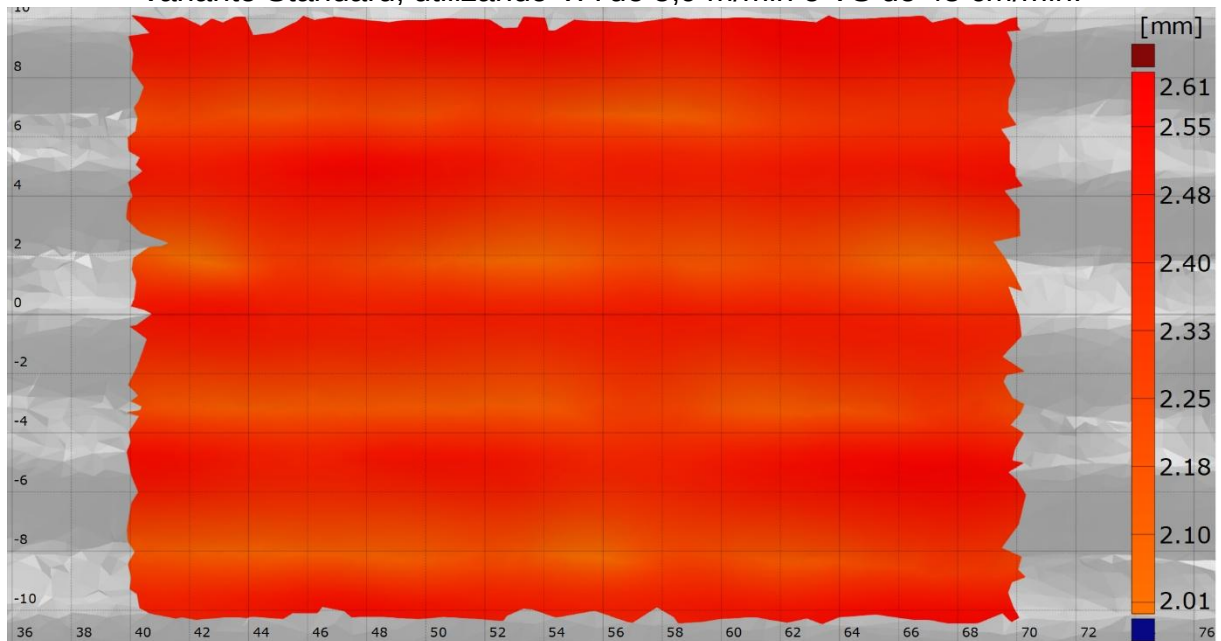
Fonte: Próprio autor.

Figura 44 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Standard, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.



Fonte: Próprio autor.

Figura 45 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Standard, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.



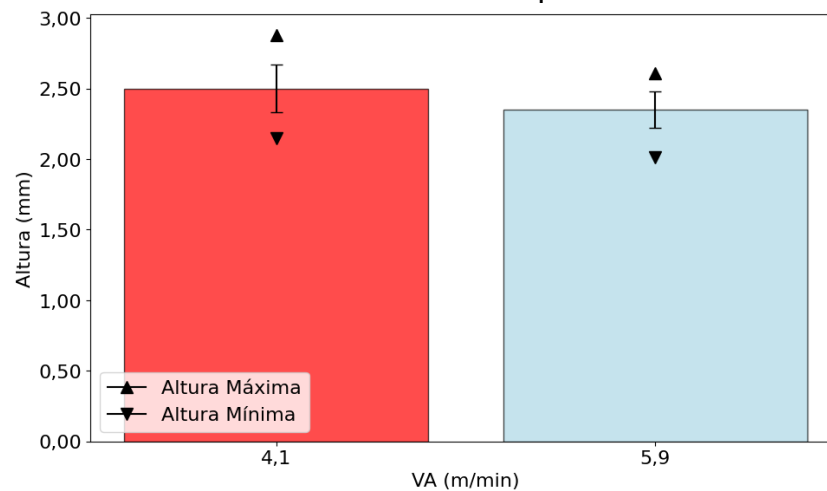
Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante Standard, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.

VA (m/min)	4,1	5,9
Altura Máxima	+2,88	+2,61
Altura Mínima	+2,15	+2,01
Altura Média	+2,50	+2,35
Desvio Padrão da Altura	+0,17	+0,13

Fonte: Próprio autor.

Figura 46 - Gráfico de altura média e desvio padrão na variante Standard.



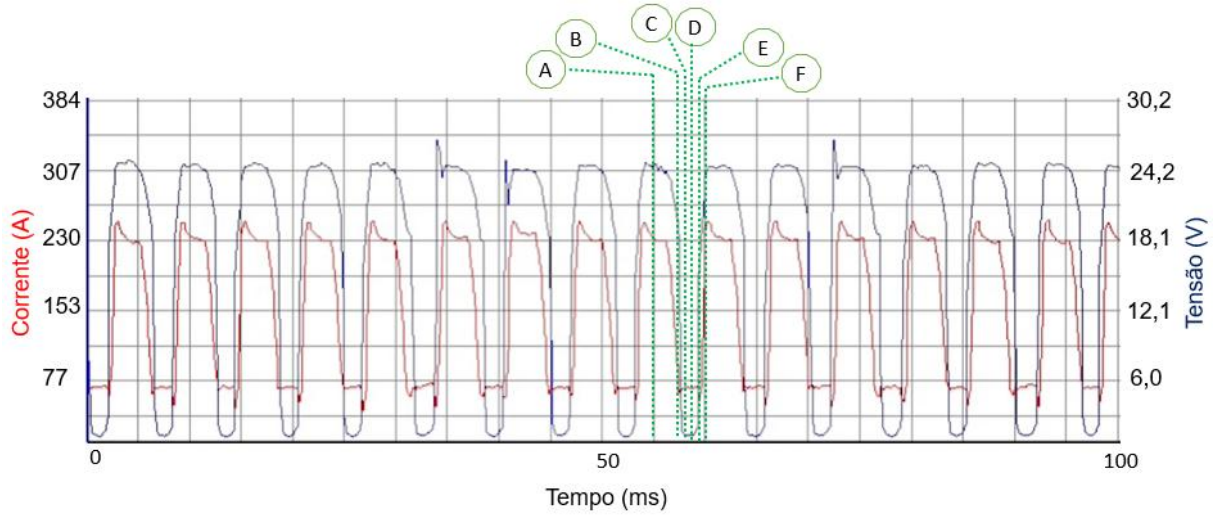
Fonte: Próprio autor.

4.1.3 CMT

A partir da análise de filmagens em alta velocidade, selecionou-se um ciclo aleatório da transferência metálica CMT para uma VA de 4,3 m/min, conforme os seis quadros apresentados Figura 47 e Figura 48. Esses quadros ilustram os principais eventos do ciclo de transferência:

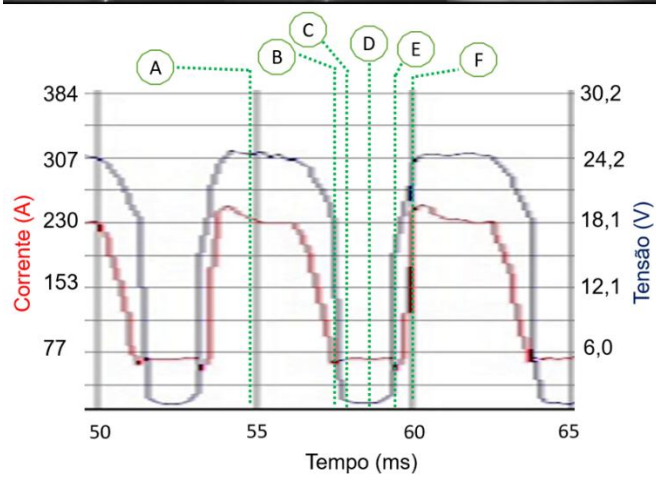
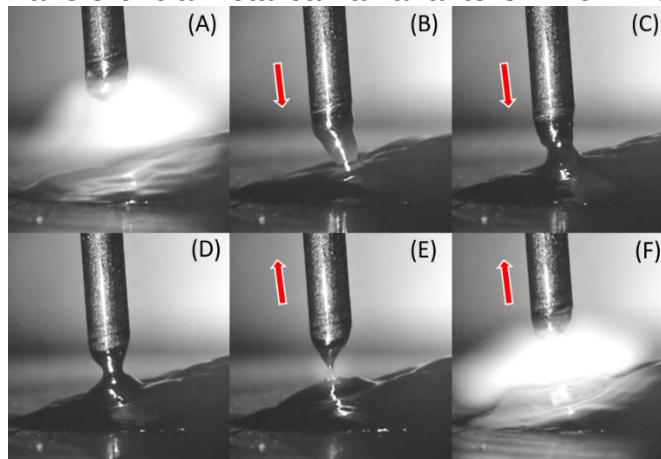
- a) Inicialmente, o arame encontra-se com arco aberto e inverte o sentido de sua VA, passando de recuo para avanço em direção à poça de fusão. Nesse momento, a corrente (I) mantém-se em um patamar elevado durante um intervalo de tempo, reduzindo-se posteriormente para valores na faixa de aproximadamente 60 A;
- b) Quando a gota fundida no arame entra em curto-circuito com a poça de fusão, a I situa-se em um patamar baixo e é mantida por um curto período para evitar a repulsão da gota caso a I estivesse em níveis elevados;
- c) Após o correto assentamento da gota na poça, a I é elevada até um determinado valor específico, sendo que, para VA de 4,3 m/min, esse patamar é ligeiramente superior aos 60 A mencionados em “a”. Entretanto, para VA superiores, este patamar também se eleva (ver Apêndice A);
- d) Durante o curto-circuito, a VA inverte novamente o sentido de alimentação do arame, retornando ao recuo;
- e) Em um patamar de I semelhante ao descrito em “b”, a ponte metálica é rompida de forma suave, sem respingos, essencialmente devido ao recuo do arame;
- f) Imediatamente após o rompimento da ponte metálica, o arco é restabelecido em altos patamares de I de reabertura, reiniciando o processo.

Figura 47 - Oscilograma de corrente e tensão na variante CMT para VA de 4,3 m/min.



Fonte: Próprio autor.

Figura 48 - Transferência metálica na variante CMT e VA de 4,3 m/min.



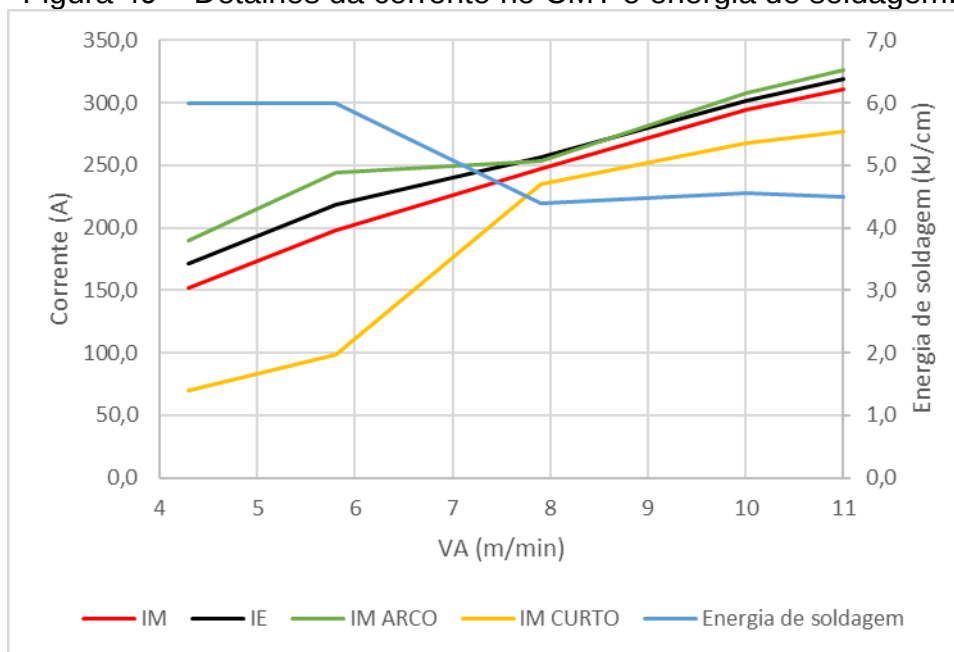
Fonte: Próprio autor.

Ao contrário das variantes LSC e Standard, o CMT, mesmo sob altas velocidades de arame e correntes médias acima da faixa de transição (250 a 270 A), mantém a transferência metálica por contato.

A VA média medida difere daquela ajustada na fonte. Acredita-se que esta diferença decorra da utilização da velocidade instantânea do arame como um dos principais recursos de controle externo para a transferência metálica na variante CMT. Em síntese, a VA instantânea varia em função do monitoramento dos curtos por meio das tensões e de suas derivadas. Assim, ajustou-se com uma correção a VA na fonte buscando uma VA média medida próxima das condições estabelecidas no item 3.6.

Observa-se pela Figura 49 que a IM no curto-circuito aumenta substancialmente de uma VA de 5,8 para 7,9 m/min, enquanto a IM de arco permanece praticamente inalterada. Uma hipótese para tal aumento seria a intenção de facilitar o destacamento da gota por efeito *pinch*, em função do maior volume da gota. Por outro lado, em baixas correntes de curto-circuito, o destacamento ocorreria predominantemente por efeito da tensão superficial.

Figura 49 – Detalhes da corrente no CMT e energia de soldagem.



Fonte: Próprio autor.

Embora os comportamentos individuais da IM no arco e da IM no curto-circuito apresentem não linearidades em relação à VA (conforme ilustrado no gráfico IM $\times$ VA), a IM global – calculada como a média ponderada entre IM no

arco e IM no curto, considerando os tempos de arco e de curto – exibe uma relação aproximadamente linear com a VA. Essa linearidade permite a simplificação da equação (8) para $VA=k \cdot IM$, onde k é uma constante, facilitando estimativas iniciais na parametrização do processo.

É fundamental destacar que, mesmo utilizando o mesmo arame e gás de proteção, cada variante apresenta uma reta distinta no gráfico $VA \times IM$. Essa diferença decorre das características intrínsecas de cada variante, como:

- a) Tempo de curto-circuito e tempo de arco específicos;
- b) Discrepâncias entre IE (corrente eficaz) e IM (corrente média);
- c) Dinâmicas de transferência metálica (ex.: frequência de destacamento, volume da gota). O autor propõe a hipótese de que gotas de maior volume tendem a reduzir o consumo de arame, possivelmente devido ao superaquecimento da gota durante a transferência. Esse fenômeno favoreceria a geração de vapor metálico (perdas por evaporação) em detrimento da taxa de fusão efetiva do arame.

Esses fatores ajustam-se aos princípios físicos de consumo de arame descritos na Equação (8) e detalhados no Item 2.3. Uma discussão mais aprofundada sobre essa variabilidade entre processos será apresentada no item 4.1.5.

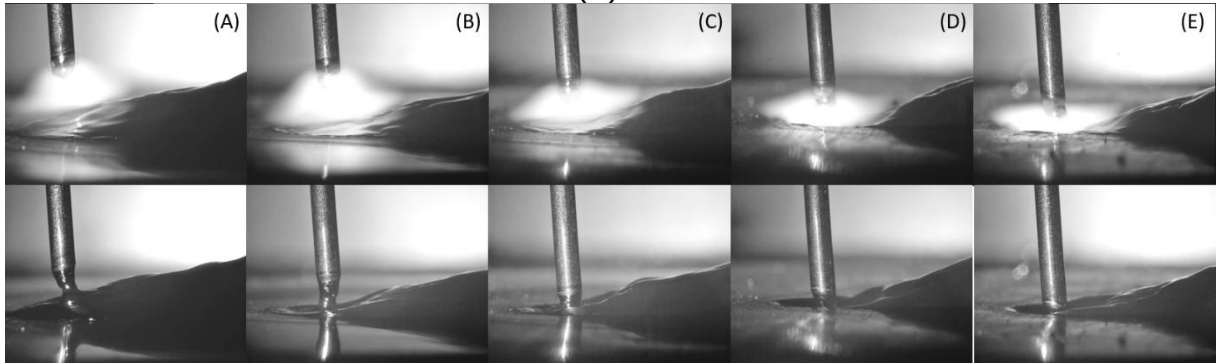
A frequência média de destacamento aproxima-se de 150 Hz para as diferentes VA médias, valor viabilizado pela capacidade do motor de alimentação de arame na tocha inverter os sentidos de velocidade de forma rápida (Figura 50). Como a frequência varia pouco, independente da VA ajustada, o volume de gota aumenta proporcionalmente com o incremento da VA. Tanto o tempo de curto-circuito quanto o tempo de arco praticamente não se alteram (Tabela 6).

Tabela 6 – Dados no período de curto e de arco no CMT.

VA média medida (m/min)	Média de tempo de curto (ms)	IM de curto-circuito (A)	Média de tempo de arco (ms)	IM de arco (A)	IM (A)
4,3	2,1	69,4	4,6	189,6	151,8
5,8	2,2	98,8	4,7	244,1	198,1
7,9	2,6	234,4	4,8	253,8	247,0
10,0	2,2	267,7	4,6	307,3	294,6
11,0	1,9	276,5	4,4	326,3	311,1

Fonte: Próprio autor.

Figura 50 - Instantes com VA nula e reversão do sentido da VA, Linha superior é o instante que o arame para de retroceder e começa a avançar para a poça, e a linha inferior é o inverso. VA média: (A) 4,3 m/min, (B) 5,8 m/min, (C) 7,9 m/min, (D) 10,0 m/min e (E) 11 m/min.



Fonte: Próprio autor.

Quando as velocidades atingem 10,0 e 11,0 m/min, a pressão do arco torna-se suficientemente elevada, causando a formação de uma pequena cratera na poça, de forma que o contato da gota com a poça ocorre abaixo da superfície plana inicial da chapa.

Para o cálculo do índice de acertos da transferência metálica no CMT foram consideradas algumas simplificações:

- a) Não houve medição da VA instantânea no motor da tocha de soldagem, analisando-se apenas as filmagens em alta frequência (aquisição de 100 ms). Observou-se que as velocidades do arame se invertem nos momentos esperados em todos os ciclos filmados, pressupondo-se que o motor de alimentação da tocha não falha no movimento de inversão de sentido;
- b) Para a contabilização dos acertos, é necessário que a U suba do curto para o arco em um patamar de I inferior à I média na fase de curto e também inferior à I média da fase de arco do ciclo subsequente. De forma prática, a U sobe em patamares baixos de I .

A Tabela 7 apresenta os limites inferiores e superiores do índice de acertos.

Tabela 7 – Intervalo de confiança do índice de acertos na variante CMT.

VS (cm/min)	VA média (m/min)	Ciclos bem- sucedidos (k)	Total de ciclos (n)	Fração amostral de acertos - $\hat{p}$ (%)	Limite inferior (%)	Limite superior (%)	Crítérios
30	4,3	30	30	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$
43	5,8	30	30	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$
60	7,9	30	30	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$
75	10	30	30	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$
80	11	30	30	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$

Fonte: Próprio autor.

Os critérios falham porque a fração amostral de acertos é igual a 100% em todos os casos. Portanto, os limites dos intervalos de confiança não são confiáveis a partir dessa abordagem, embora a fração amostral de acertos ofereça uma indicação razoável da média, evidenciando um alto índice de acertos.

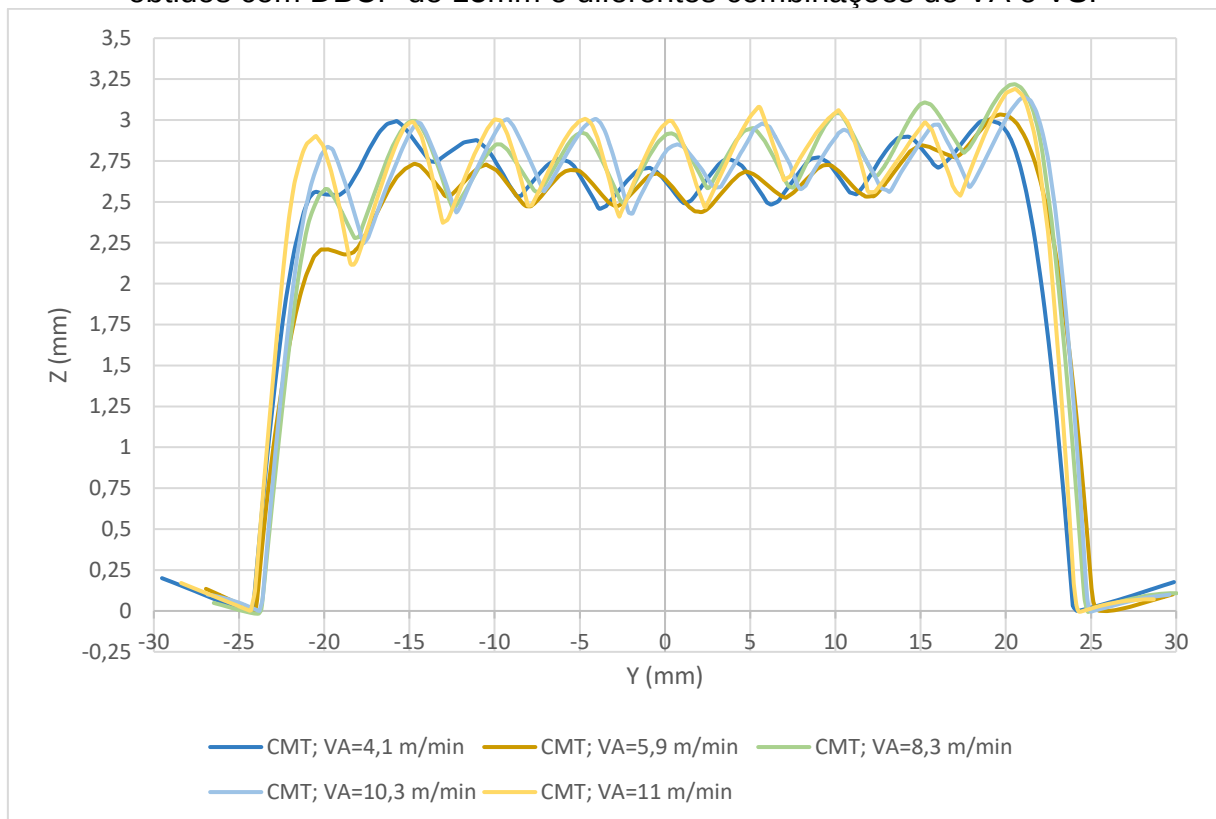
Importante destacar que mesmo não realizando nenhum ajuste fino dos parâmetros "correção do comprimento do arco" e "correção dinâmica" da forma de onda de corrente, o controle da transferência metálica se deu de forma bastante satisfatória por todas as condições de VA.

A análise comparativa das superfícies, conforme ilustrado na Figura 51, demonstra que o aumento da VA resulta em uma tendência de ampliação das amplitudes entre picos e vales. Essa observação é reforçada pelos mapas de calor das distâncias apresentados entre a Figura 52 e Figura 56, que complementam a análise visual das variações de altura ao longo da superfície. As superfícies analisadas mostraram-se altamente regulares, o que indica uma deposição uniforme do material mesmo em elevadas combinações de VA e VS.

Em decorrência da menor incidência de respingos no processo CMT, acredita-se que há uma maior eficiência de eletrodo em comparação com as variantes LSC e Standard.

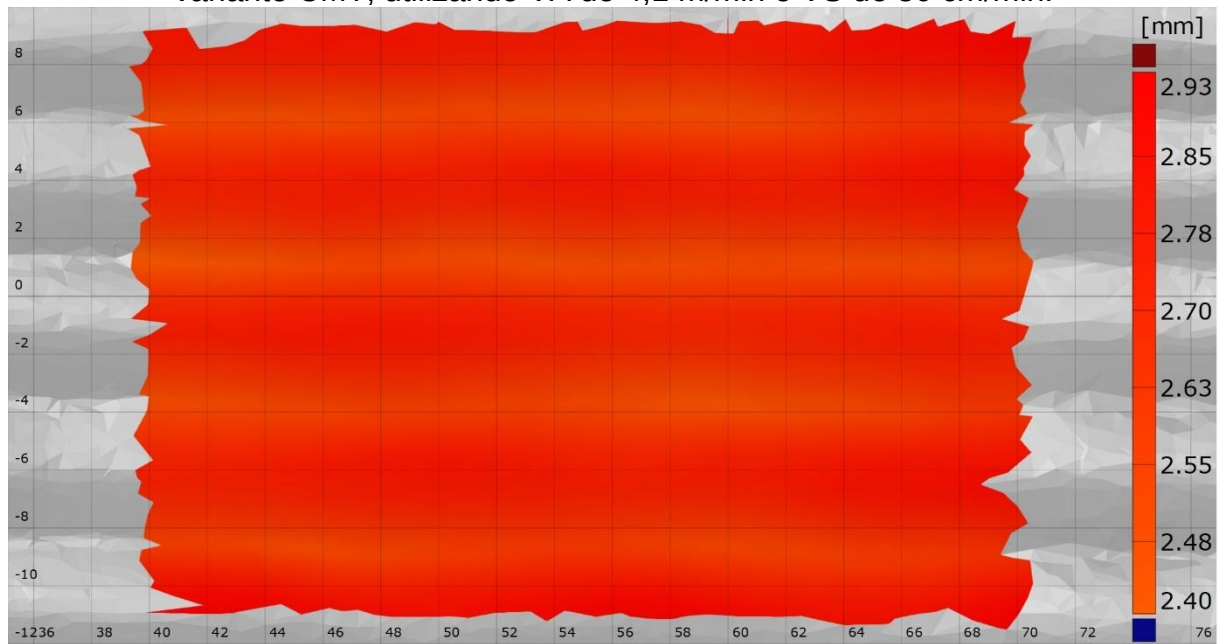
A Tabela 8 e Figura 57 apresentam os valores máximos, mínimos, médios e o desvio padrão das alturas das superfícies analisadas. Destaca-se que esses valores não levam em consideração os efeitos da deformação da chapa, sendo necessário interpretar os dados com cautela. As VA média medidas em cada cordão no CMT podem variar sutilmente conforme já comentado.

Figura 51 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante CMT, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.



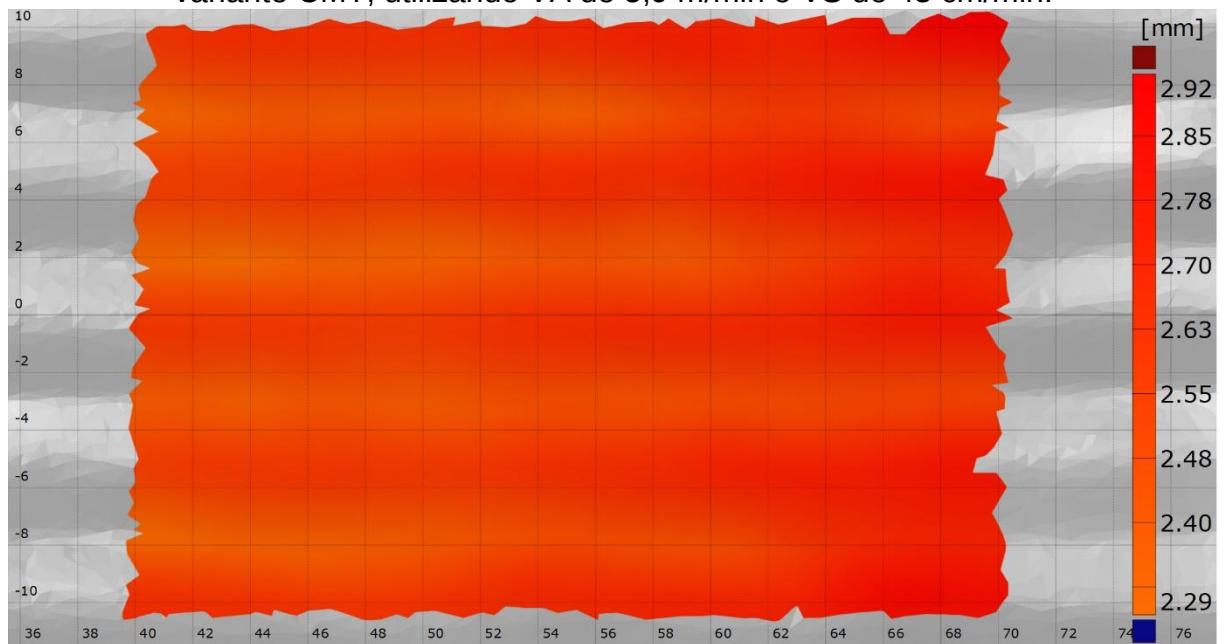
Fonte: Próprio autor.

Figura 52 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.



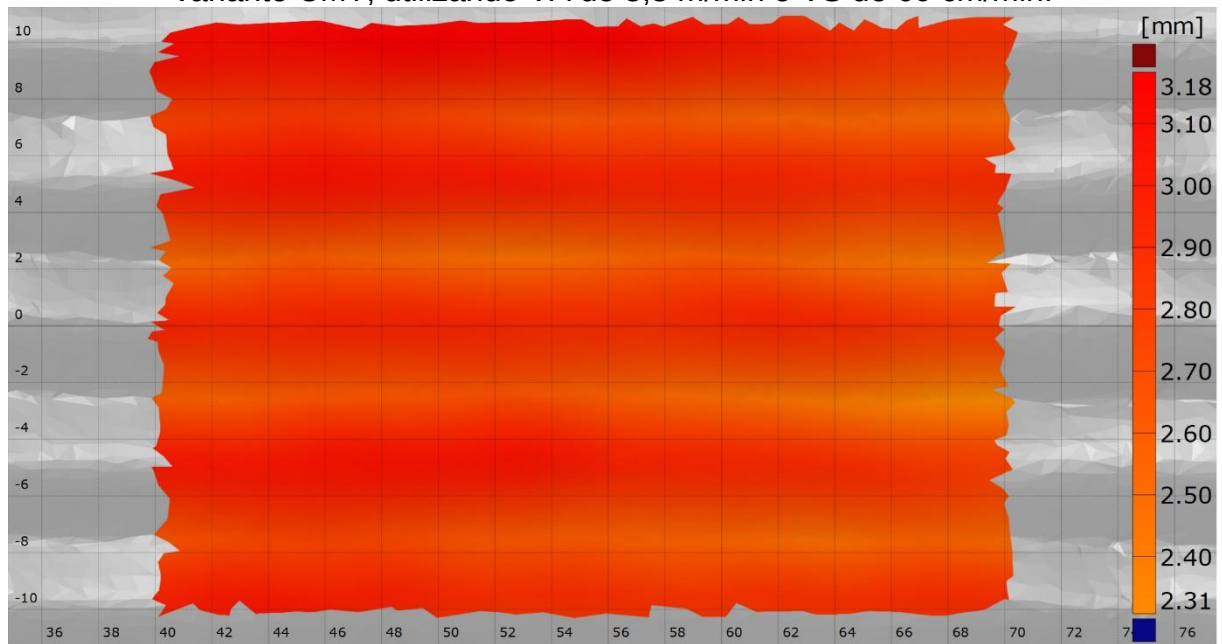
Fonte: Próprio autor.

Figura 53 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.



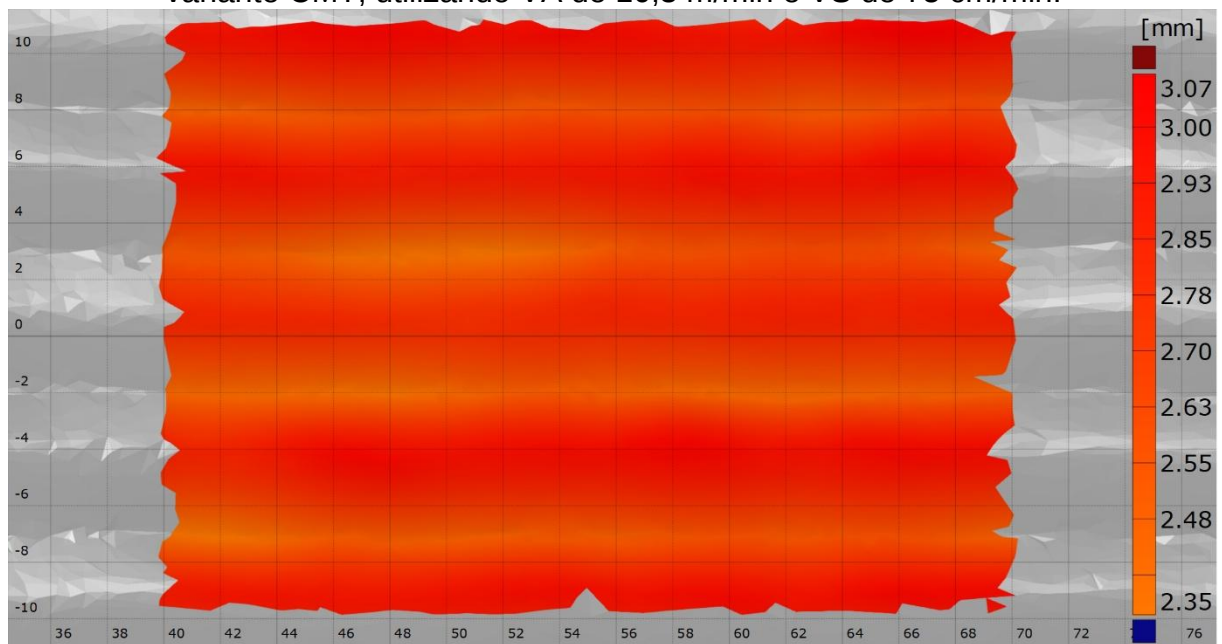
Fonte: Próprio autor.

Figura 54 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.



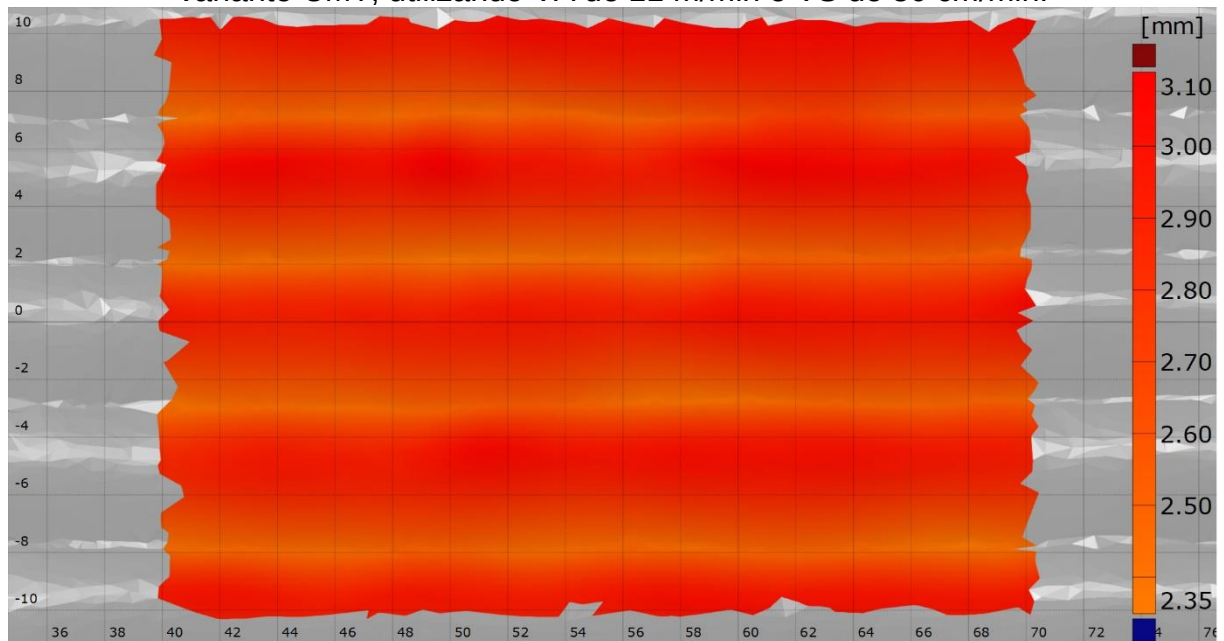
Fonte: Próprio autor.

Figura 55 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.



Fonte: Próprio autor.

Figura 56 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, utilizando VA de 11 m/min e VS de 80 cm/min.



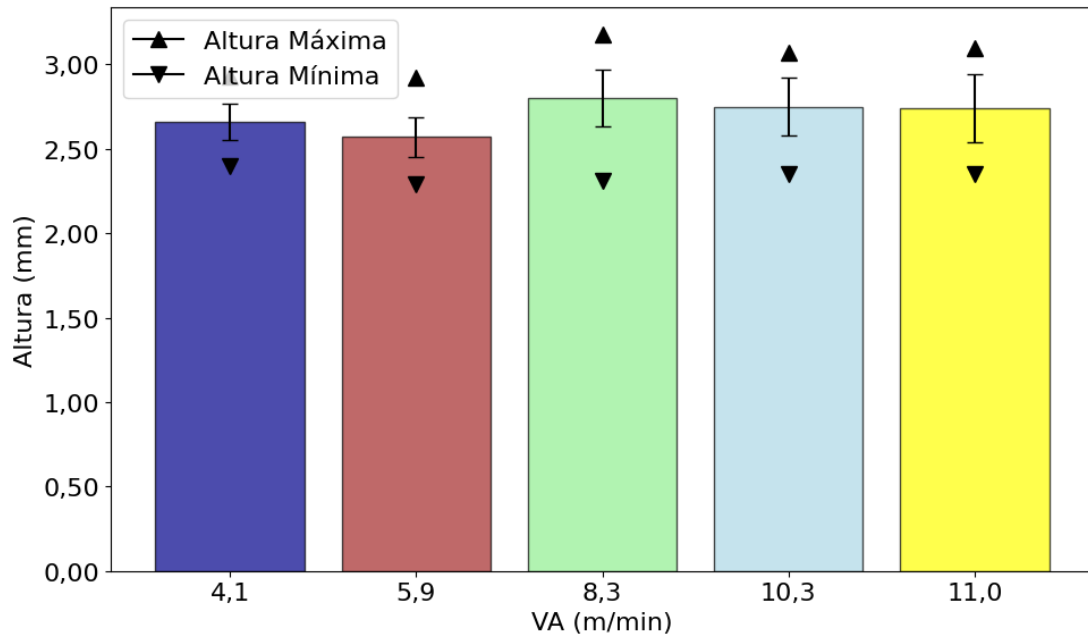
Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante CMT, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.

VA (m/min)	4,1	5,9	8,3	10,3	11,0
Altura Máxima	+2,93	+2,92	+3,18	+3,07	+3,10
Altura Mínima	+2,40	+2,29	+2,31	+2,35	+2,35
Altura Média	+2,66	+2,57	+2,80	+2,75	+2,74
Desvio Padrão da Altura	+0,11	+0,12	+0,17	+0,17	+0,20

Fonte: Próprio autor.

Figura 57 – Gráfico de altura média e desvio padrão na variante CMT.



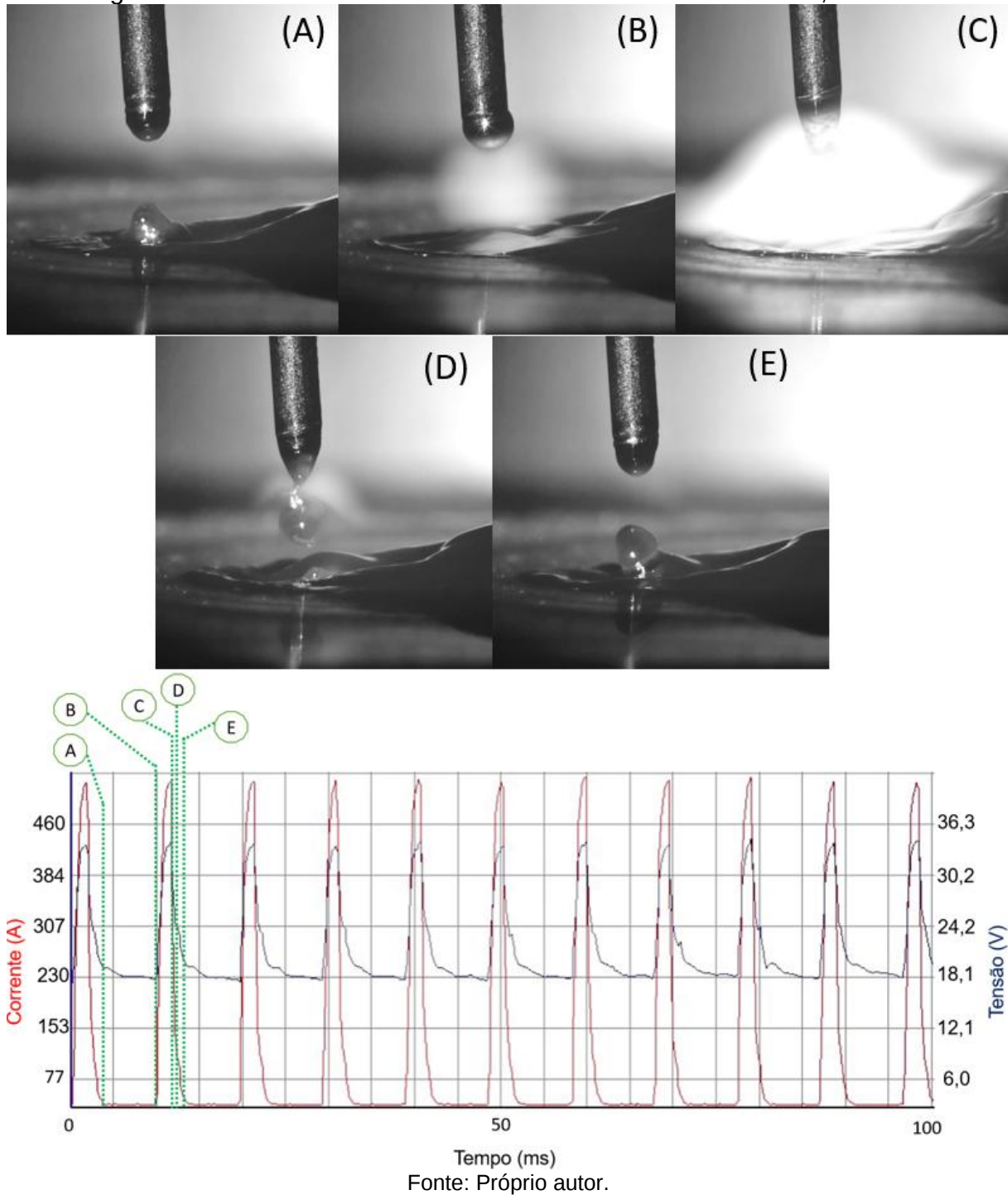
Fonte: Próprio autor.

4.1.4 PMC

Com base em filmagens em alta velocidade, selecionou-se um ciclo aleatório da transferência metálica PMC para uma VA de 4,1 m/min. Os cinco quadros apresentados na Figura 58 destacam o comportamento da transferência:

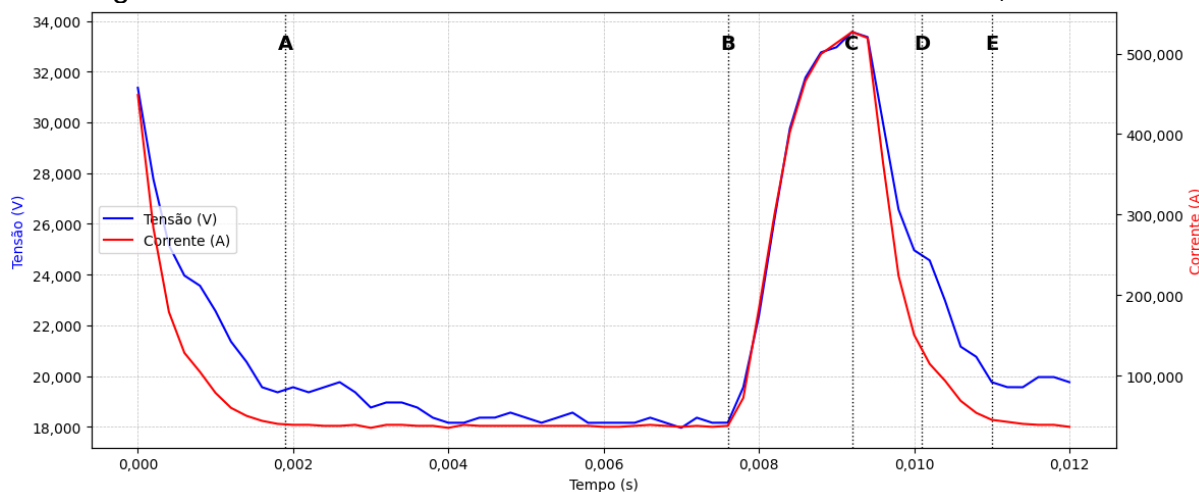
- Após o destacamento da gota, a I é mantida na IB igual a 38 A, valor bastante inferior à corrente de transição (250 a 270 A);
- Há um aumento expressivo da I no início da fase de pulso;
- I atinge seu valor máximo durante o pulso;
- O destacamento da gota ocorre em um patamar de I entre a I máxima no pulso e a IB, em torno de 120 A;
- Momento em que a gota atinge a poça de fusão.

Figura 58 - Transferência metálica na variante PMC e VA de 4,1 m/min.



Diante da dificuldade em identificar cada etapa da transferência nos oscilogramas do sistema de aquisição da câmera, foi realizado um cordão adicional utilizando os mesmos parâmetros de soldagem. Os sinais elétricos correspondentes estão apresentados na Figura 59, com os instantes previamente descritos devidamente destacados na imagem.

Figura 59 - Ciclo de transferência na variante PMC com VA de 4,1 m/min.



Fonte: Próprio autor.

Nas condições explicadas na metodologia, o PMC apresentou correntes de pulso significativamente superior à IB, chegando a valores até 14 vezes maiores. Consequentemente, as correntes eficazes (IE) tornaram-se substancialmente mais elevadas, atingindo um valor 62% maior que a IM para a VA de 4,1 m/min. Considerando um comprimento de eletrodo de 13 mm (valor estimado pelas filmagens), um comprimento de arco de 2 mm e utilizando os valores de alfa e beta mencionados no item 2.3 na equação (8), e aplicando os valores medidos de IM e IE às VA analisadas, obteve-se os valores apresentados em Tabela 9.

Tabela 9 – Tabela comparativa do consumo de arame.

VA medida (m/min)	IM (A)	IE (A)	Alfa x IM (mm/s)	Beta x L x IE ² (mm/s)	VA equação (m/min)	VA, IM=IE (m/min)
4,1	121,1	196,5	2,2	1,8	4,0	2,9
6,2	163,9	238,3	3,0	2,6	5,6	4,2
8,3	213,9	283,5	3,9	3,7	7,5	6,0
10,4	261,4	321,5	4,7	4,8	9,5	7,8
12,5	314,7	356,9	5,7	5,9	11,5	10,2
14,6	362,0	392,0	6,5	7,1	13,6	12,5

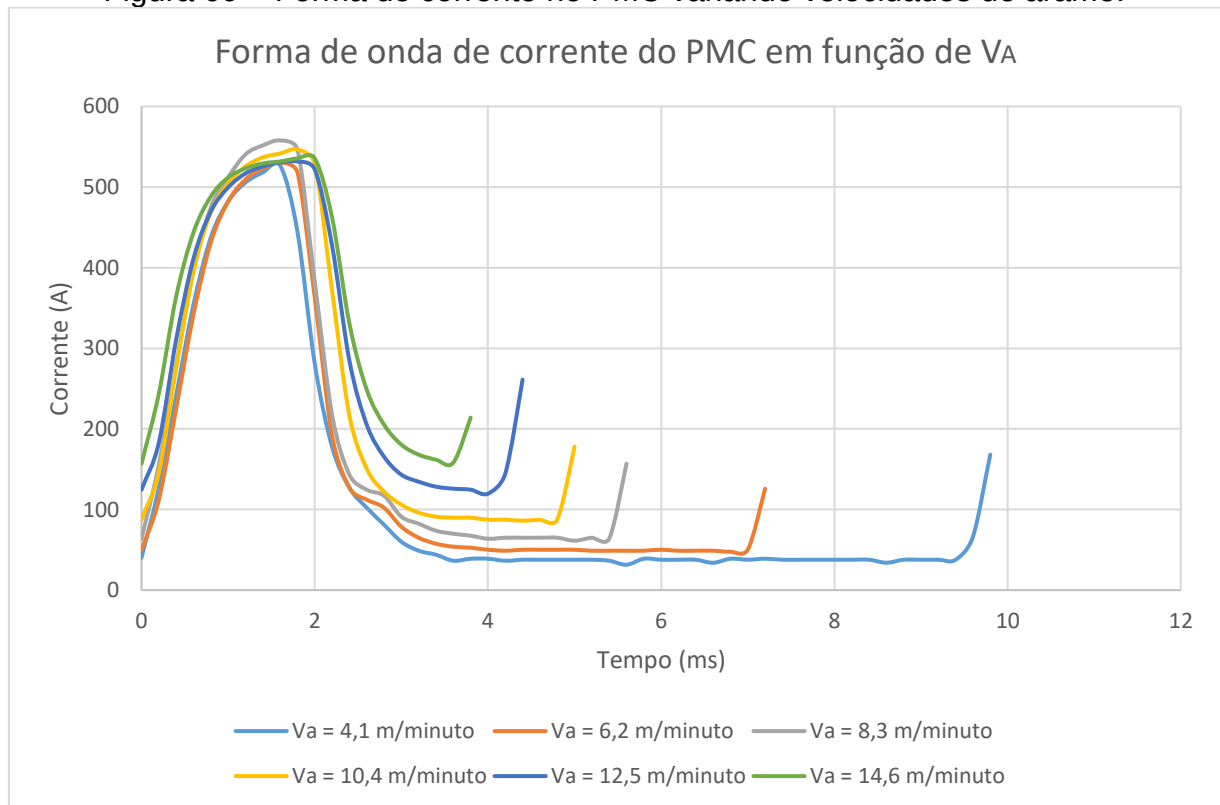
Fonte: Próprio autor.

Ao analisar a parcela do consumo de arame devido ao efeito Joule, verifica-se que este exerce uma contribuição relevante quando comparada à parcela da zona anódica. Caso se compare a VA analisada a uma hipotética transferência com

corrente constante ($IE = IM$), por exemplo, spray, para uma mesma IM o consumo de arame seria superior no caso do PMC. Esse aspecto deve ser considerado ao se desejar aumentar a taxa de deposição para uma mesma IM, pois quanto maior a IE maior é a VA, mantendo o mesmo comprimento de arco.

Conforme ilustrado na Figura 60, ao incrementar a VA, o algoritmo de controle do PMC atua principalmente aumentando o tempo de pulso, elevando a IB e reduzindo (de forma mais acentuada) o tempo de base. Essas três alterações contribuem para um acréscimo na IM e IE, equilibrando o consumo de arame com a VA desejada. A corrente máxima no pulso é mantida aproximadamente constante em todas as VA testadas. O período diminui significativamente e, assim, sua frequência de destacamento aumenta, atingindo o valor máximo em 270 Hz para a VA de 14,6 m/min.

Figura 60 – Forma de corrente no PMC variando velocidades de arame.



Fonte: Próprio autor.

A U média eleva-se diretamente correlacionada com a VA, mantendo o comprimento de arco aproximadamente constante e curto.

Os instantes de destacamento de gota na condição UGPP foram verificados por filmagem em alta frequência. Conforme Figura 61 e Figura 62, observa-se o

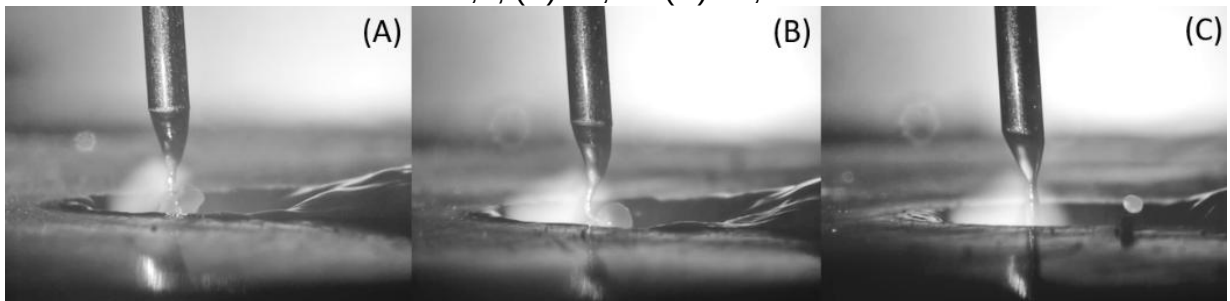
comportamento do destacamento da gota para diferentes VA. Quanto mais elevada a VA, maior a dificuldade de destacamento, tendendo ao alongamento do metal fundido na ponta do eletrodo pela escalada do arco no arame (Scotti; Ponomarev, 2014). Para VA acima de 10 m/min, o destacamento ocorre com volumes de metal em formatos que se afastam do formato esférico, porém diferenciando-se de uma transferência goticular com alongamento convencional.

Figura 61 – Variantes PMC nos instantes de destacamento da gota. VA (m/min): (A) 4,1; (B) 5,9 e (C) 8,3.



Fonte: Próprio autor.

Figura 62 – Variantes PMC nos instantes de destacamento da gota. VA (m/min): (A) 10,3; (B) 12,5 e (C) 14,5.



Fonte: Próprio autor.

O índice de acertos para o PMC foi avaliado considerando algumas simplificações:

- a) Analisando-se apenas as filmagens em alta frequência (aquisição de 100 ms), observou-se que, em todos os ciclos avaliados, a condição UGPP foi atendida, mesmo que, em alguns casos, fossem formadas gotas secundárias. De maneira simplificada e generalizada, assumiu-se que o PMC não apresenta falhas no destacamento em UGPP;
- b) Para a contabilização dos acertos, consideraram-se somente os ciclos nos quais não houve ocorrência de curto-circuito. Estes curtos foram

identificados com base no número de quedas de tensão registradas nos oscilogramas de tensão. O número total de ciclos foi estimado pelo número total de picos de corrente superiores ao limiar de corrente de 300 A. Foram excluídos da análise os segundos iniciais e o último segundo do processo de soldagem, a fim de minimizar os efeitos transitórios.

A Tabela 10 apresenta os limites inferiores e superiores do índice de acertos.

Tabela 10 – Intervalo de confiança do índice de acertos no PMC.

VS (cm/min)	VA média (m/min)	Ciclos bem- sucedidos (k)	Total de ciclos (n)	Fração amostral de acertos- $\hat{p}$ (%)	Limite inferior (%)	Limite superior (%)	Critérios
30	4,1	2092	2092	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge})$ <5
45	6,2	1899	1903	99,79%	99,58%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge})$ <5
60	8,3	1856	1856	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge})$ <5
75	10,3	1474	1474	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge})$ <5
90	12,5	1352	1352	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge})$ <5
105	14,5	1230	1230	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge})$ <5

Fonte: Próprio autor.

Os critérios falham porque a fração amostral de acertos são iguais ou muito próximas de 100%. Portanto, o intervalo de confiança não é confiável a partir dessa abordagem, embora a fração amostral de acertos ofereça uma indicação razoável da média, indicando alto índice de acertos.

É relevante destacar que o PMC dispõe de um recurso denominado “estabilizador de comprimento do arco”, que permite uma ampla faixa de ajustes. No estudo, optou-se pelo padrão "auto", no qual o comprimento do arco é controlado automaticamente. Esse recurso busca manter constante a VA selecionada, enquanto

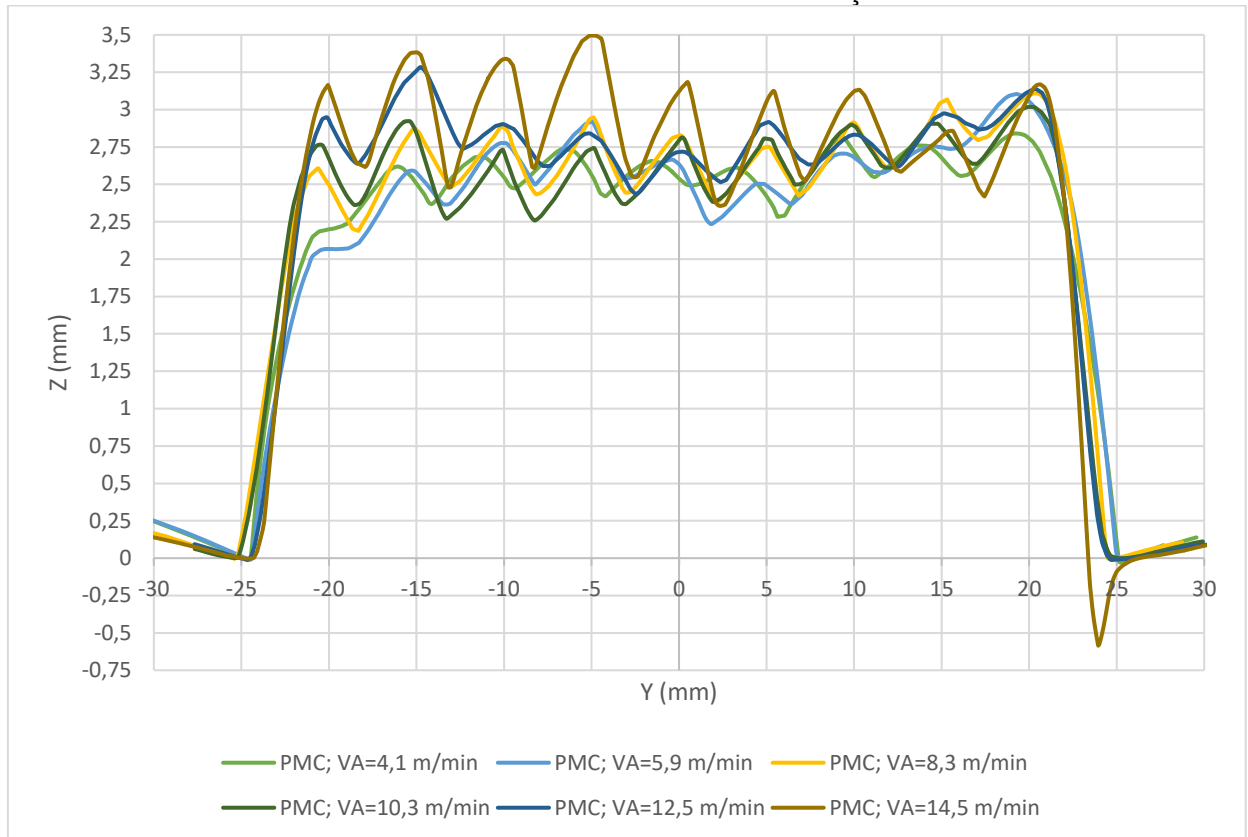
varia a U média para alterar o comprimento do arco. Como consequência, a forma de onda da corrente também sofre alterações em função dessa variação de U . A modificação do comprimento do arco impacta diretamente a forma como o arco aquece a peça, incidência de curtos-circuitos acidentais, e pode influenciar a estabilidade do processo. Outro recurso disponível no PMC é o "Correção de Pulso", que ajusta a forma de onda da corrente. No estudo, manteve-se o padrão zero, dentro de uma faixa de seleção de -10 a 10. Esses recursos não foram objeto de análise no presente trabalho, sendo utilizadas as configurações padrão fornecidas pelo equipamento. A investigação mais aprofundada sobre esses ajustes e suas influências nos demais parâmetros ficam como sugestão para estudos futuros.

A Figura 63 apresenta os perfis transversais obtidas para diferentes combinações de VA e VS. Observa-se que, nas condições de VA de 12,5 m/min e 14,5 m/min, os perfis transversais já apresentam uma morfologia bastante irregular, indicando uma perda na uniformidade da deposição.

Os mapas entre a Figura 64 a Figura 69 ilustram as variações de altura ao longo das superfícies analisadas, sendo possível verificar que as superfícies obtidas até a VA de 10,3 m/min mantiveram-se bastante uniformes, com variações mínimas entre picos e vales.

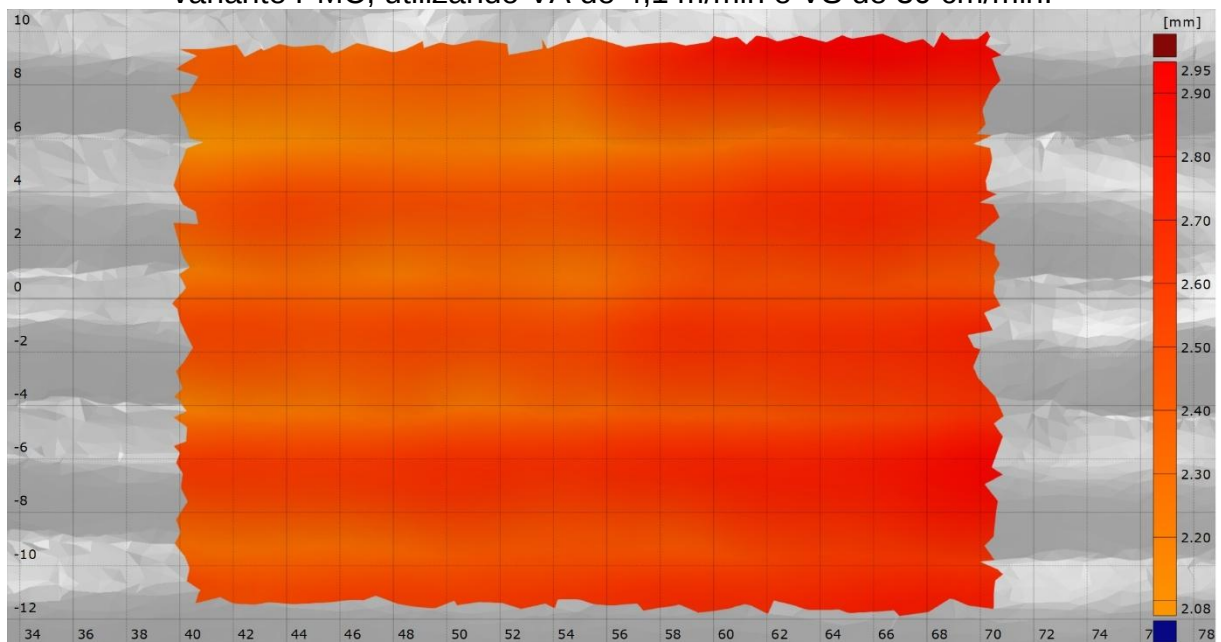
A Tabela 11 e Figura 70 apresentam os valores máximos, mínimos, médios e o desvio padrão das alturas das superfícies avaliadas.

Figura 63 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante PMC, obtidos com DBCP de 15mm e diferentes combinações de VA e VS.



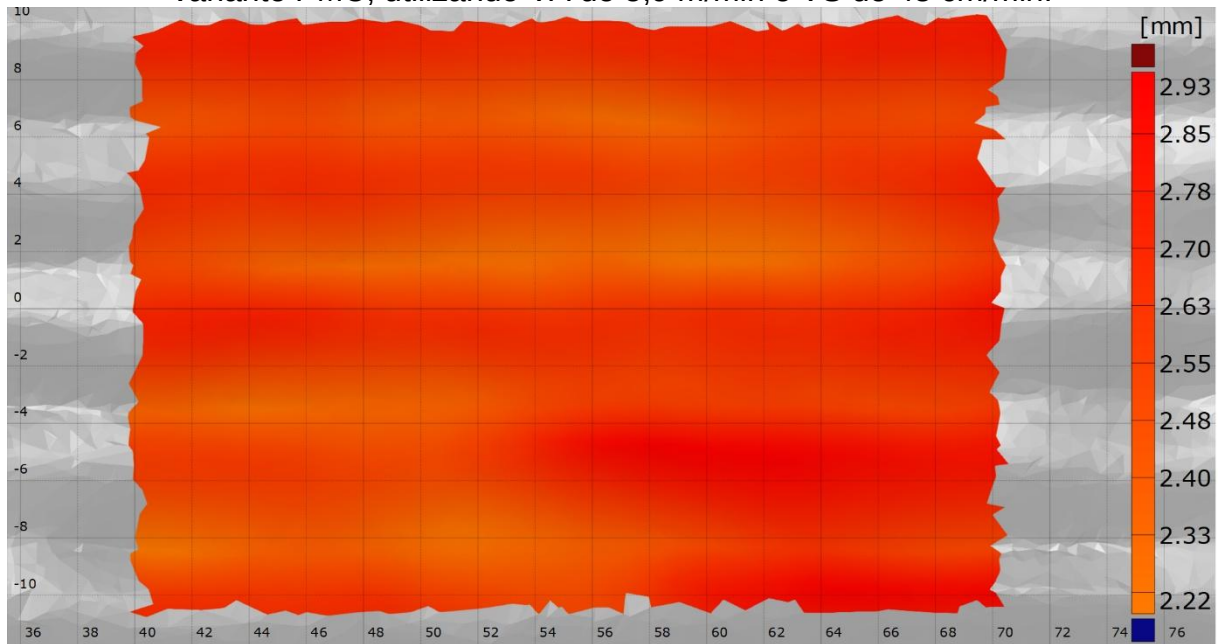
Fonte: Próprio autor.

Figura 64 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.



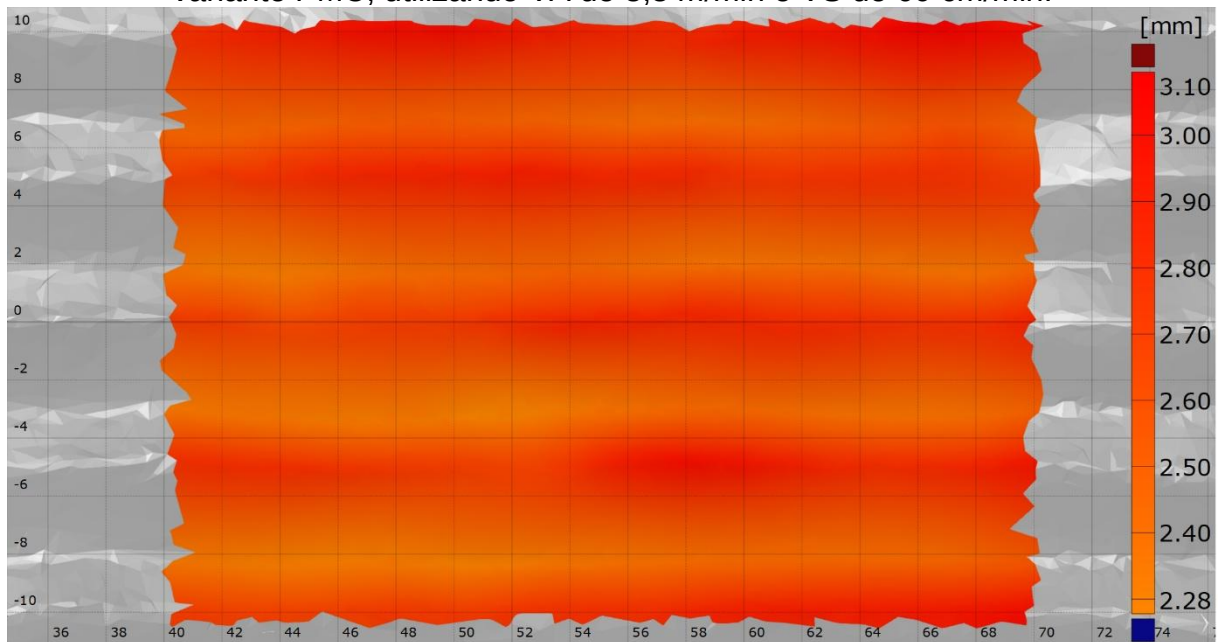
Fonte: Próprio autor.

Figura 65 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.



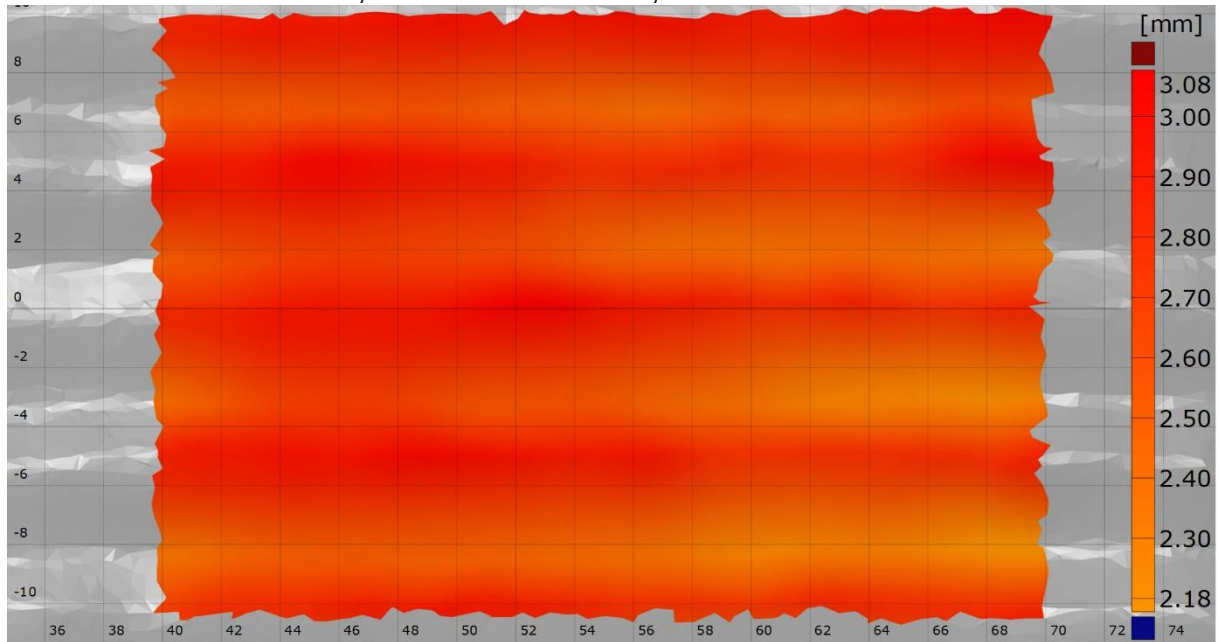
Fonte: Próprio autor.

Figura 66 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.



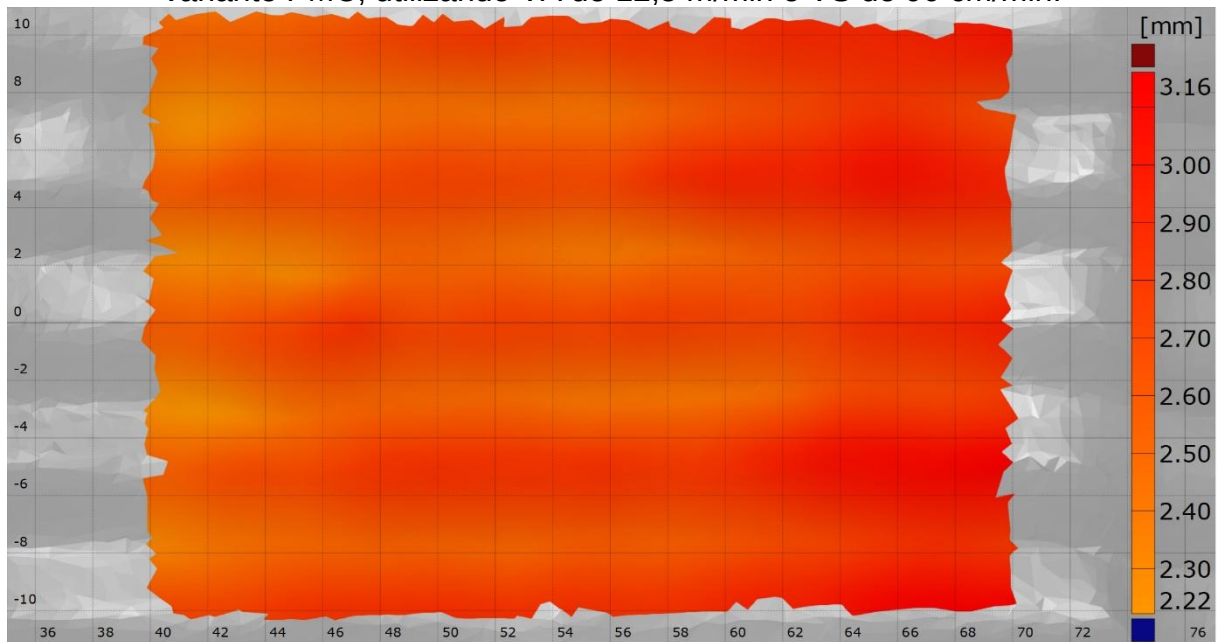
Fonte: Próprio autor.

Figura 67 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.



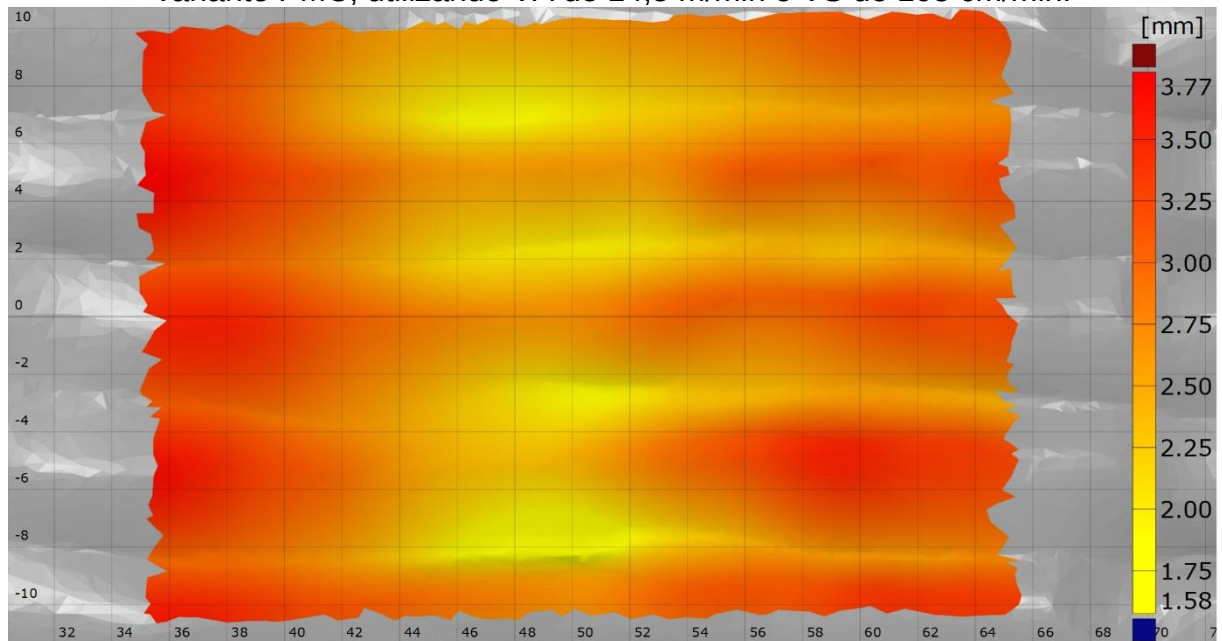
Fonte: Próprio autor.

Figura 68 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 12,5 m/min e VS de 90 cm/min.



Fonte: Próprio autor.

Figura 69 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, utilizando VA de 14,5 m/min e VS de 105 cm/min.



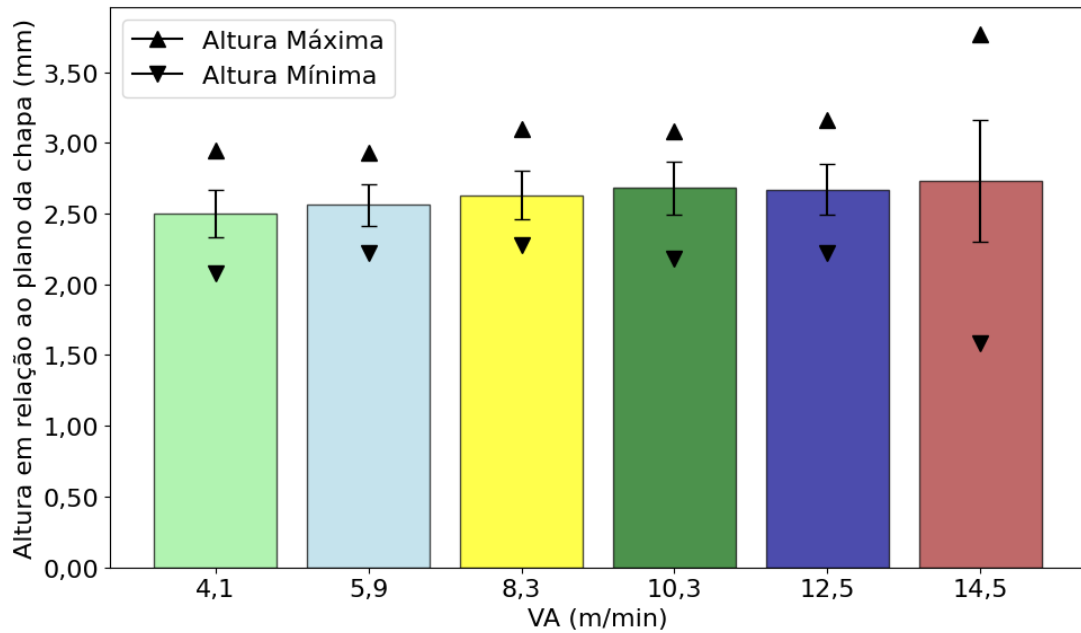
Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante PMC, referente à análise da superfície na região delimitada por X entre +40 mm e +70 mm e Y entre -10 mm e +10 mm.

VA (m/min)	4,1	5,9	8,3	10,3	12,5	14,5
Altura Máxima	+2,95	+2,93	+3,10	+3,08	+3,16	+3,77
Altura Mínima	+2,08	+2,22	+2,28	+2,18	+2,22	+1,58
Altura Média	+2,50	+2,56	+2,63	+2,68	+2,67	+2,73
Desvio Padrão da Altura	+0,17	+0,15	+0,17	+0,19	+0,18	+0,43

Fonte: Próprio autor.

Figura 70 – Gráfico de altura média e desvio padrão na variante PMC.



Fonte: Próprio autor.

A combinação de VA = 16,6 m/min e VS = 120 cm/min resultou em um cordão com reforço excessivamente irregular, fenômeno conhecido como *humping*, ver Figura 71 e Figura 72. Diante desse comportamento, optou-se por excluir essas velocidades (e valores superiores) das análises.

Figura 71 – Cordão PMC com VA de 16,6 m/min e VS de 120 cm/min.



Fonte: Próprio autor.

Figura 72 – Final do cordão PMC com VA de 16,6 m/min e VS de 120 cm/min.

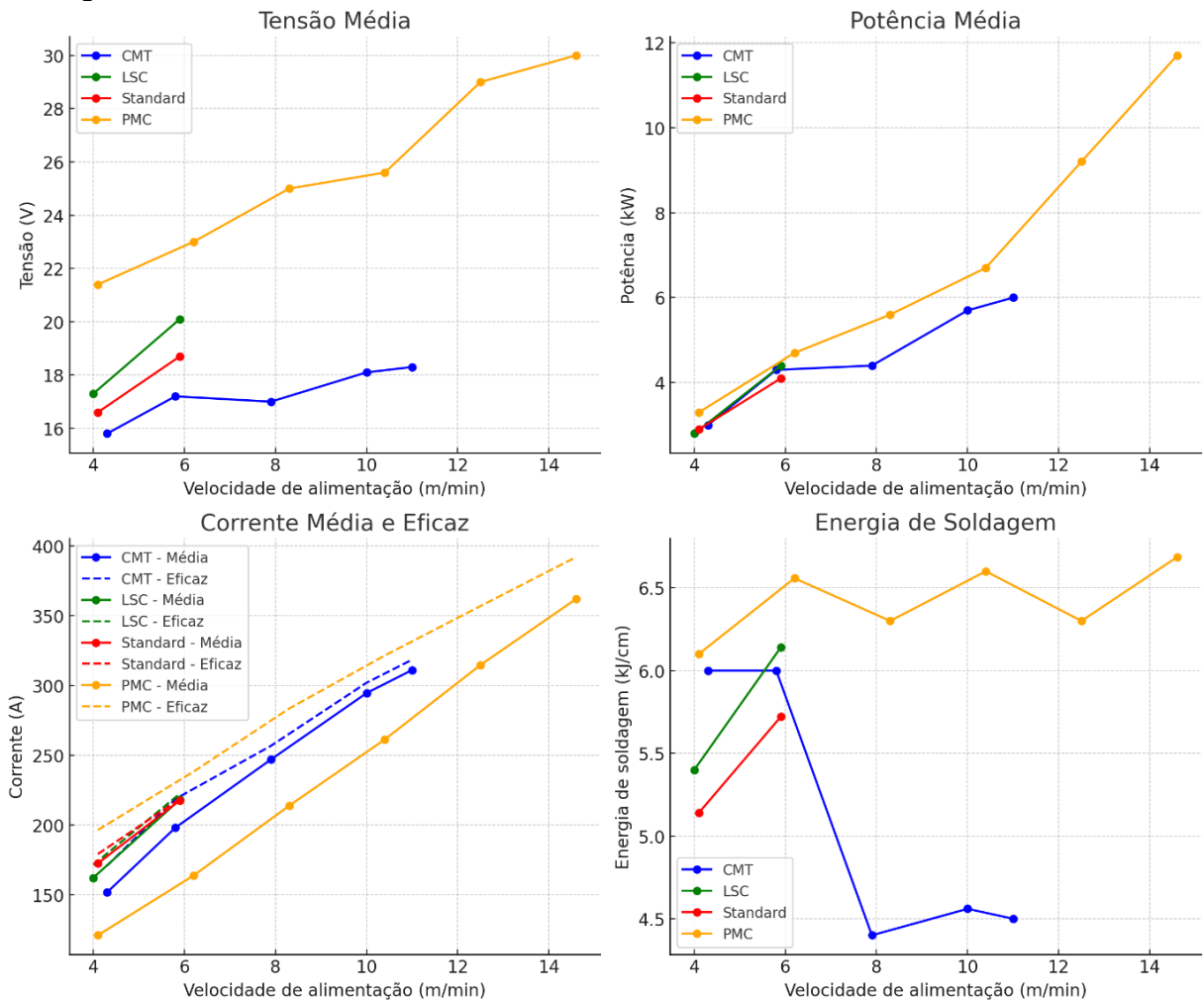


Fonte: Próprio autor.

4.1.5 Comparação entre as variantes

Os gráficos apresentados Figura 73 compilam os principais valores médios obtidos para as quatro variantes (CMT, LSC, Standard e PMC), considerando-se a variação da VA.

Figura 73 – Gráficos das variantes CMT, LSC, Standard e PMC, variando VA.



Fonte: Próprio autor.

A partir da análise da IM e IE na (Figura 73), bem como dos tempos de curto-circuito e de arco na Figura 74, é possível compreender, por meio da equação (8), o motivo pelo qual o consumo de arame pode variar significativamente entre diferentes variantes, mesmo para um mesmo valor de IM. Esse fenômeno ocorre principalmente por dois fatores. O primeiro fator refere-se ao fato de que, nas transferências por contato, durante o período de curto-circuito não há arco. Consequentemente, não há a região anódica e, portanto, não se considera a primeira parcela da equação (8), restando apenas a parcela referente ao efeito Joule na equação de consumo. O

segundo fator é que nas variantes PMC e CMT, a IE apresenta valores relativamente superiores à IM, conforme já discutido de forma semelhante o caso do PMC no item 4.1.4.

Ao comparar as variantes por contato para VA próxima a 4,1 m/min, verifica-se que, no CMT, a porcentagem de tempo em curto-circuito, em relação ao período total, é superior àquela observada nas variantes LSC e Standard. Além disso, no processo CMT, a corrente média durante o curto-circuito é significativamente menor do que a corrente média no arco. Essa disparidade entre a corrente média no curto-circuito e no arco resulta em uma diferença significativa entre a IE e a IM.

Considerando uma corrente de transição de aproximadamente 260 A, observa-se que o CMT mantém a transferência por contato, com I média acima da corrente de transição, sem que ocorram os efeitos indesejáveis do curto-circuito convencional forçado. De acordo com Scotti e Ponomarev (2014), o curto-circuito forçado é caracterizado por arco curto e correntes elevadas, acima da corrente de transição, com forte influência do efeito *pinch* e gerando elevada quantidade de respingos. Entretanto, ao analisar os cordões depositados pelo CMT e as respectivas filmagens, constata-se a realização de transferências metálicas controladas, com praticamente nenhum respingo, mesmo em elevadas VA e correntes médias, resultando em ótimo acabamento superficial.

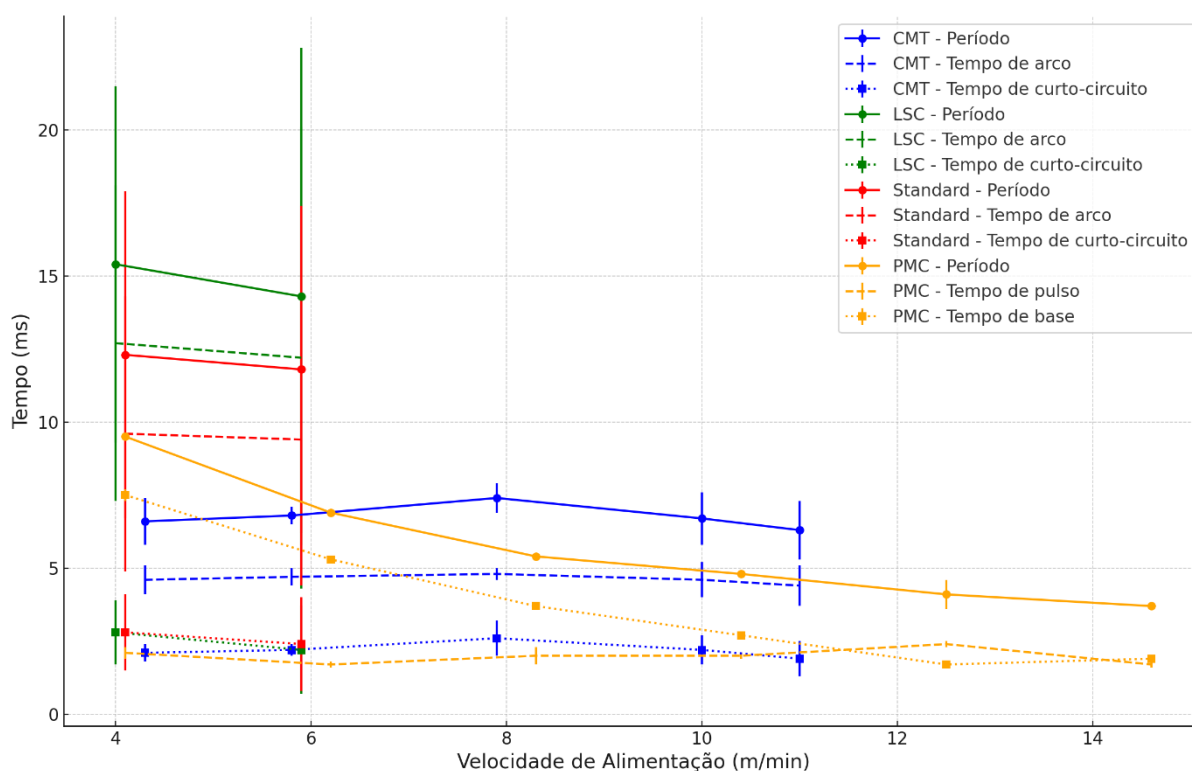
No caso do PMC, a I média ultrapassa a corrente de transição quando a VA se aproxima ou excede 10 m/min. Apesar disso, o PMC possibilita maior VA para uma mesma IM quando comparado à variante spray convencional, conforme detalhado no item 4.1.4. Acredita-se que, mesmo em IM acima da corrente de transição, a manutenção de correntes de pulso mais elevadas que a corrente no processo spray convencional resulte em FEM muito superiores com efeito *pinch* proporcionando melhor direcionamento da gota em direção à poça.

De acordo com o fabricante, uma das características distintivas do processo CMT é o menor aporte de calor em comparação com variantes convencionais. Essa premissa parece ser parcialmente verdadeira, pois, ao analisar o gráfico da energia de soldagem, verifica-se que, para VA elevadas, há uma redução significativa da energia, apresentando valores inferiores aos das demais variantes. No entanto, o mesmo gráfico revela que, para VA baixas, a variante CMT exibe energia de soldagem superior à das outras variantes. Assim, o aporte térmico no CMT parece estar fortemente associado à VA utilizada.

É importante destacar que a energia de soldagem, embora seja um parâmetro de fácil obtenção e cálculo, não considera a eficiência térmica de cada processo. A maior tensão média no processo pulsado, devido ao maior comprimento de arco em comparação com o curto-circuito convencional, eleva a energia de soldagem. Entretanto, o maior comprimento de arco tende a reduzir a eficiência térmica do processo. Para uma determinação mais precisa do calor efetivamente imposto na peça e da eficiência térmica de cada processo e condição, seriam necessárias análises mais detalhadas, como a utilização de um calorímetro. Contudo, tais análises não estão contempladas no escopo deste estudo.

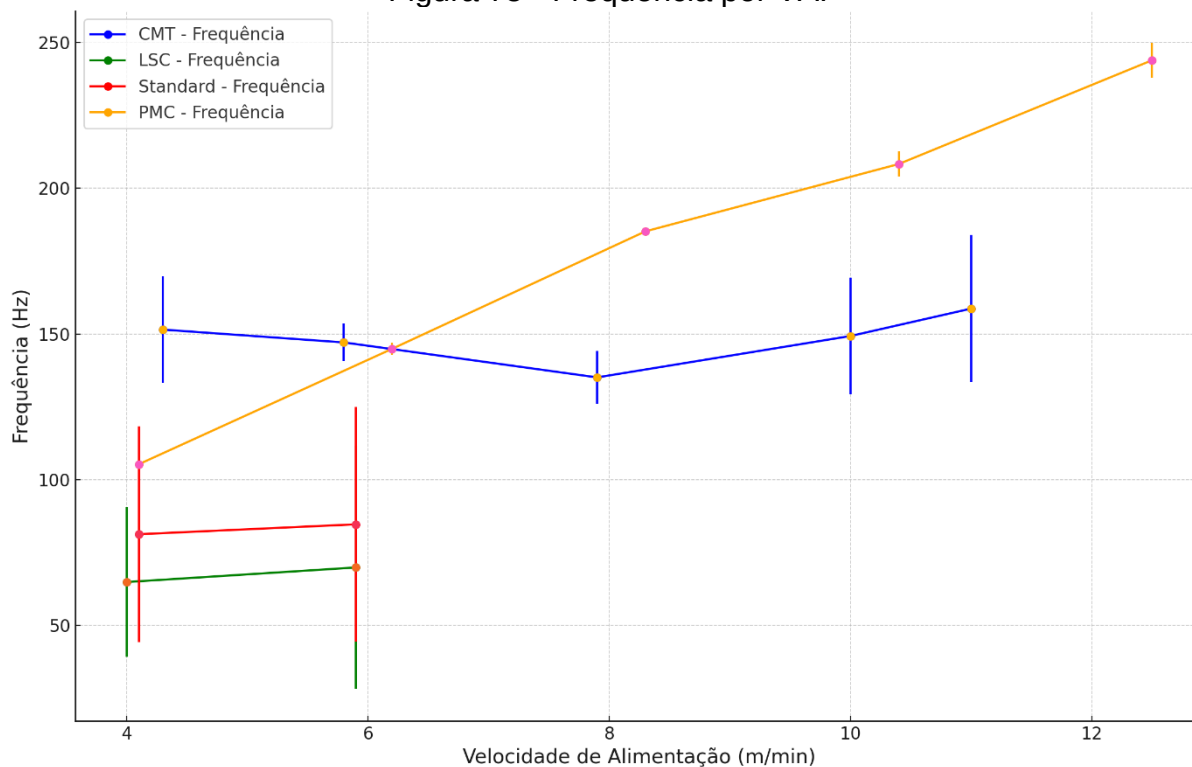
O gráfico da Figura 74 foi gerado com as médias e desvios padrões dos tempos de período, arco/pulso e curto-circuito/base para cada variante (CMT, LSC, Standard e PMC). A partir do inverso dos períodos foi gerado o gráfico das frequências (Figura 75).

Figura 74 - Período, Tempo de Arco/Pulso e Tempo de Curto/Base por VA.



Fonte: Próprio autor.

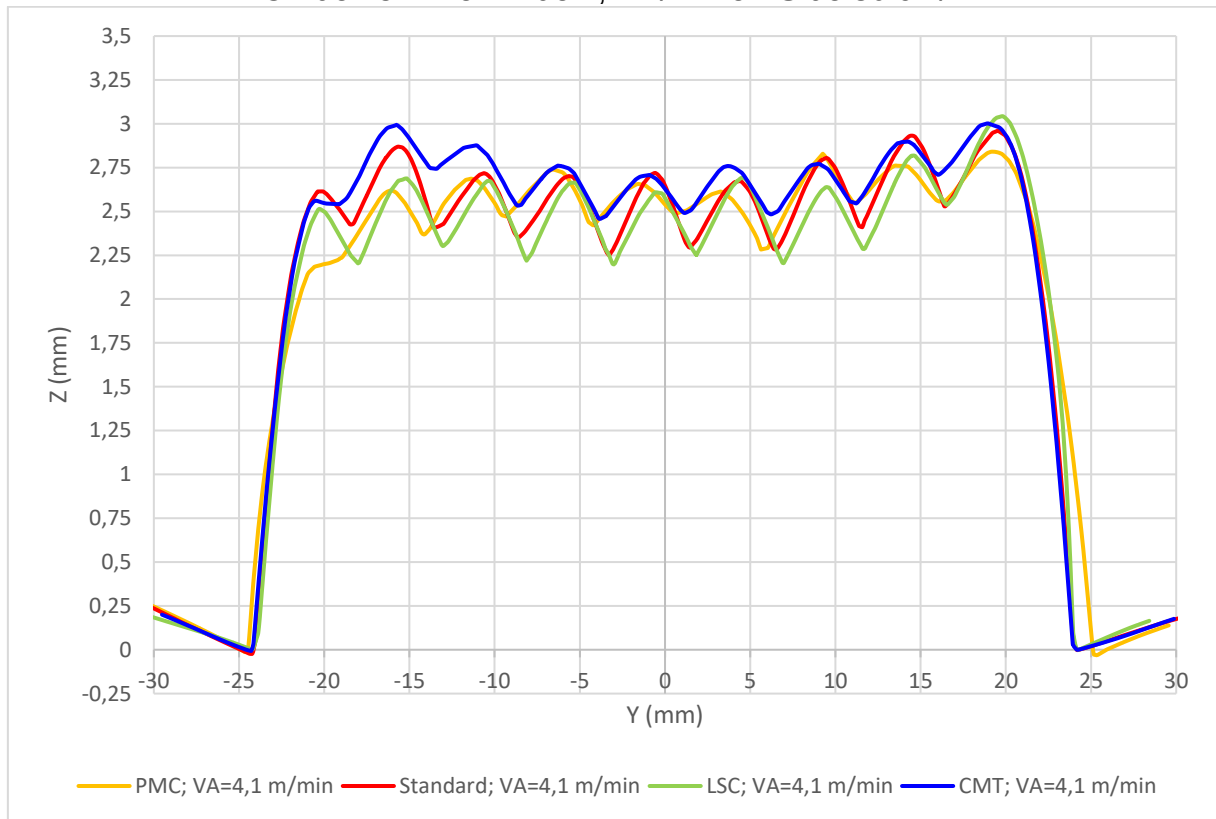
Figura 75 - Frequência por VA.



Fonte: Próprio autor.

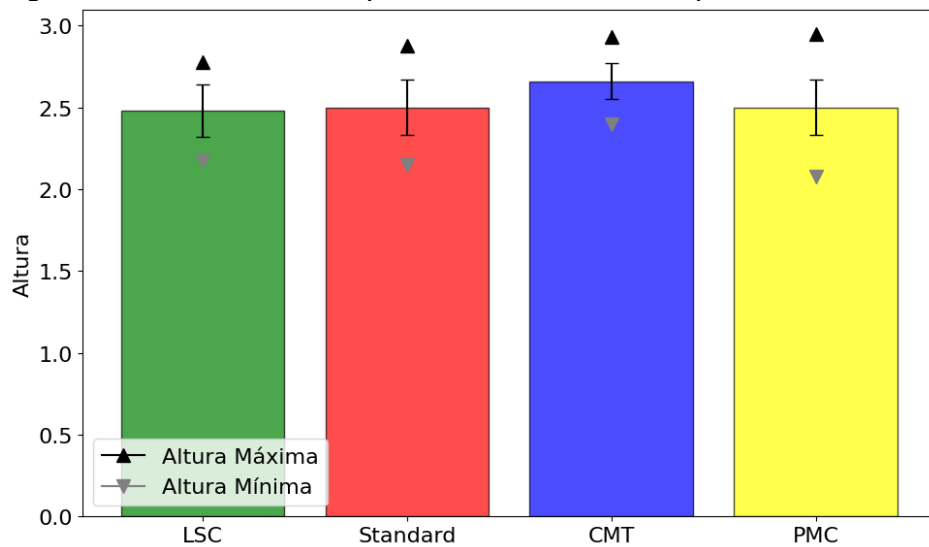
A comparação dos perfis transversais apresentados na Figura 76, referentes às quatro variantes com VA de 4,1 m/min, evidencia, de forma clara e objetiva, uma tendência de uniformidade entre os processos analisados. Observa-se que o processo CMT apresentou a maior regularidade, com menores amplitudes entre picos e vales. Em sequência, o processo PMC também apresentou boa uniformidade, enquanto as variantes LSC e Standard exibiram comportamentos bastante similares, com amplitudes ligeiramente superiores. A Figura 77 reforça as observações apresentadas, evidenciando as médias, os desvios padrão e os valores extremos das regiões analisadas nas superfícies das variantes para uma VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.

Figura 76 - Perfis das sobreposições de cordões das quatro variantes, obtidos com DBCP de 15mm e VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.



Fonte: Próprio autor.

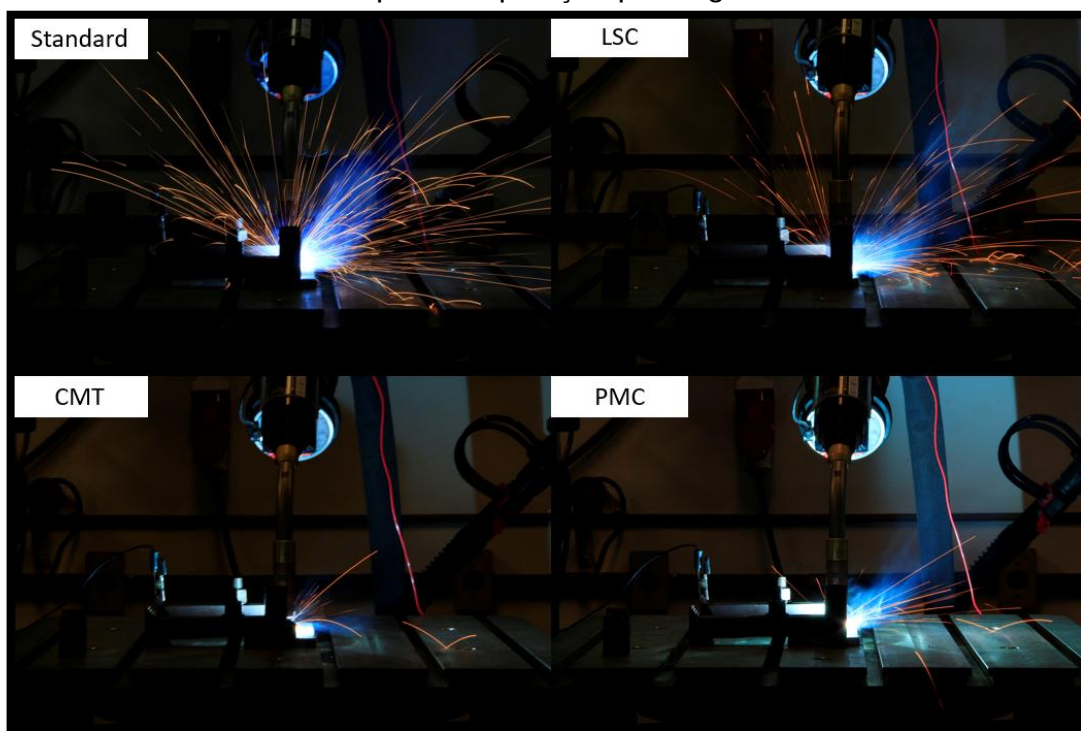
Figura 77 – Altura Média com Intervalos (Média $\pm$ Desvio Padrão) e valores extremos das regiões analisadas nas superfícies das variantes para VA de 4,1 m/min.



Fonte: Próprio autor.

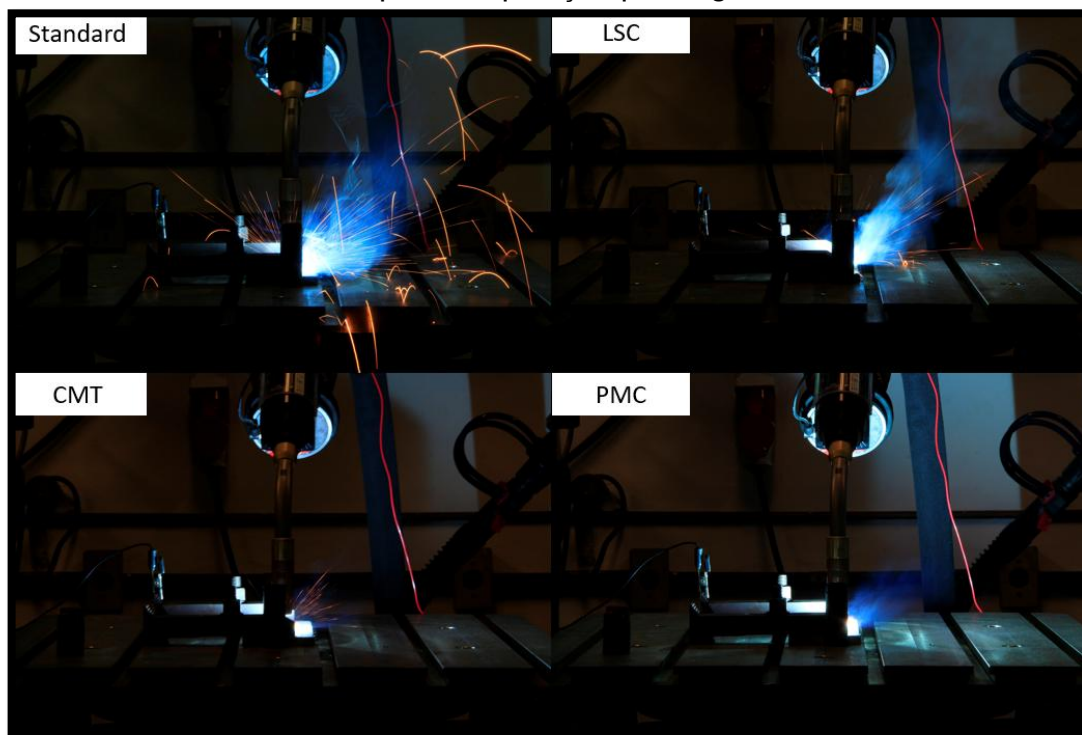
Para as quatro variantes com VA de 4,1 m/min, foram capturadas seis fotografias de cada variante utilizando tempos de exposição prolongados, com o objetivo de realizar uma análise qualitativa da quantidade de respingos. Na Figura 78, observa-se a imagem com a maior quantidade de respingos para cada processo, enquanto na Figura 79 é apresentada a menor quantidade. Verifica-se que os processos CMT e PMC exibem uma quantidade quase insignificante de respingos, ao passo que o processo LSC apresenta momentos com elevada incidência de respingos, alternando com períodos em que o algoritmo de controle atua de forma eficiente, resultando em uma geração reduzida de respingos. No processo Standard, é evidente a presença de respingos em todas as fotografias analisadas.

Figura 78 - Comparação das fotografias com maior quantidade de respingos para os processos Standard, LSC, CMT e PMC, com VA de 4,1 m/min, capturadas com tempo de exposição prolongado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 79 - Comparação das fotografias com menor quantidade de respingos para os processos Standard, LSC, CMT e PMC, com VA de 4,1 m/min, capturadas com tempo de exposição prolongado.



Fonte: Próprio autor.

Quanto à limitação máxima da VA de cada variante, o PMC apresentou as maiores velocidades de alimentação, com a limitação atribuída, provavelmente, à capacidade de potência da fonte de soldagem e não a uma limitação inerente ao processo. Essa conclusão baseia-se na observação de que o programa sinérgico permitia configurar VA superiores a 14,5 m/min. No entanto, ao operar com VA de 16,6 m/min, a fonte exibiu a mensagem de erro:

"O limite de corrente da fonte de soldagem foi excedido. Para evitar que o arco seja extinto, o valor da corrente de soldagem foi reduzido. Recomendamos reduzir um dos parâmetros (Corrente, Tensão, Velocidade de Alimentação do Arame, Espessura do Material) ou aumentar a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho."

Assim, acredita-se que versões da fonte de soldagem com maior capacidade de potência, dentro do mesmo modelo, possibilitariam o uso de VA superiores no PMC.

O CMT, por sua vez, alcançou VA consideravelmente elevadas, sendo limitado a 11 m/min. Tanto o PMC quanto o CMT demonstraram excelente controle na transferência metálica, sem necessidade de ajustes finos nos parâmetros de "correção

de comprimento de arco” e “dinâmica”. Esses resultados sugerem que essas variantes são de fácil aplicação para o operador, com ajustes adicionais servindo para atender a demandas específicas. Ambas as variantes se mostraram robustas no controle da transferência metálica.

No caso do CMT, a robustez do processo decorre do recurso adicional de controle da VA instantânea, permitindo o retrocesso do arame em altas frequências. Esse mecanismo utiliza, principalmente, a tensão superficial para promover o rompimento da ponte metálica, com menor dependência da corrente na transferência metálica, em comparação ao LSC. O retrocesso do arame facilita a predição do instante de rompimento da ponte metálica, permitindo reduzir a corrente antes do rompimento com mais eficácia, otimizando o controle do processo.

No PMC, acredita-se que o controle eficiente para garantir a condição UGPP, conforme explicado em 2.9.3, seja resultado da aplicação de elevadas IP associadas a tempos de pulso curtos, mantendo o tempo de pulso constante mesmo com variações na VA.

O LSC e o Standard ao soldar com VA de 8,3 m/min já operavam em transferência por voo livre. Com VA de 5,9 m/min as soldagens mostraram irregularidades significativas no controle da transferência, embora ainda fosse possível realizar transferência por contato. Ajustes finos nesses processos poderiam viabilizar VA maiores e maior estabilidade no controle da transferência metálica.

No LSC, diferentemente do CMT, a VA é alimentada exclusivamente no sentido de avanço do arame, e a predição da iminência de ruptura da ponte metálica, que depende fortemente do valor de corrente, baseia-se apenas no monitoramento de U e I. Essa abordagem dificulta a assertividade do controle e reduz a precisão no processo, tornando o controle da transferência metálica inferior em relação ao CMT. Além disso, em todas as variantes, é possível utilizar as regulagens de ajuste oferecidas pela fonte – ajustes complementares aos parâmetros principais do programa sinérgico – que poderiam aprimorar o desempenho, contudo, essa alternativa não foi explorada no presente trabalho.

4.2 VARIAÇÃO DE DBCP

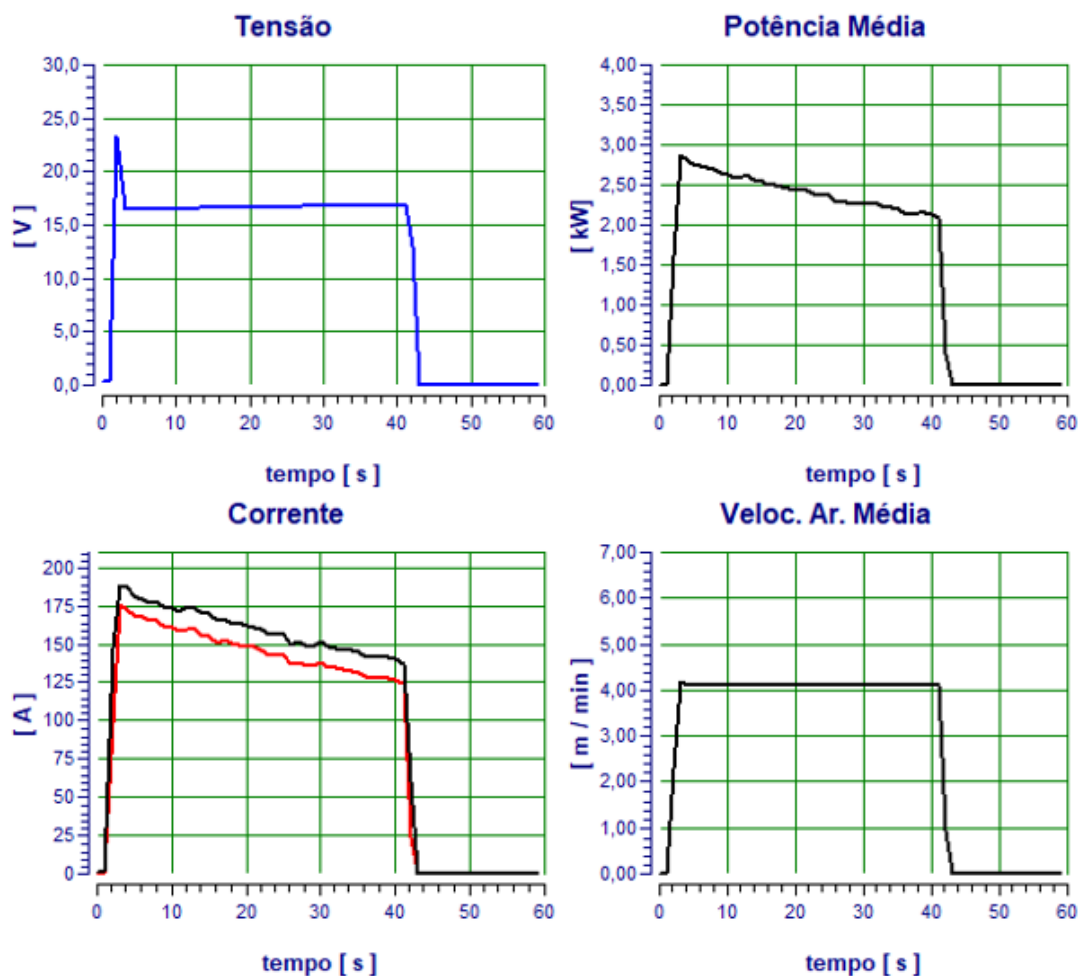
No presente item, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados variando a DBCP. Os dados detalhados das variantes avançadas, na condição de cordão sobre chapa de 20 cm de comprimento, incluindo os principais valores elétricos do processo, oscilogramas, ciclogramas e histogramas para diferentes DBCP, estão disponíveis no Apêndice B. Os dados de U, I e VA foram analisados em intervalos de tempo correspondentes às passagens pelas DBCP de 12 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm, 24 mm, 27 mm e 30 mm.

4.2.1 Curto-circuito convencional

A U estabelecida na fonte de soldagem foi de 18 V, enquanto a dinâmica, equivalente à indutância da fonte, manteve-se ajustada em 1,0. Verificou-se que as alturas do arco para as DBCP de 12 mm, 21 mm e 30 mm permaneceram reduzidas, apresentando variação mínima entre as diferentes DBCP analisadas.

A Figura 80 ilustra as médias móveis de 1 segundo para a condição de cordão sobre chapa de 20 cm (item 3.7.1). No início do cordão, identificado pelo aumento súbito dos valores, a DBCP parte de 10 mm e aumenta progressivamente até atingir 30 mm ao final do cordão, marcado pela queda brusca dos valores. Conforme esperado, a U e a VA mantiveram-se estáveis durante o processo. Por outro lado, a IM apresentou uma redução contínua, seguindo uma taxa aproximadamente constante. Esse comportamento resulta de um incremento a uma taxa constante da DBCP e conseqüentemente do L, devido à manutenção do comprimento do arco, condição na qual a fonte mantém a U inalterada. Dado que a resistência elétrica do eletrodo aumenta linearmente com seu comprimento, pela Lei de Ohm, a I decresce de maneira linear. Observou-se, ainda, por meio das filmagens, a geração de respingos nos instantes de ruptura abrupta da ponte metálica (Figura 81), fenômeno típico dessa variante, atribuído à elevada I durante o desprendimento da gota.

Figura 80 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante curto-circuito convencional.



Fonte: Próprio autor.

Figura 81 – Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante convencional.



Fonte: Próprio autor.

Com o aumento da DBCP e consequente redução da IM, a potência de soldagem também diminui. Como resultado, o cordão apresenta morfologia mais convexa, caracterizando menor molhamento à medida que a DBCP se eleva.

Conforme observado na Figura 82, verifica-se uma maior amplitude entre os picos e vales na região correspondente à DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm), em comparação com a região de DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm). A Figura 83 e Figura 84 apresentam os mapas de altura da superfície para a região delimitada entre $X = 40$ a 100 mm e $Y = -10$ a +10 mm. A Tabela 12 detalha, para esta região, os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão, organizados em dois intervalos: $X = [40$ a 70] mm (DBCP de 14 a 20 mm) e $X = [70$ a 100] mm (DBCP de 20 a 26 mm). Nota-se que a média das alturas se mantém praticamente constante, uma vez que a quantidade de material depositado permanece equivalente, devido às VA e VS serem constantes.

Figura 82 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante Convencional, nos planos $X = 40$ mm (DBCP de 14 mm) e $X = 100$ mm (DBCP de 26 mm).

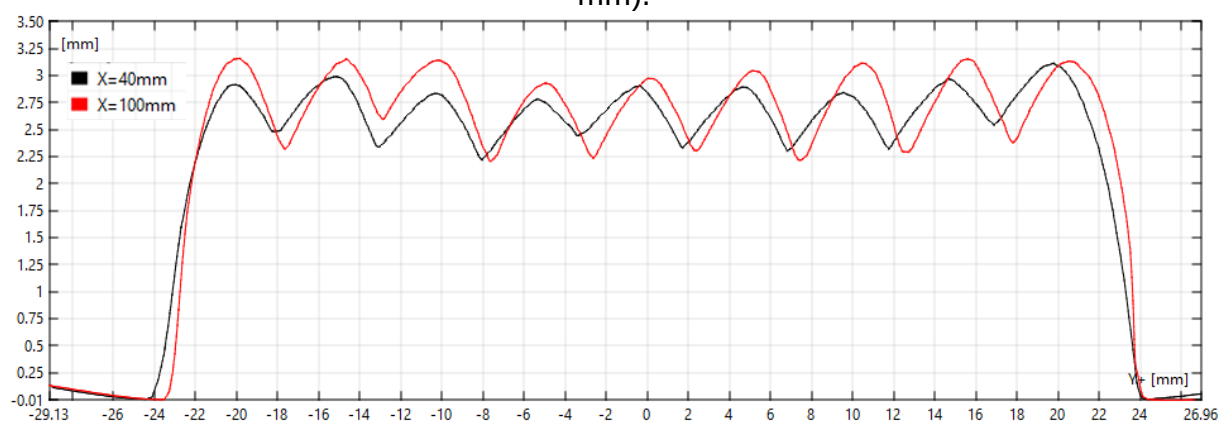
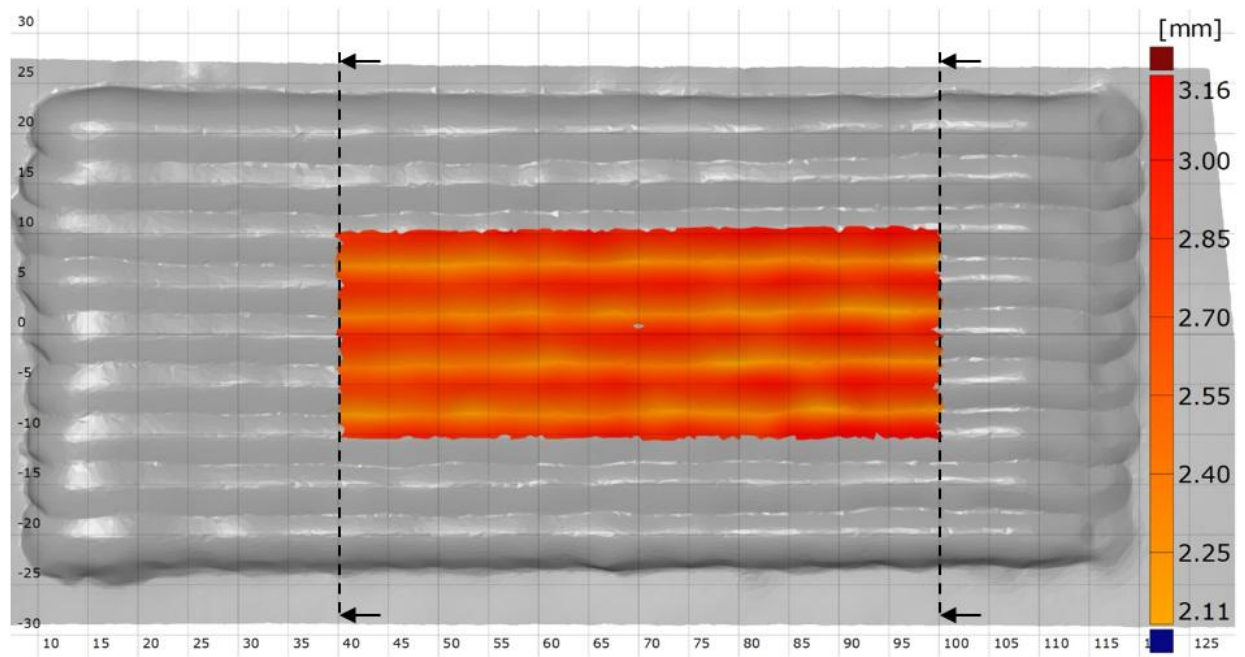
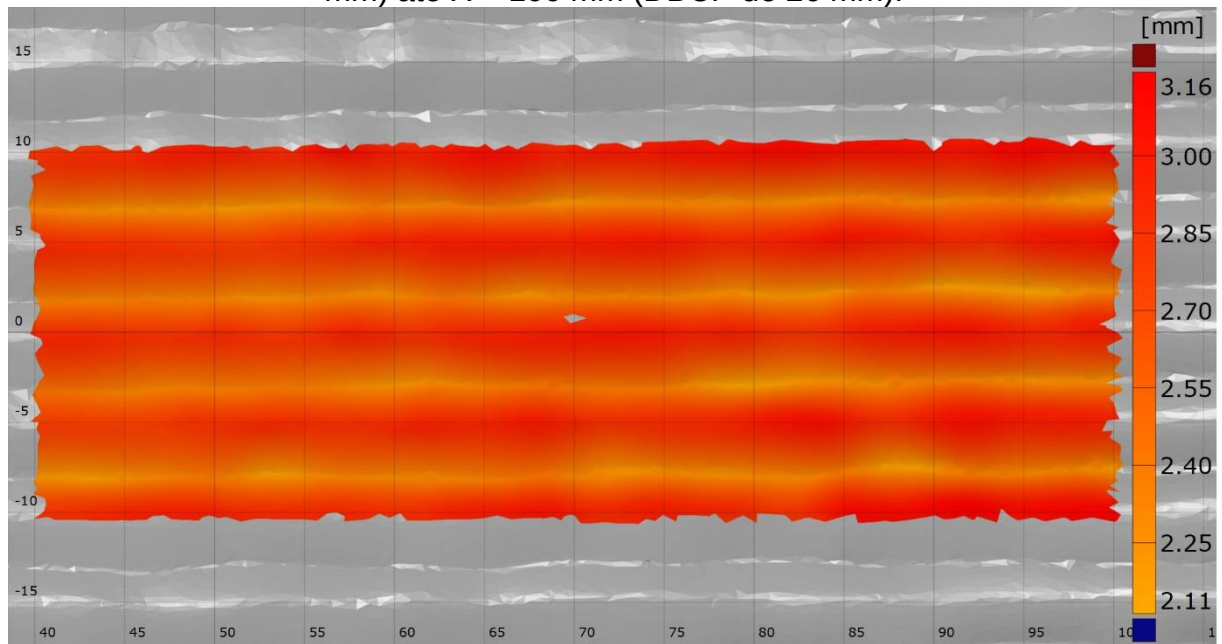


Figura 83 – Escaneamento 3D da superfície das sobreposições de cordões e região analisada variando DBCP.



Fonte: Próprio autor.

Figura 84 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Convencional, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante Convencional, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).

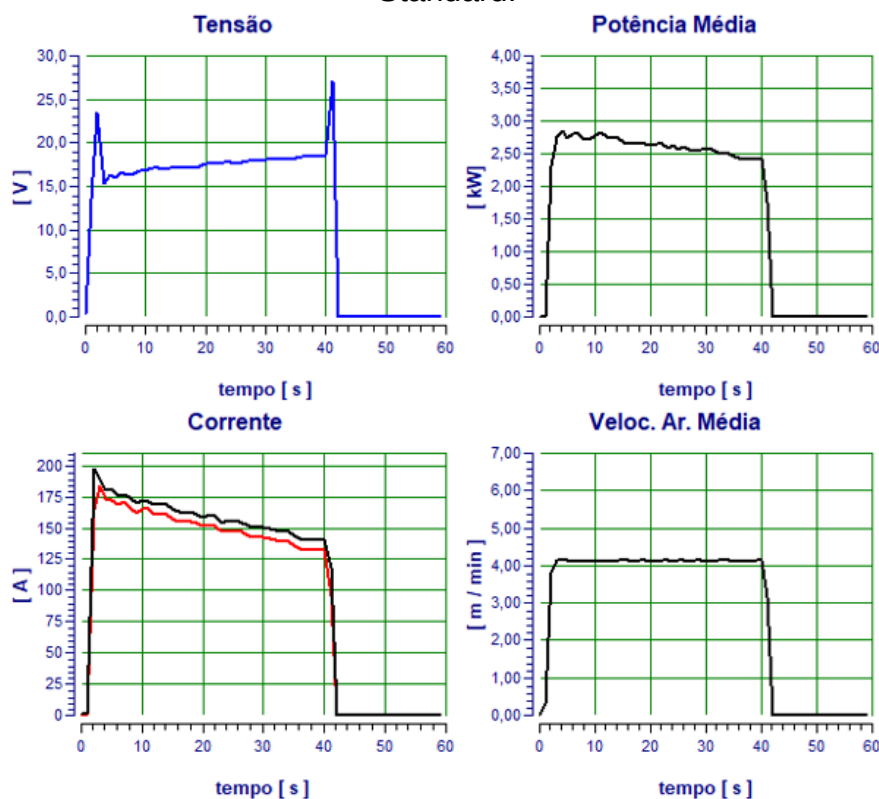
Parâmetro	X = [40 a 70] mm	X = [70 a 100] mm
Altura Máxima	+3,08	+3,16
Altura Mínima	+2,15	+2,11
Altura Média	+2,64	+2,67
Desvio Padrão da Altura	+0,23	+0,27

Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Standard

A Figura 85 compila as médias móveis do Standard, enquanto a Figura 86 mostra o momento de ruptura da ponte metálica. Os valores médios da variante Standard exibem um comportamento semelhante ao da variante Convencional, com a exceção da U média, que apresenta um ligeiro aumento à medida que a DBCP é elevada.

Figura 85 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante Standard.



Fonte: Próprio autor.

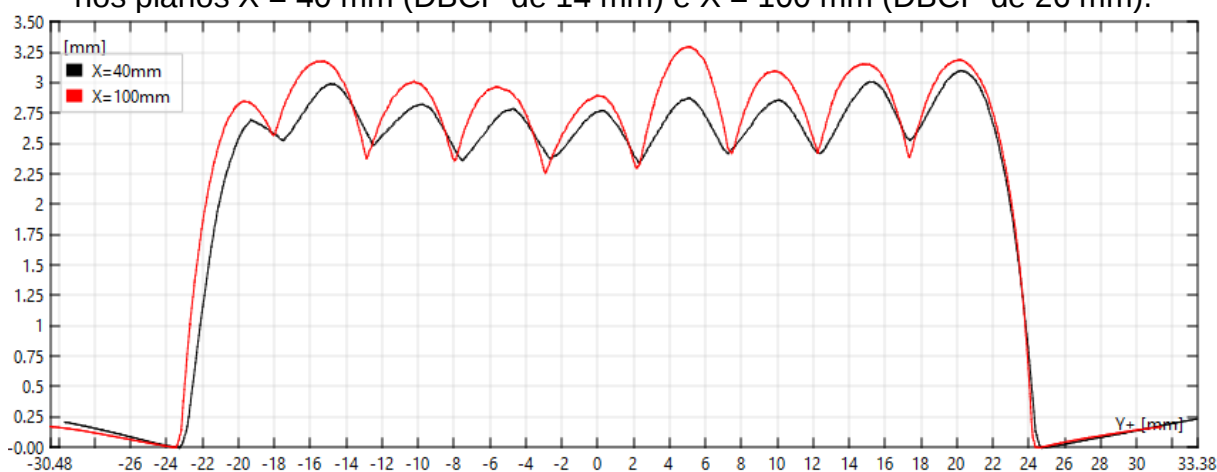
Figura 86 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante Standard.



Fonte: Próprio autor.

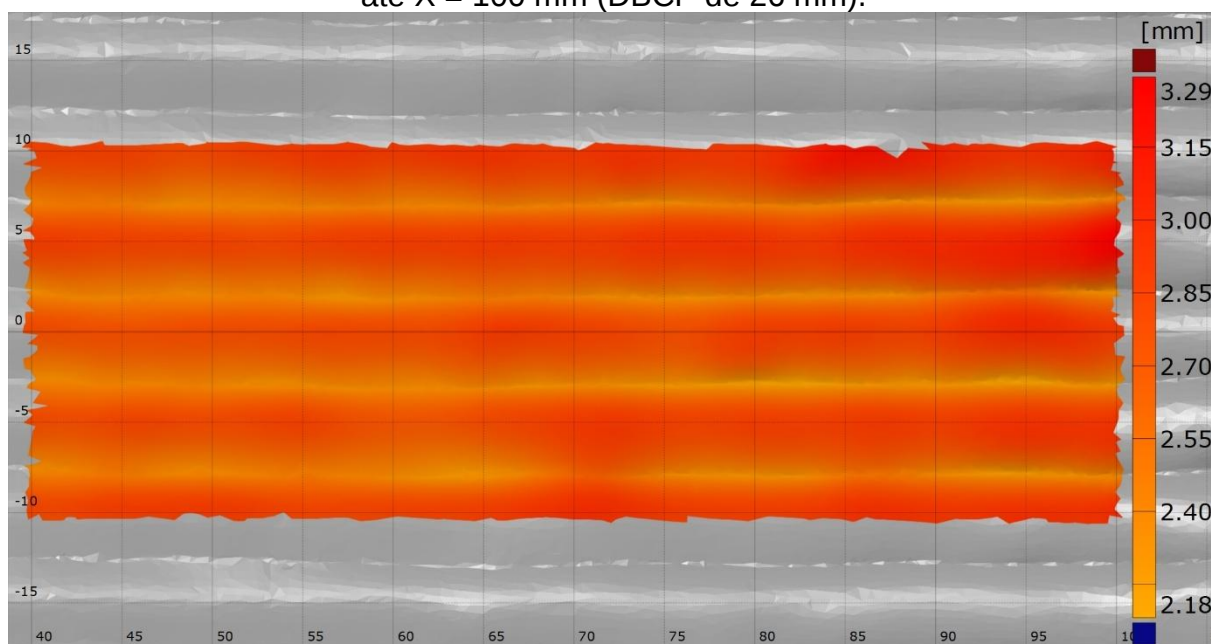
Conforme observado na Figura 87, verifica-se uma maior amplitude entre os picos e vales na região correspondente à DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm), em comparação com a região de DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm). A Figura 67 apresenta o mapa de altura da superfície, ficando evidente o aumento de amplitude com o aumento da DBCP. A Tabela 13 detalha, para esta região, os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão, organizados em dois intervalos: $X = [40 \text{ a } 70]$ mm (DBCP de 14 a 20 mm) e $X = [70 \text{ a } 100]$ mm (DBCP de 20 a 26 mm). Nota-se que a média das alturas se mantém praticamente constante, uma vez que a quantidade de material depositado permanece equivalente, devido às VA e VS serem constantes.

Figura 87 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante Standard, nos planos $X = 40$ mm (DBCP de 14 mm) e $X = 100$ mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Figura 88 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante Standard, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante Standard, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).

Parâmetro	X = [40 a 70] mm	X = [70 a 100] mm
Altura Máxima	+2,99	+3,29
Altura Mínima	+2,27	+2,18
Altura Média	+2,64	+2,69
Desvio Padrão da Altura	+0,17	+0,23

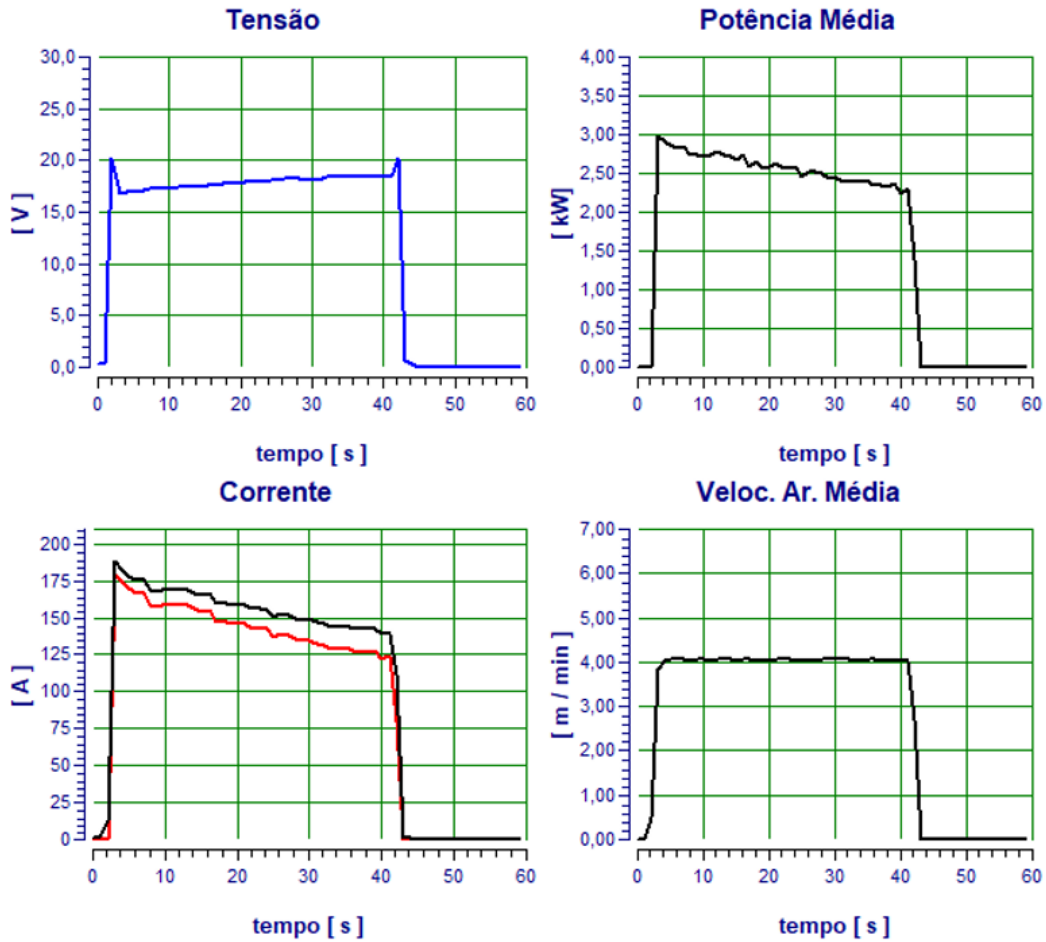
Fonte: Próprio autor.

4.2.3 LSC

A Figura 89 compila as médias móveis do LSC, enquanto a Figura 90 mostra o momento de ruptura da ponte metálica.

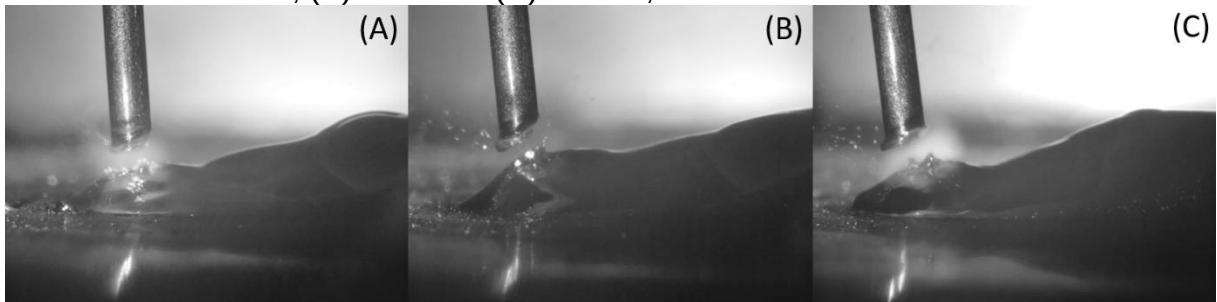
A VA é mantida constante durante a soldagem. A U média aumenta de 17 V na DBCP de 12 mm para 18,4 V na DBCP de 30 mm. A IM e a potência caem de forma linear devido a efeito do aumento do eletrodo comentado no item 4.2.1.

Figura 89 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante LSC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 90 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante LSC.



Fonte: Próprio autor.

Conforme observado na Figura 91, verifica-se uma maior amplitude entre os picos e vales na região correspondente à DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm), em comparação com a região de DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm). A Figura 92 apresenta o mapa de altura da superfície e a Tabela 14 detalha, para esta região, os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão, organizados em dois intervalos: $X = [40$ a

70] mm (DBCP de 14 a 20 mm) e $X = [70 \text{ a } 100]$ mm (DBCP de 20 a 26 mm). Nota-se que a média das alturas se mantém praticamente constante, uma vez que a quantidade de material depositado permanece equivalente, devido às VA e VS serem constantes.

Figura 91 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante LSC, nos planos $X = 40$ mm (DBCP de 14 mm) e $X = 100$ mm (DBCP de 26 mm).

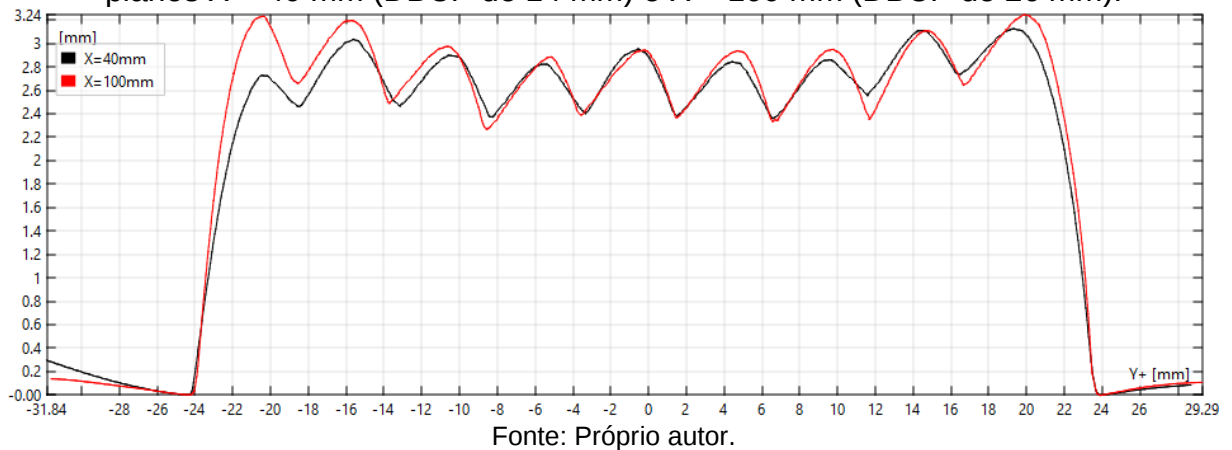


Figura 92 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC, variando a DBCP linearmente de $X = 40$ mm (DBCP de 14 mm) até $X = 100$ mm (DBCP de 26 mm).

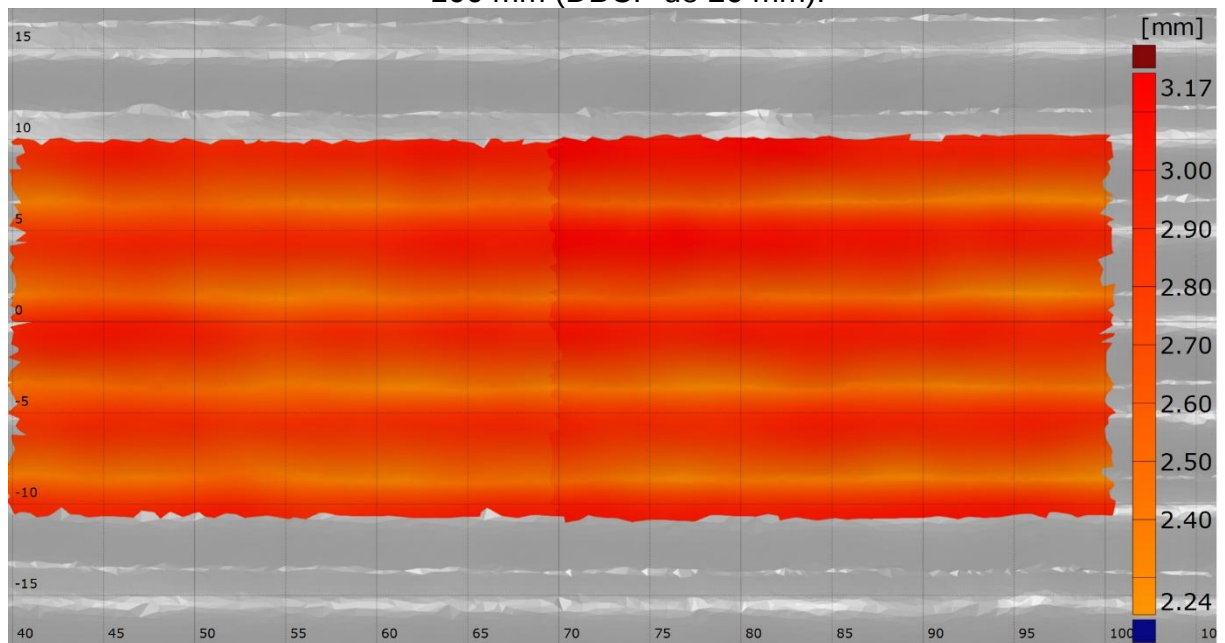


Tabela 14 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante LSC, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).

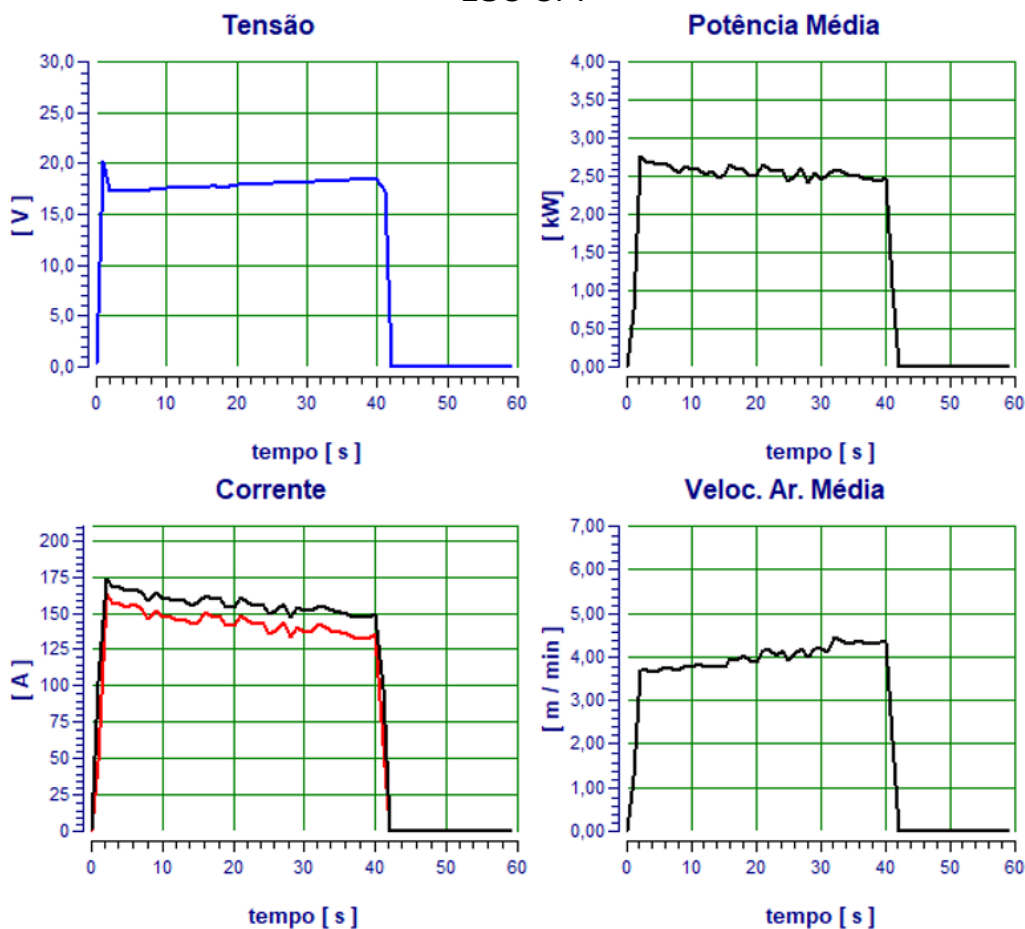
Parâmetro	X = [40 a 70] mm	X = [70 a 100] mm
Altura Máxima	+3,04	+3,17
Altura Mínima	+2,30	+2,24
Altura Média	+2,70	+2,73
Desvio Padrão da Altura	+0,18	+0,22

Fonte: Próprio autor.

4.2.4 LSC CP

A Figura 93 compila as médias móveis do LSC CP, enquanto a Figura 94 mostra o momento de ruptura da ponte metálica. O recurso de controle de penetração, em comparação ao LSC, difere basicamente pelo incremento da VA, suavizando a queda de IM e mantendo a potência média basicamente constante. A tensão média pouco varia.

Figura 93 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante LSC CP.



Fonte: Próprio autor.

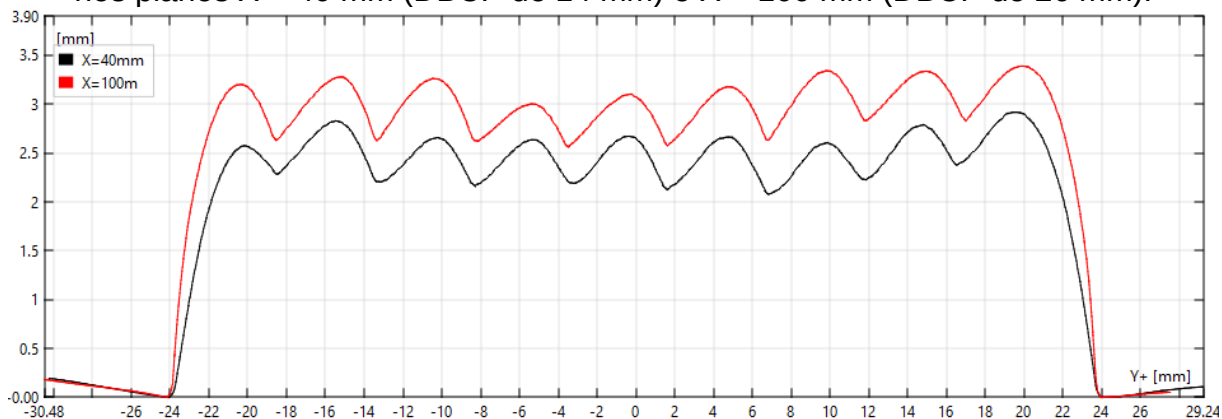
Figura 94 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante LSC CP.



Fonte: Próprio autor.

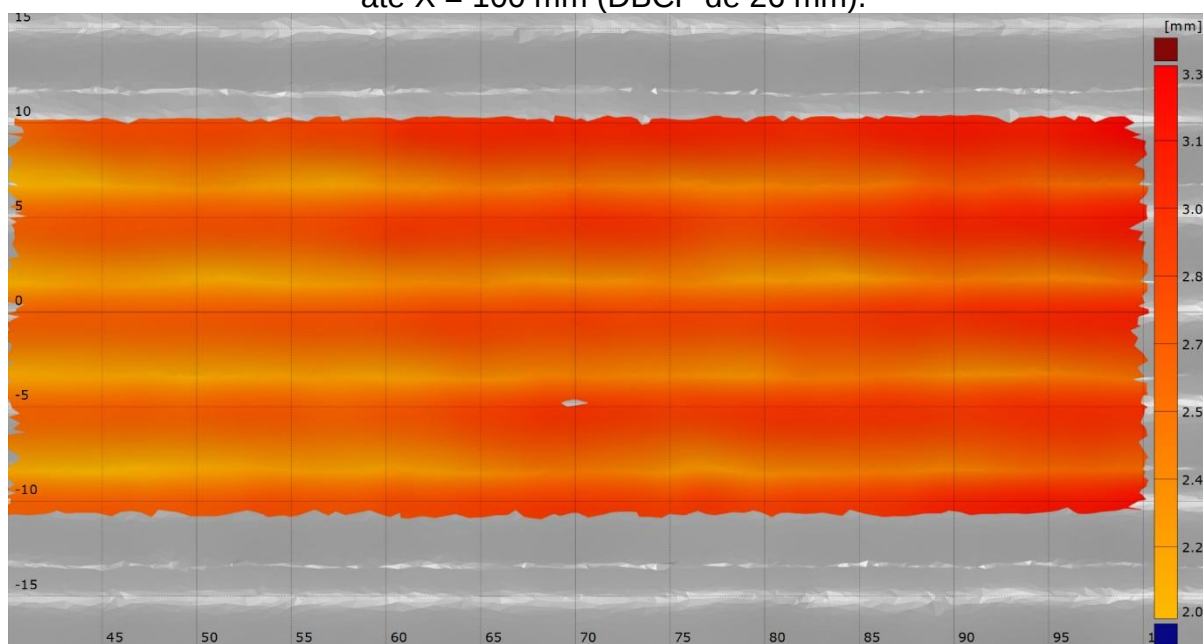
Observa-se, na Figura 95, uma amplitude semelhante entre os picos e vales nas diferentes regiões, com uma altura média mais elevada na região correspondente à DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm) em relação à região de DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm). A Figura 96 e a Tabela 15 corroboram esse aumento na média das alturas, evidenciando a maior quantidade de material depositado resultado do incremento na VA em DBCPs maiores.

Figura 95 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante LSC CP, nos planos $X = 40$ mm (DBCP de 14 mm) e $X = 100$ mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Figura 96 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante LSC CP, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante LSC CP, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).

Parâmetro	X = [40 a 70] mm	X = [70 a 100] mm
Altura Máxima	+3,07	+3,32
Altura Mínima	+2,09	+2,25
Altura Média	+2,56	+2,76
Desvio Padrão da Altura	+0,23	+0,22

Fonte: Próprio autor.

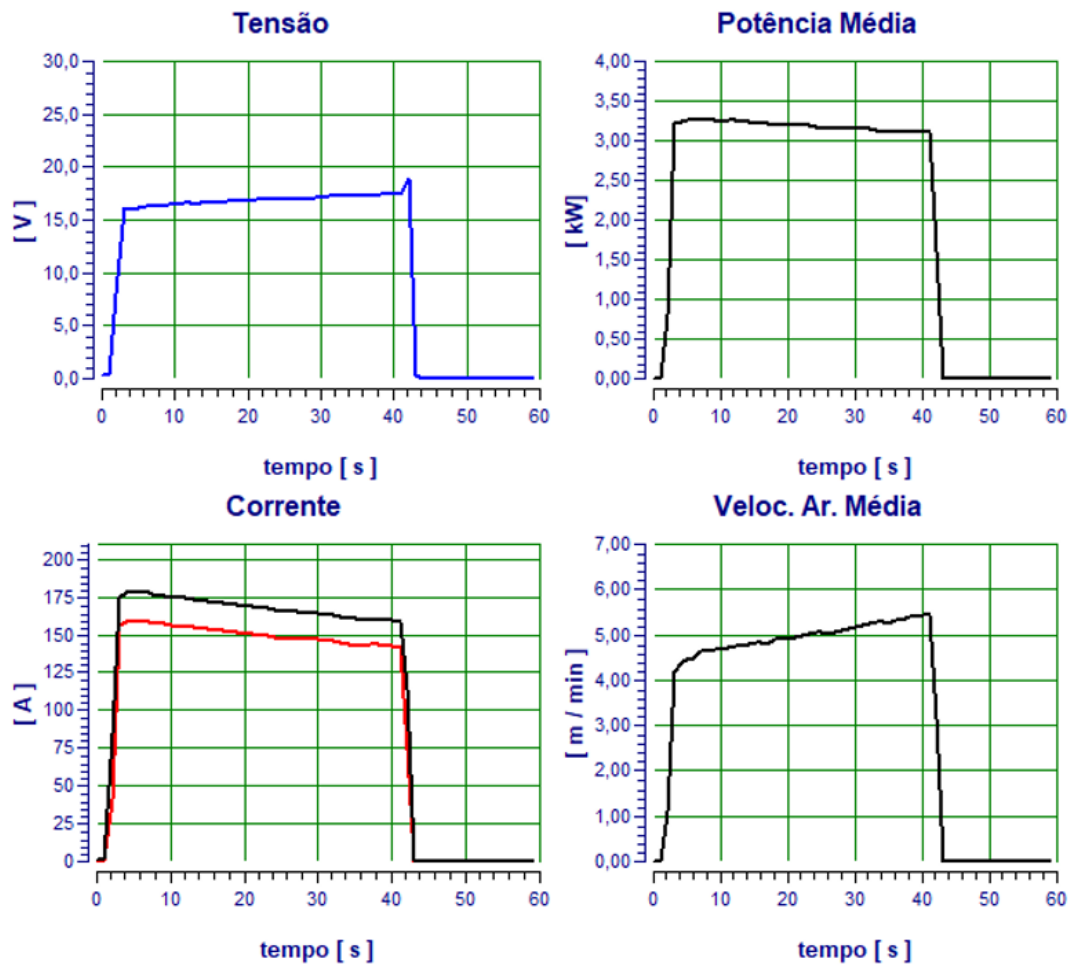
4.2.5 CMT

A Figura 97 compila as médias móveis do CMT, a Figura 98 e Figura 99 mostram o momento exato de inversão do sentido de alimentação de arame, enquanto a Figura 100 mostra o momento de ruptura da ponte metálica.

No CMT, apesar de não deixar expresso que tem controle de penetração, o algoritmo da fonte mantém a U média, IM e potência média aproximadamente constantes. A VA, apesar de ajustada na fonte em 4,1 m/minuto, se eleva ao aumentar a DBCP.

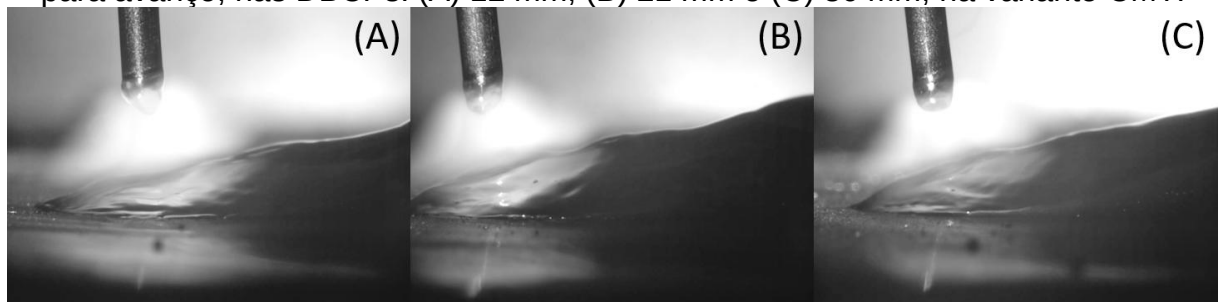
A frequência de destacamento varia pouco, sendo medidos valores médios de 152 Hz em DBCP de 12 mm e 147 Hz na DBCP de 30 mm.

Figura 97 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante CMT.



Fonte: Próprio autor.

Figura 98 - Momento de inversão do sentido de alimentação de arame, de recuo para avanço, nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, na variante CMT.



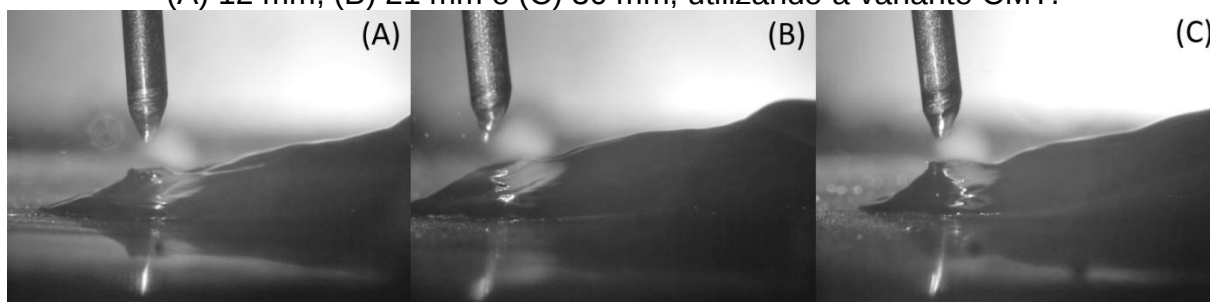
Fonte: Próprio autor.

Figura 99 - Momento de inversão do sentido de alimentação de arame, de avanço para recuo, nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, na variante CMT.



Fonte: Próprio autor.

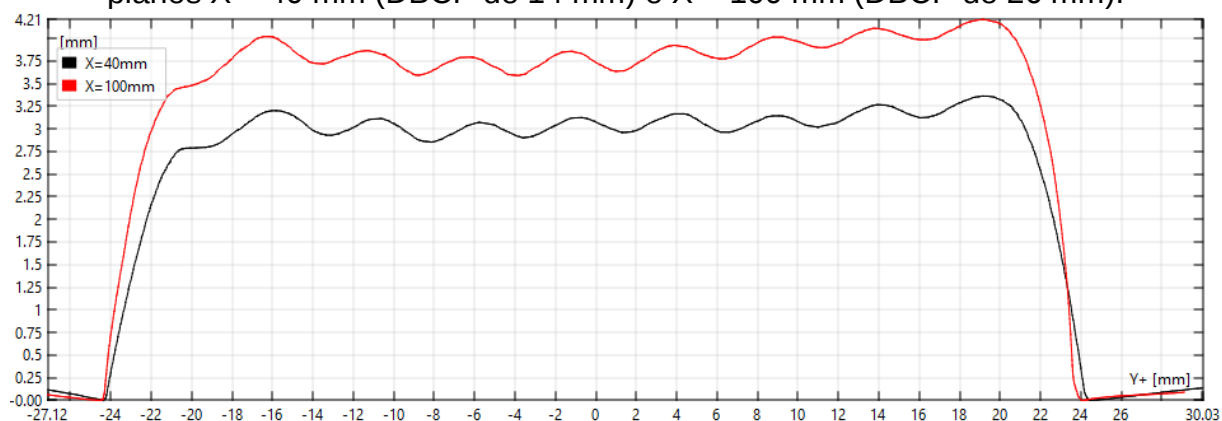
Figura 100 - Momento de desprendimento da gota do arame eletrodo nas DBCPs: (A) 12 mm, (B) 21 mm e (C) 30 mm, utilizando a variante CMT.



Fonte: Próprio autor.

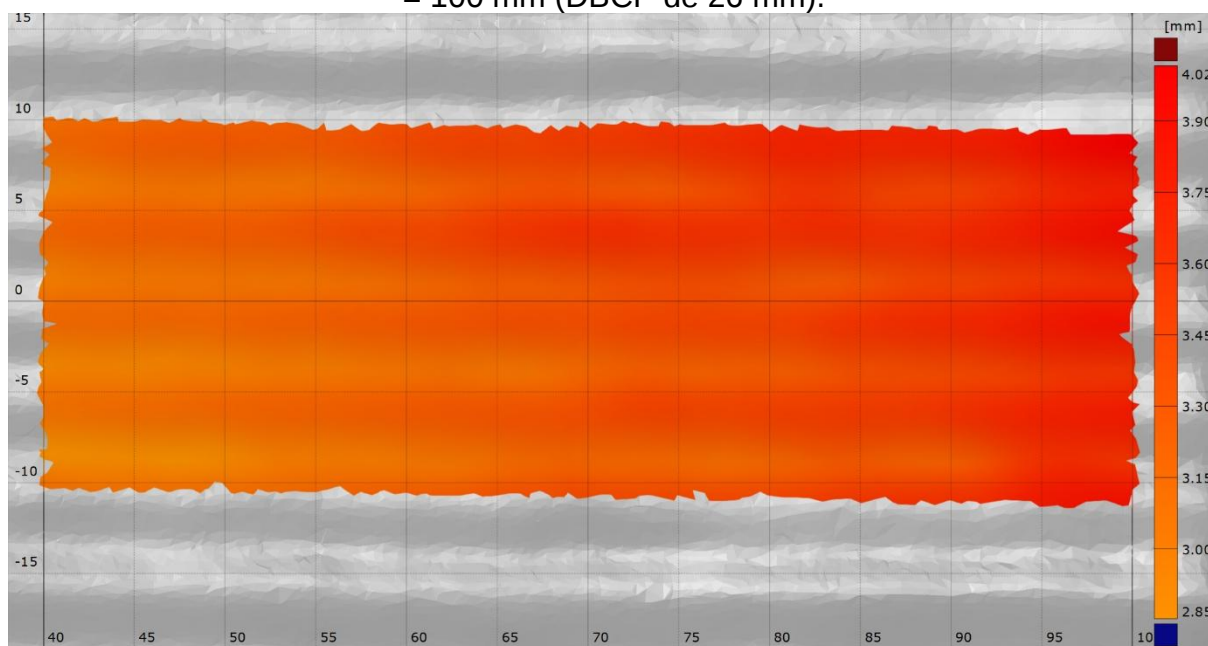
Observa-se, na Figura 101, uma baixa amplitude e uma superfície quase plana, com intensidade semelhante entre os picos e vales nas diferentes DBCP. Nota-se uma altura média significativamente maior na região correspondente à DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm) em comparação à região de DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm). A Figura 102 e a Tabela 16 corroboram esse aumento na média das alturas, evidenciando a maior quantidade de material depositado resultado do incremento na VA em DBCPs maiores.

Figura 101 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante CMT, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Figura 102 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante CMT, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante CMT, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).

Parâmetro	X = [40 a 70] mm	X = [70 a 100] mm
Altura Máxima	+3,64	+4,02
Altura Mínima	+2,85	+3,15
Altura Média	+3,18	+3,52
Desvio Padrão da Altura	+0,15	+0,18

Fonte: Próprio autor.

4.2.6 PMC

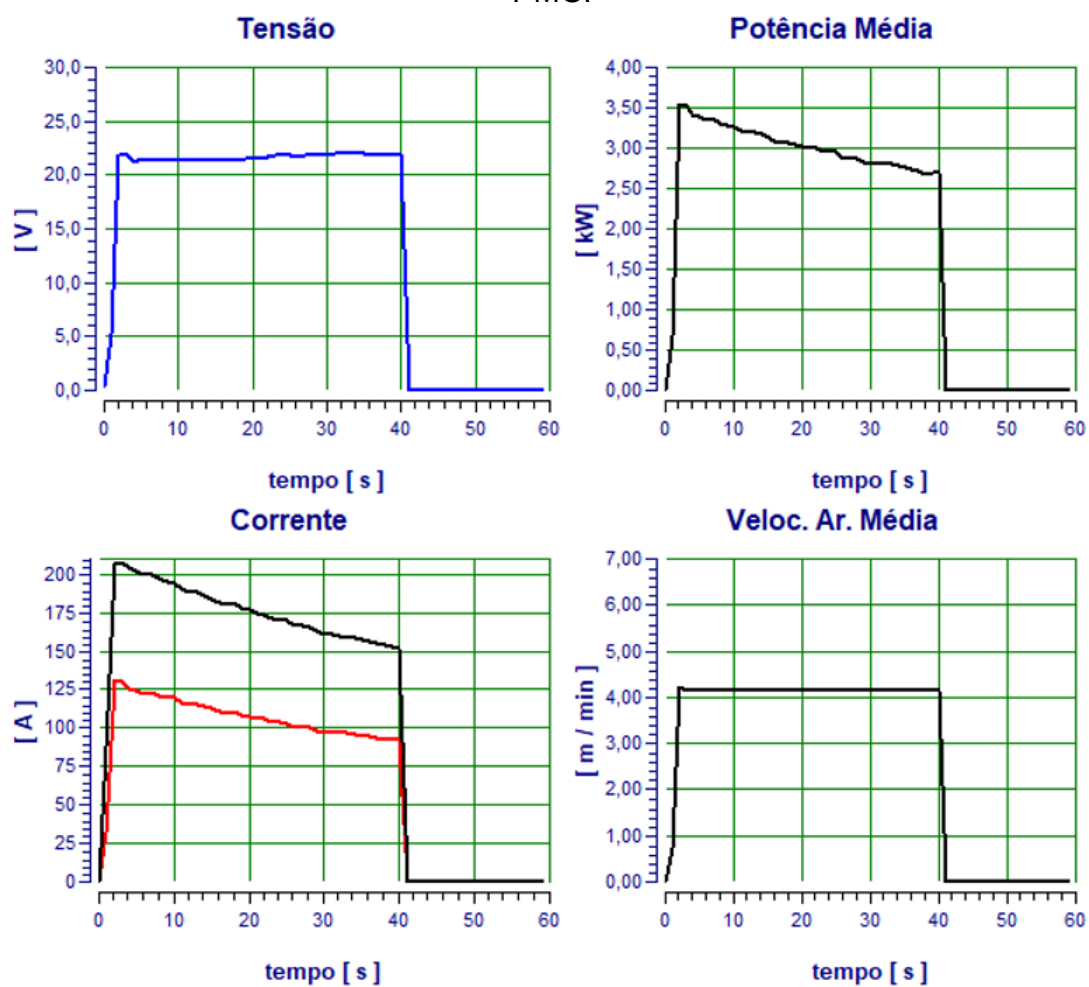
A variante PMC mantém a VA constante em todas as DBCP (Figura 103). A U média também se mantém aproximadamente constante, variando de 21,3 V, na DBCP de 12 mm, até 22,0 V, na DBCP de 30 mm, o que sugere a existência de um controle da U média pela fonte, com o objetivo de manter a U média dentro de uma faixa pré-estabelecida.

Quando a U média e a VA são mantidas constantes, a altura do arco tende a permanecer inalterada. Consequentemente, para uma dada variação de DBCP, a extensão livre do eletrodo (L) também se altera na mesma taxa. De acordo com a equação (8), para aumentar L mantendo VA constante, o controle externo da fonte de soldagem deve atuar diminuindo a IM e a IE (inversamente proporcional à variação da DBCP). Esse controle é feito modificando a forma de onda da corrente.

Para reduzir a IM e a IE, a forma de onda da corrente (Figura 104) é modificada, elevando-se o tempo de base e mantendo-se o tempo de pulso, bem como reduzindo-se a IP. Segundo Norrish (2006), a faixa de tempo de pulso para a condição UGPP é mais restrita do que a faixa de valores de IP. Pressupõe-se que o algoritmo adaptativo empregado busque não alterar o tempo de pulso, a fim de assegurar maior robustez à condição UGPP.

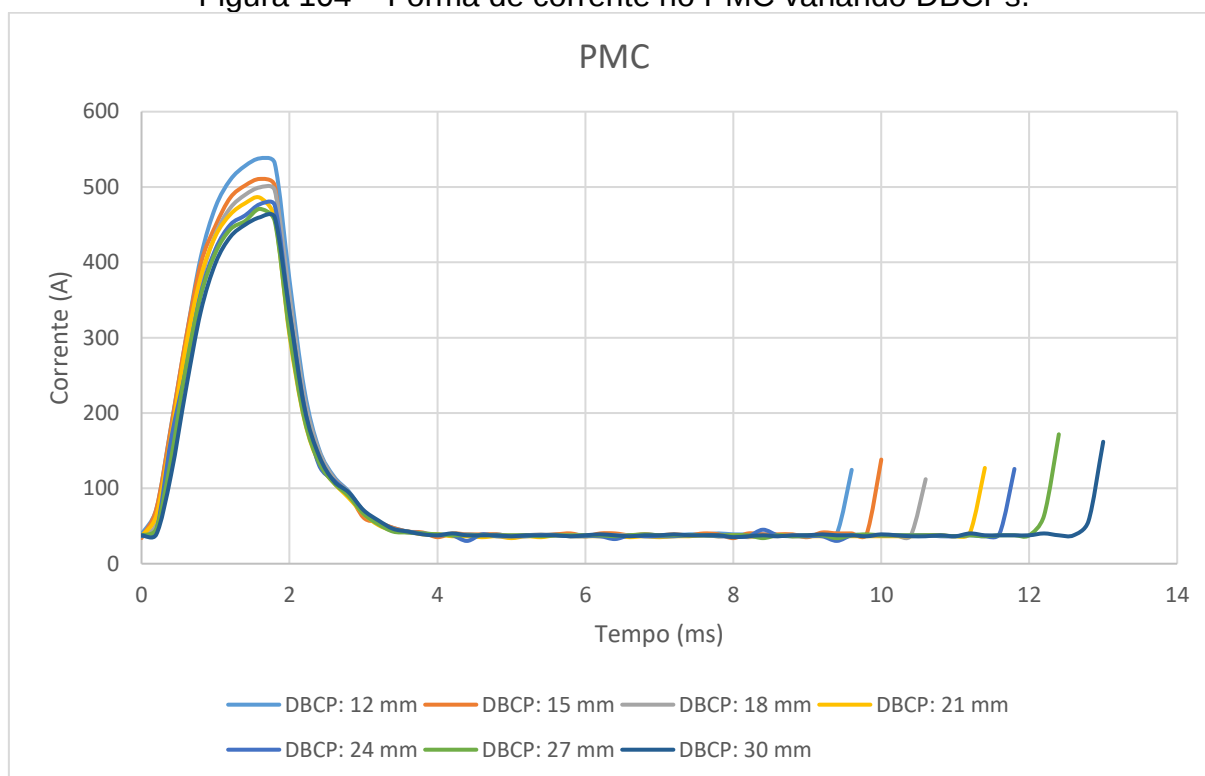
À medida que o período aumenta com o incremento da DBCP, a frequência de destacamento de gota diminui. Dessa forma, para uma mesma VA, o tamanho da gota aumenta sob a condição UGPP, desconsiderando-se as perdas por evaporação e por gotas secundárias.

Figura 103 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante PMC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 104 – Forma de corrente no PMC variando DBCPs.

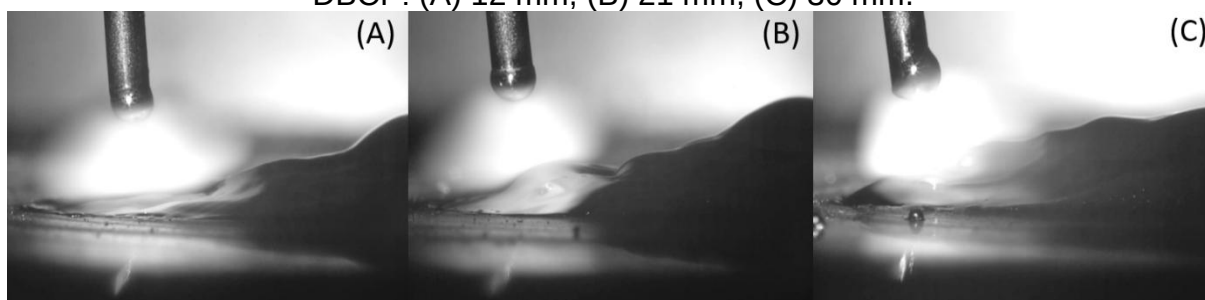


Fonte: Próprio autor.

É relevante ressaltar que, na condição de soldagem analisada, tanto a IM quanto a IE variam de forma significativa, afetando diretamente o aporte térmico e, em consequência, a penetração e a morfologia do cordão de solda, tornando menos molhado para maiores DBCP.

Ainda assim, a manutenção da VA tende a preservar a área da seção transversal do reforço do cordão, conforme mencionado no item 2.4. A análise das filmagens permitiu confirmar a condição UGPP e a robustez do processo nas três DBCP estudadas. Verificou-se que o comprimento de arco (Figura 105) pouco se altera em função do controle de tensão aplicado.

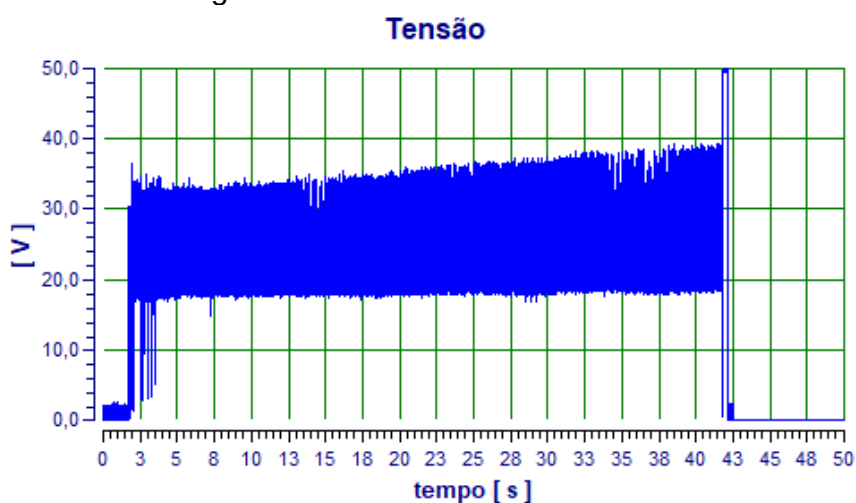
Figura 105 – Comprimento do arco na variante PMC no início do pulso de corrente.
DBCP: (A) 12 mm, (B) 21 mm, (C) 30 mm.



Fonte: Próprio autor.

O comprimento do arco mantém-se reduzido, sem ocorrência de curto-circuito acidental, conforme observado na Figura 106. Verificaram-se apenas incidência de eventos de curto-circuito quando a DBCP se aproxima de 10 mm.

Figura 106 – Oscilograma de tensão variando DBCP na variante PMC.



Fonte: Próprio autor.

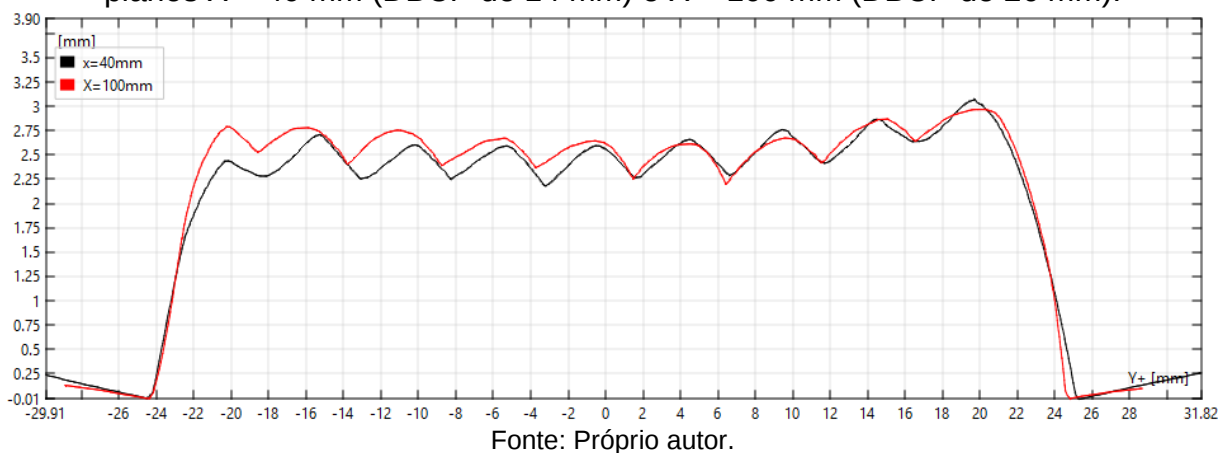
O índice de acertos para o PMC foi avaliado considerando as simplificações mencionadas em 4.1.4, porém com o período de tempo analisado com duração de 1 segundo na DBCP em análise. A Tabela 17 apresenta os limites inferiores e superiores do índice de acertos.

Tabela 17 – Intervalo de confiança do índice de acertos no PMC variando DBCP.

DBCP (mm)	Ciclos bem-sucedidos (k)	Total de ciclos (n)	Fração amostral de acertos- $\hat{p}$ (%)	Limite inferior (%)	Limite superior (%)	Crítérios
12	106	106	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-\hat{p}) < 5$
15	103	103	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-\hat{p}) < 5$
18	98	98	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-\hat{p}) < 5$
21	91	91	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-\hat{p}) < 5$
24	87	87	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-\hat{p}) < 5$
27	83	83	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-\hat{p}) < 5$
30	80	80	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-\hat{p}) < 5$

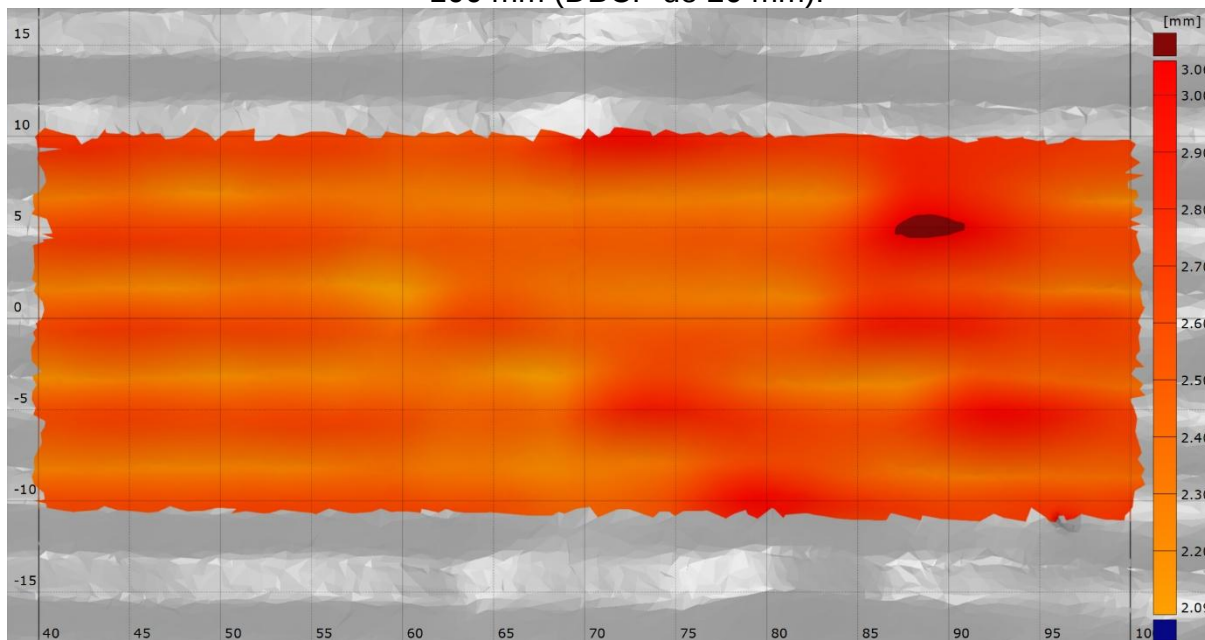
Fonte: Próprio autor.

A Figura 107, mostra a superfície nas regiões com diferentes DBCP. Nota-se uma altura média ligeiramente maior na região correspondente à DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm) em comparação à região de DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm). A Figura 108 apresenta o mapa de altura da superfície. A Tabela 18 detalha, para esta região, os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão, organizados em dois intervalos. Nota-se que a média das alturas pouco varia, uma vez que a quantidade de material depositado permanece equivalente, devido às VA e VS serem constantes.

Figura 107 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante PMC, nos planos $X = 40$ mm (DBCP de 14 mm) e $X = 100$ mm (DBCP de 26 mm).

Fonte: Próprio autor.

Figura 108 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 18 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante PMC, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).

Parâmetro	X = [40 a 70] mm	X = [70 a 100] mm
Altura Máxima	+2,94	+3,18
Altura Mínima	+2,09	+2,19
Altura Média	+2,45	+2,57
Desvio Padrão da Altura	+0,15	+0,20

Fonte: Próprio autor.

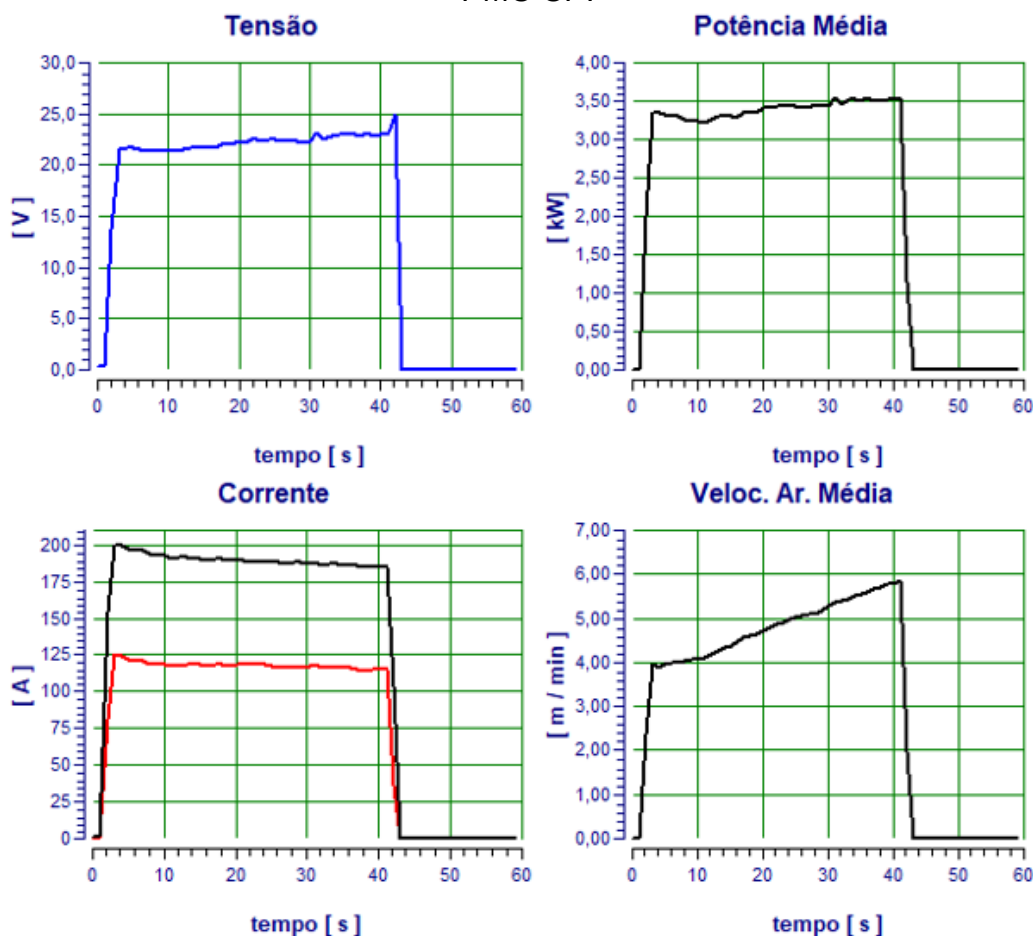
4.2.7 PMC CP

A Figura 109 apresenta as médias móveis da variante PMC CP, cujo objetivo é manter uma forma de onda de corrente constante, mantendo dessa forma os valores de IM e IE também constantes. A U média também se mantém aproximadamente constante, variando entre 21,4 V e 23 V no intervalo de 12 mm até 30 mm de DBCP. Pressupõe-se que o controle de U seja realizado de forma similar ao descrito no item 2.5, no qual, para preservar o comprimento do arco aproximadamente constante em fontes de IM constante, faz-se necessária a utilização de um controle externo. Nesse

caso, esse controle externo ocorre por meio da retroalimentação do motor do sistema de alimentação de arame.

À medida que a DBCP aumenta, o arco tende a crescer na mesma magnitude e L tende a se manter constante, uma vez que a fonte impõe IM constante. Consequentemente, a U do arco se eleva em função do acréscimo da impedância elétrica pelo aumento do comprimento do arco. Dessa forma, um dispositivo eletrônico compara a U medida com uma U de referência, previamente definida antes do acréscimo da DBCP, que corresponde à referência do comprimento de arco estabelecida pelo algoritmo de controle. Se a U medida ultrapassar o valor de referência, o sistema aumenta a VA até restabelecer a U de referência, assegurando, assim, a manutenção do comprimento do arco. Tal ajuste é necessário para adequar a taxa de fusão à nova extensão livre do eletrodo, resultando em maior aquecimento por efeito Joule para uma mesma IM e mesma IE . Com isso, a equação (8) é satisfeita, mantendo-se IM e IE constantes e U média aproximadamente constante, enquanto a VA pode variar livremente em função de L para a manutenção do comprimento de arco.

Figura 109 – Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante PMC CP.



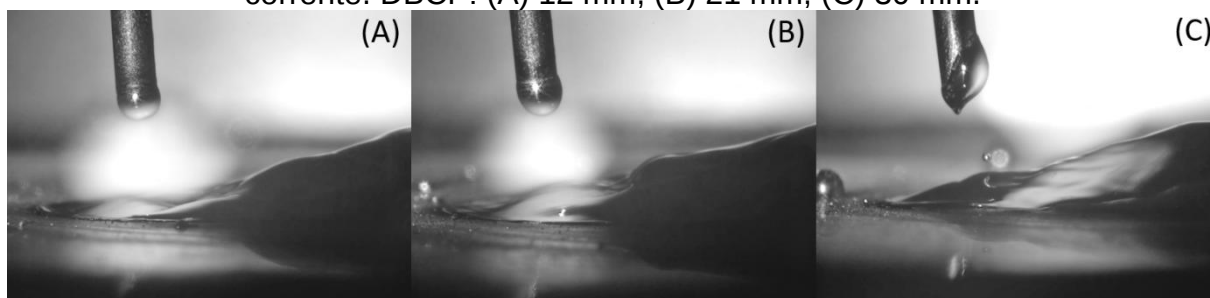
Fonte: Próprio autor.

Acredita-se que a busca por U média e IM constantes representa uma tentativa, conforme mencionado no item 2.6, de manter a geometria do arco (comprimento e ancoramento do arco na peça), bem como o aporte térmico na região de queda de tensão catódica, constantes. Esse pode ser o motivo do fabricante denominar esse procedimento de “Controle de Penetração” (CP). Entretanto, ao permitir a variação livre da VA, tal mecanismo de controle não mantém constantes as taxas de deposição de material e o tamanho da gota, parâmetros que influenciam na penetração e também a altura do reforço.

A variação irrestrita da VA, mantendo-se a VS constante, resulta na ausência de controle direto do operador sobre a quantidade de material depositado por comprimento de solda, dificultando a previsão do incremento de espessura em cordões paralelos sobrepostos, conforme indicado pela equação (10).

A análise das filmagens possibilitou confirmar a condição UGPP e a robustez do processo nas três DBCP avaliadas. Observou-se também que o comprimento do arco (Figura 110) pouco se altera em função do controle de U.

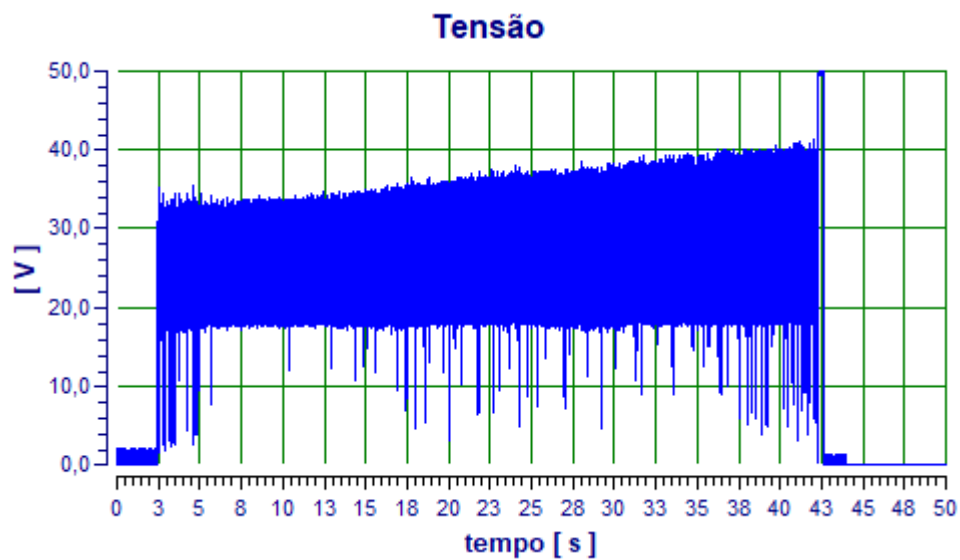
Figura 110 - Comprimento do arco na variante PMC CP no início do pulso de corrente. DBCP: (A) 12 mm, (B) 21 mm, (C) 30 mm.



Fonte: Próprio autor.

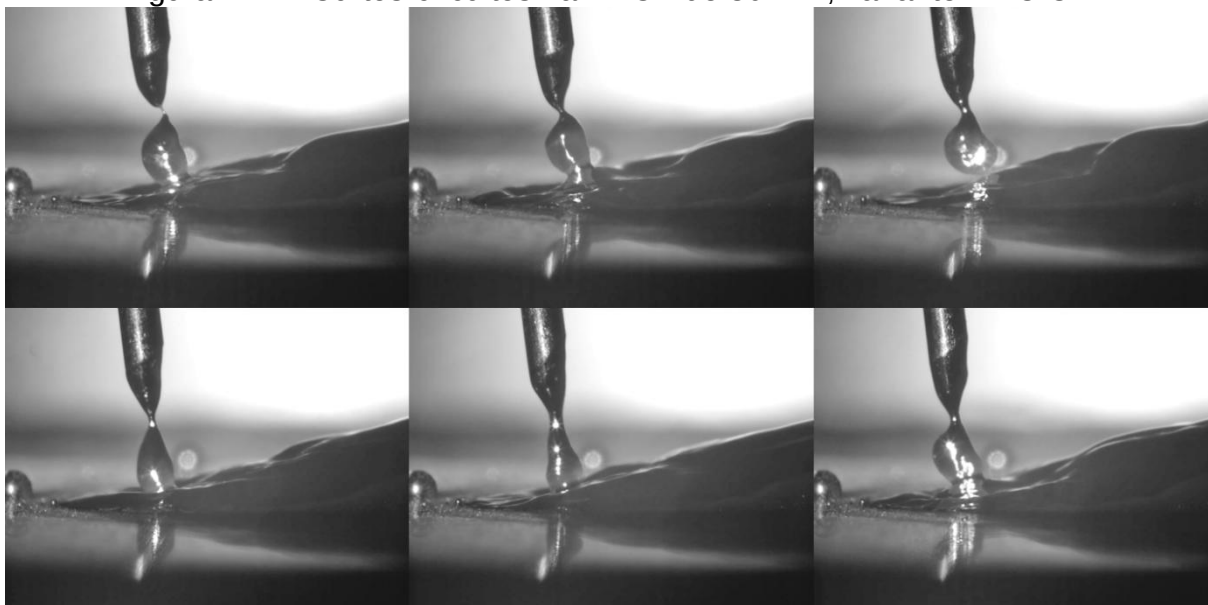
O comprimento do arco permanece reduzido e, em alguns casos, instabilidades manifestam-se sob a forma de curtos-circuitos acidentais (Figura 111), ocorrendo com maior frequência em DBCP próximas a 10 mm e a 30 mm (Figura 112). Os curtos-circuitos ocorrem sempre depois do pulso e a maioria no início da IB, na iminência de destacamento da gota.

Figura 111 – Oscilograma de U variando DBCP na variante PMC CP.



Fonte: Próprio autor.

Figura 112 – Curtos-circuitos na DBCP de 30 mm, variante PMC CP.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 19 apresenta os limites inferiores e superiores do índice de acertos com 95,45% de confiança.

Tabela 19 – Intervalo de confiança do índice de acertos no PMC CP variando DBCP.

DBCP (mm)	Ciclos bem-sucedidos (k)	Total de ciclos (n)	Fração amostral de acertos- $\hat{p}$ (%)	Limite inferior (%)	Limite superior (%)	Crítérios
12	100	103	97,09%	93,77%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$
15	103	103	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$
18	94	103	91,26%	85,70%	96,83%	Satisfeitos
21	95	104	91,35%	85,83%	96,86%	Satisfeitos
24	103	103	100,00%	100,00%	100,00%	Falha: $n(1-p^{\wedge}) < 5$
27	96	103	93,20%	88,24%	98,16%	Satisfeitos
30	72	103	69,90%	60,86%	78,94%	Satisfeitos

Fonte: Próprio autor.

Acredita-se que a alteração do recurso "estabilizador de comprimento de arco" de "auto" para outros valores possa reduzir a incidência de curtos-circuitos. Entretanto, conforme observado no cordão produzido, o modo "auto" não evitou os curtos-circuitos como seria desejado.

Conforme observado na Figura 113, verifica-se uma maior amplitude entre os picos e vales na região correspondente à DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm) em relação à região de DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm). A altura média é significativamente maior na região de DBCP de 26 mm ($X = 100$ mm) em comparação à região de DBCP de 14 mm ($X = 40$ mm). A Figura 114 e a Tabela 20 corroboram esse aumento na média das alturas devido ao incremento na VA em DBCPs maiores. A variante PMC CP foi a que apresentou a maior diferença entre as alturas médias.

Figura 113 - Perfis transversais das sobreposições de cordões na variante PMC, nos planos X = 40 mm (DBCP de 14 mm) e X = 100 mm (DBCP de 26 mm).

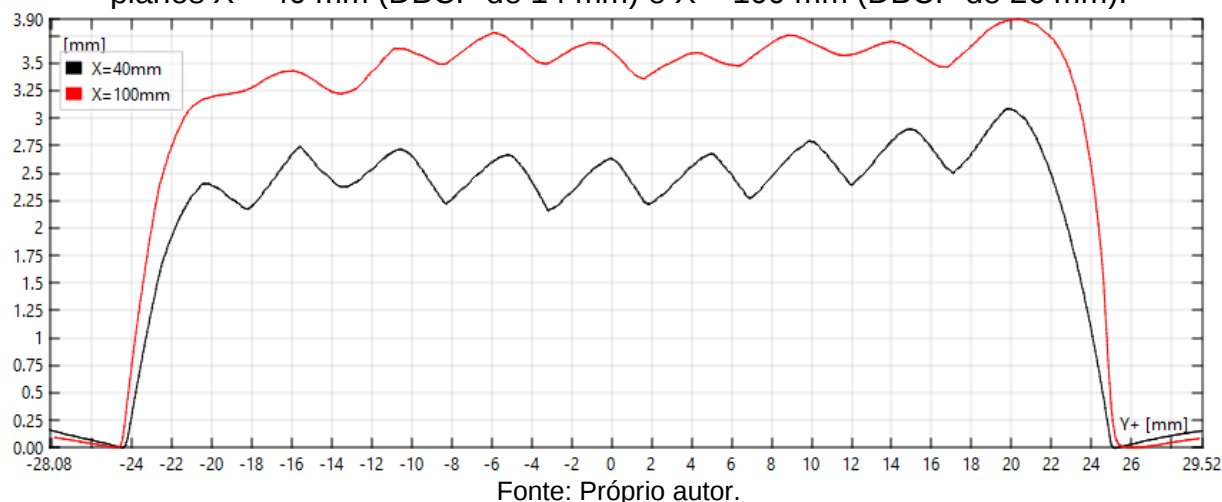


Figura 114 - Mapa de altura da superfície (eixo Z) das sobreposições de cordões na variante PMC, variando a DBCP linearmente de X = 40 mm (DBCP de 14 mm) até X = 100 mm (DBCP de 26 mm).

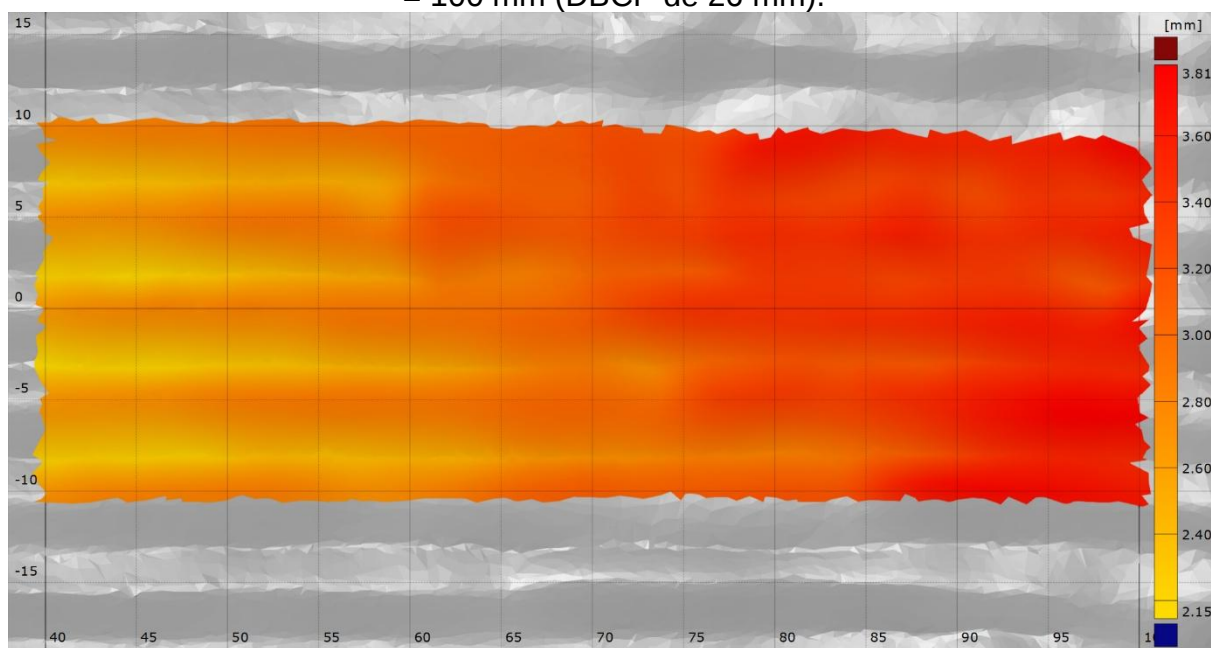


Tabela 20 – Valores de altura máxima, mínima, média e desvio padrão na variante PMC, considerando os intervalos de X entre 40 mm e 70 mm (DBCP variando de 14 mm a 20 mm) e entre 70 mm e 100 mm (DBCP variando de 20 mm a 26 mm).

Parâmetro	X = [40 a 70] mm	X = [70 a 100] mm
Altura Máxima	+3,21	+3,81
Altura Mínima	+2,15	+2,71
Altura Média	+2,69	+3,33
Desvio Padrão da Altura	+0,24	+0,23

Fonte: Próprio autor.

4.2.8 Pulsado com imposição de forma de onda de corrente

A variante pulsado com imposição de forma de onda de corrente, sem controle adaptativo, será denominado neste trabalho como pulsado convencional ou simplesmente pulsado. A fonte utilizada foi o modelo DIGIPLUS A7, da empresa IMC Soldagens, na qual se optou pela variante de corrente pulsada com forma de onda quadrada. Foram ajustados valores de VA, IP, tempo de pulso, IB e tempo de base.

No pulsado convencional, no funcionamento ideal, a forma de onda da corrente não se altera, assim como a VA. A fonte impõe a forma de onda parametrizada para a corrente, enquanto a tensão se ajusta livremente de acordo com a impedância total do arco e do eletrodo, conforme as condições de soldagem. Como se trata de uma fonte controlada em corrente, esperam-se comportamentos semelhantes aos descritos no item 2.7, nos quais a variação da DBCP pouco altera a extensão livre do eletrodo (L), mantendo-a aproximadamente constante, porém o comprimento do arco se modifica na mesma magnitude da variação da DBCP.

Não se empregou nenhum programa sinérgico ou adaptativo. Assim, para determinar os parâmetros da forma da corrente, ao buscar a condição de UGPP, tomou-se como base a forma de onda obtida no PMC com DBCP de 21 mm, valor intermediário entre os extremos de 12 mm e 30 mm, conforme discutido no item 4.2.6. Nesse contexto, foram fixados os seguintes valores:

- a) VA: 4,1 m/s;
- b) IP: 450 A;
- c) IB: 38 A; e
- d) Período = tempo de pulso + tempo de base = 11 ms.

A DBCP foi inicialmente ajustada em 21 mm, mantendo-se a VS em 30 cm/min. O tempo de pulso inicial, definido na fonte, foi de 2,2 ms, sendo incrementado em 0,1 ms até alcançar 2,7 ms. Após a realização de sete filmagens, a condição final selecionada foi um tempo de pulso de 2,5 ms e um tempo de base de 8,5 ms, resultando em UGPP ao final do pulso. Destaca-se que outras combinações de tempos também mantiveram a condição de UGPP, mas, por necessidade de se fixar um parâmetro, foram escolhidos os tempos supracitados.

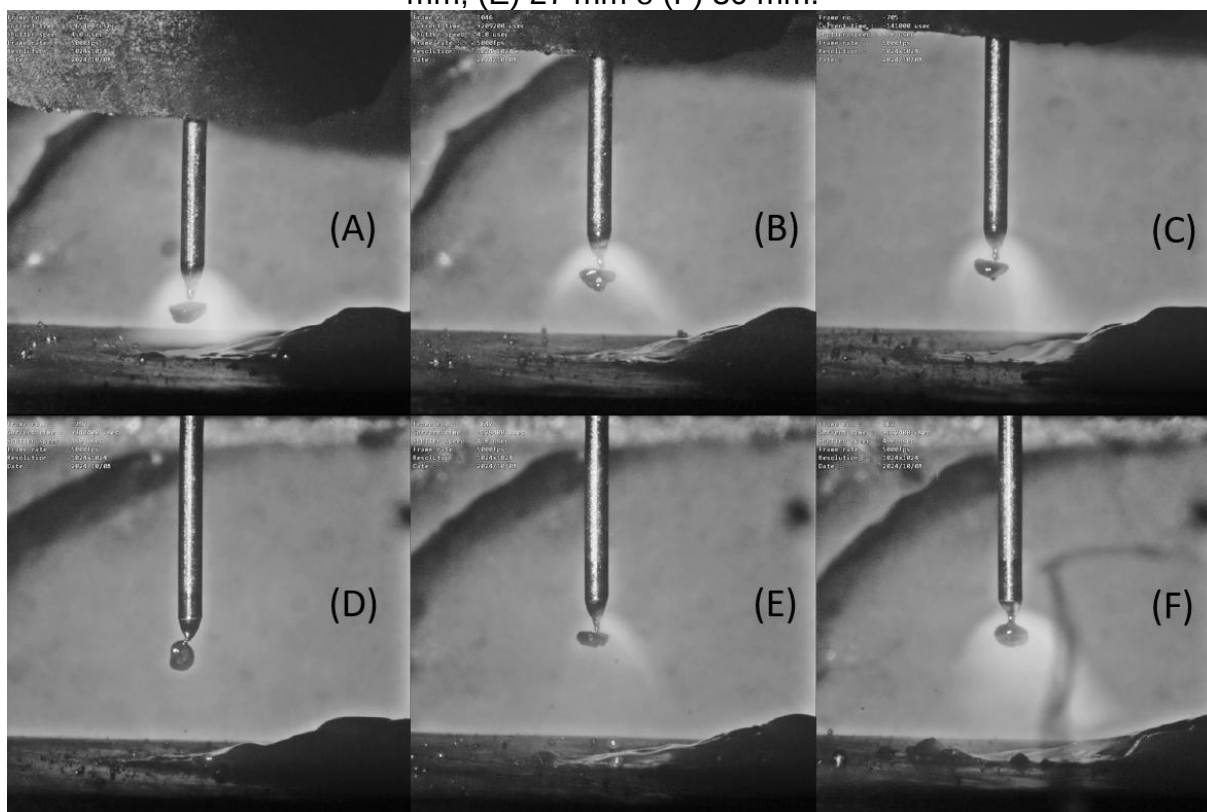
Estabelecida a forma de onda UGPP, novos cordões foram depositados e filmados, considerando-se DBCP de 12 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm (já verificada durante a regulação dos parâmetros), 24 mm, 27 mm e 30 mm.

Apesar de ser uma fonte de imposição de corrente, devido à resposta dinâmica e ao limite de potência do equipamento, não foi possível manter a mesma forma de onda para todas as DBCP. Ainda assim, a variação de IM e IE não foi tão acentuada quanto no PMC. Vale ressaltar que o esperado era que a forma de onda da corrente, a IM e a IE se mantivessem constantes ao longo das diferentes DBCP. Por outro lado, esperava-se que a U média e a potência apresentassem um aumento proporcional com o incremento da DBCP.

De modo geral, os comportamentos previstos para essa variante foram parcialmente observados. À medida que a DBCP aumentou, o comprimento do arco também se elevou (Figura 115). Na DBCP de 27 mm, a IP atingiu aproximadamente 400 A e, dentre os 11 pulsos analisados, 1 não manteve a condição UGPP, ocorrendo o destacamento no pulso subsequente. Na DBCP de 30 mm, a IP atingiu valores ligeiramente inferiores a 400 A e, dentre 11 pulsos analisados, 6 não mantiveram a UGPP, ocorrendo o destacamento apenas no pulso seguinte. Acredita-se que, caso a IP não tivesse sido reduzida, a condição UGPP teria sido preservada, mesmo com um comprimento de arco maior.

Com a diminuição da DBCP, o comprimento do arco foi reduzido. Nas DBCP de 15 mm, 18 mm e 21 mm, a transferência manteve-se estável, com 100% dos pulsos na condição UGPP e todos com IP em 450 A. Entretanto, devido à resposta dinâmica da fonte, as correntes média e eficaz variaram levemente, conforme indicado na Tabela 21 e na Figura 116.

Figura 115 - Comprimento do arco na variante pulsado convencional no desprendimento de gota, para DBCPs: (A) 15 mm, (B) 18 mm, (C) 21 mm, (D) 24 mm, (E) 27 mm e (F) 30 mm.



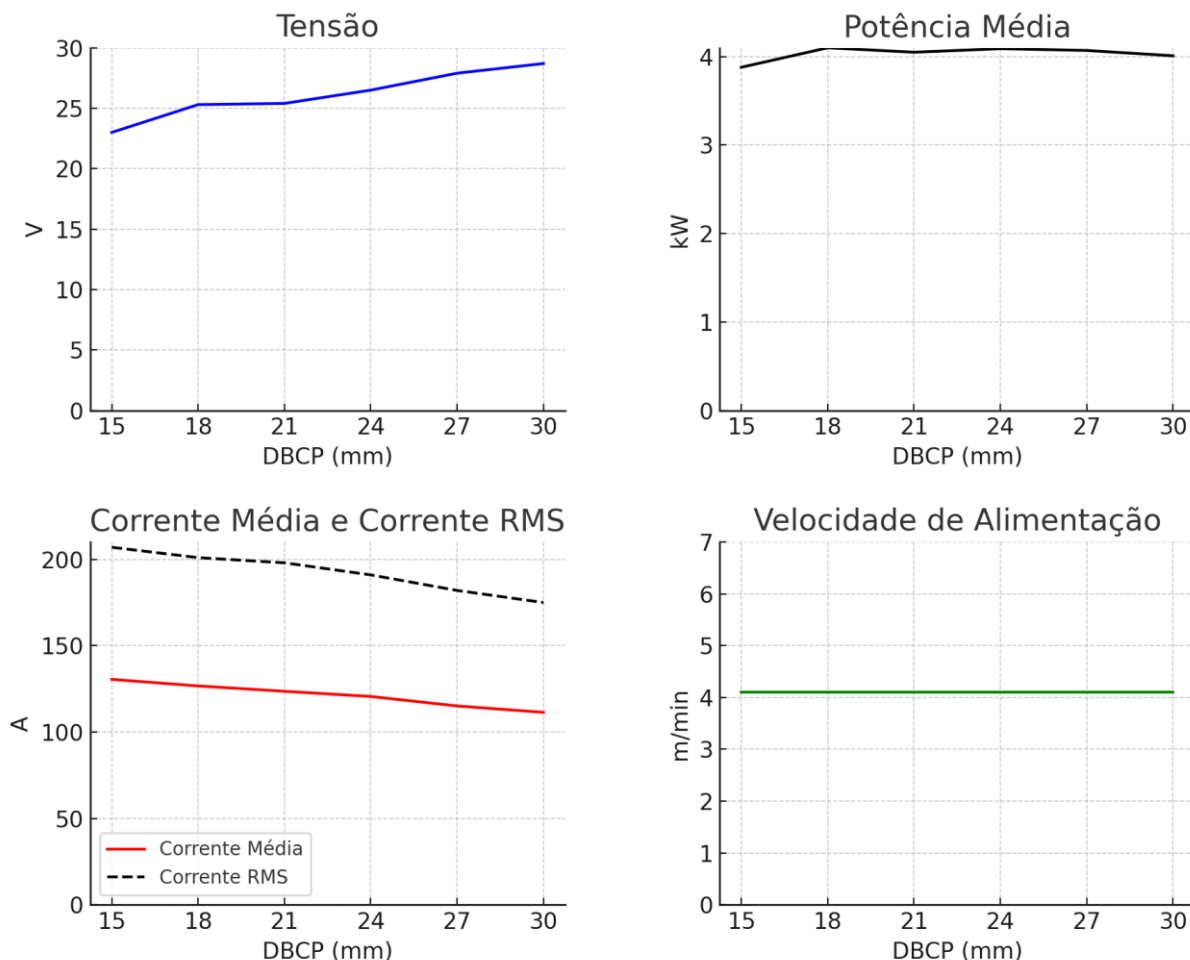
Fonte: Próprio autor.

Tabela 21 - Parâmetros em função da DBCP na variante Pulsado Convencional.

DBCP (mm)	U_m (V)	IM (A)	IE (A)	VA (m/min)	P (kW)
15	23	130,5	207	4,1	3,88
18	25,3	126,7	201	4,1	4,1
21	25,4	123,6	198	4,1	4,05
24	26,5	120,6	191	4,1	4,09
27	27,9	115,1	182	4,1	4,07
30	28,7	111,4	175	4,1	4,01

Fonte: Próprio autor.

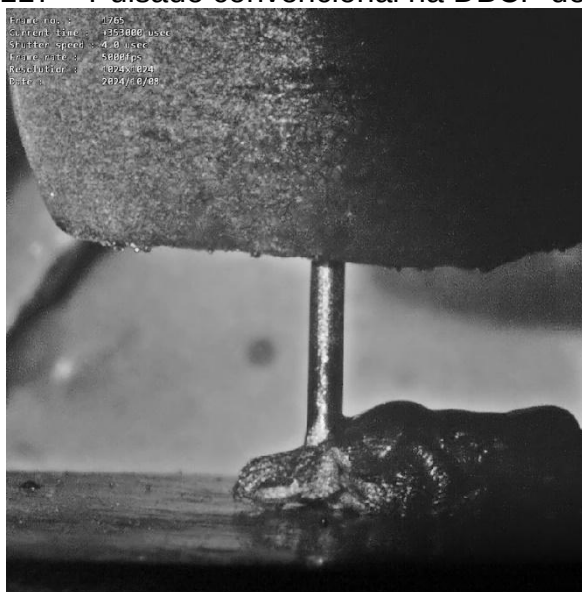
Figura 116 - Médias móveis de 1 segundo variando DBCP (10 a 30 mm) na variante pulsado convencional.



Fonte: Próprio autor.

Na DBCP de 12 mm, o arame toca a peça, sem conseguir fundir o material (Figura 117), antes de conseguir abrir o arco. Tal fato ocorre por dada a VA, IM e IE, a equação (8) de taxa de consumo de arame resulta em comprimento de eletrodo próximo ou maior que a DBCP, não conseguindo abrir o arco e equalizar a VA com taxa de fusão de arame.

Figura 117 – Pulsado convencional na DBCP de 12 mm.



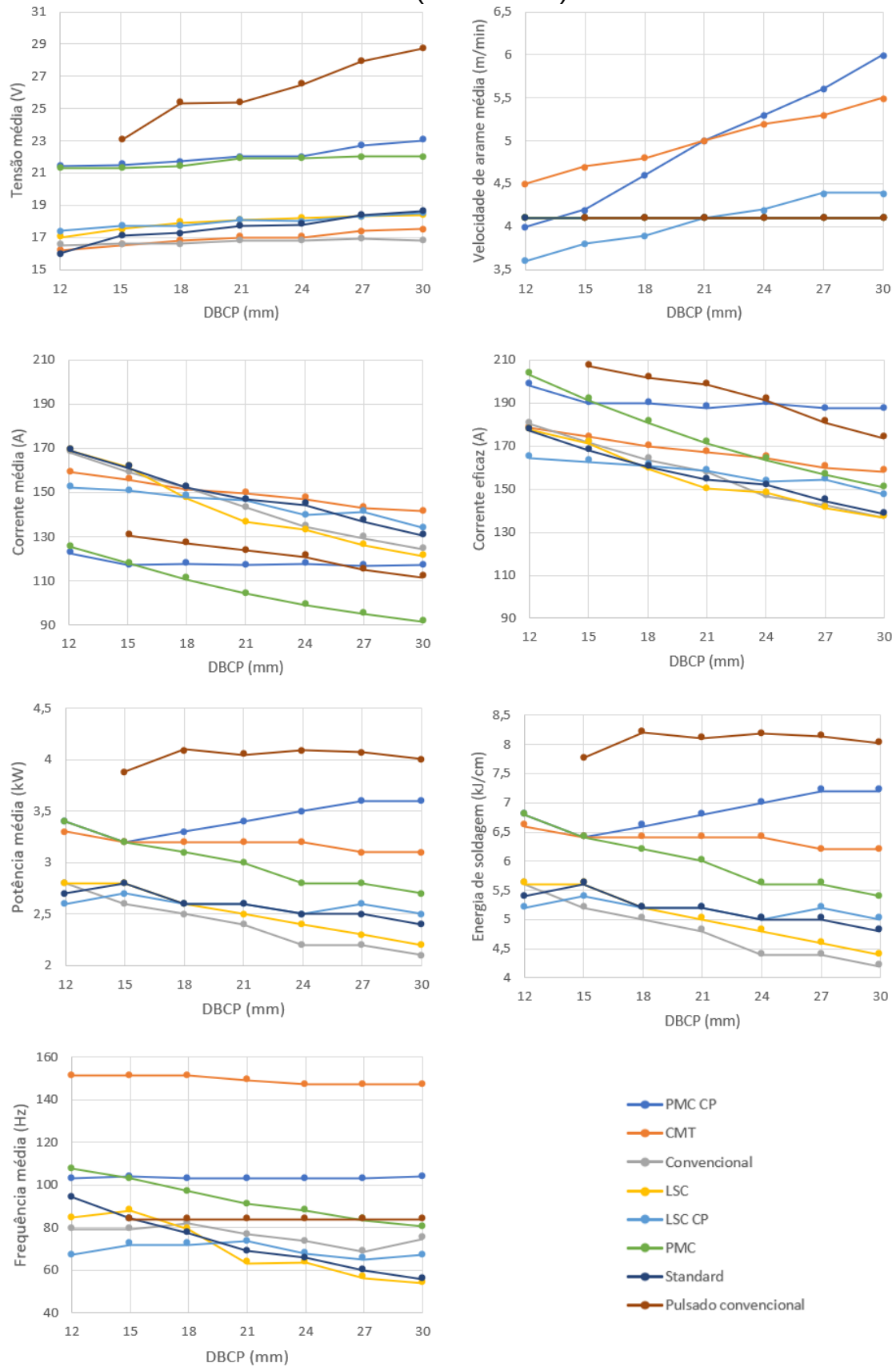
Fonte: Próprio autor.

Dada a incapacidade de a fonte abrir o arco em DBCP iguais ou menores que 12 mm, não foi feito cordão sobre chapa variando a DBCP de 10 mm a 30 mm, mas as análises dos parâmetros elétricos foram feitas em cordões individuais.

4.2.9 Resumo comparativo

Os parâmetros médios foram compilados para todas as variantes nos gráficos da Figura 118.

Figura 118 - Comparação de parâmetros em diferentes variantes MIG/MAG variando a DBCP (10 a 30 mm).



Fonte: Próprio autor.

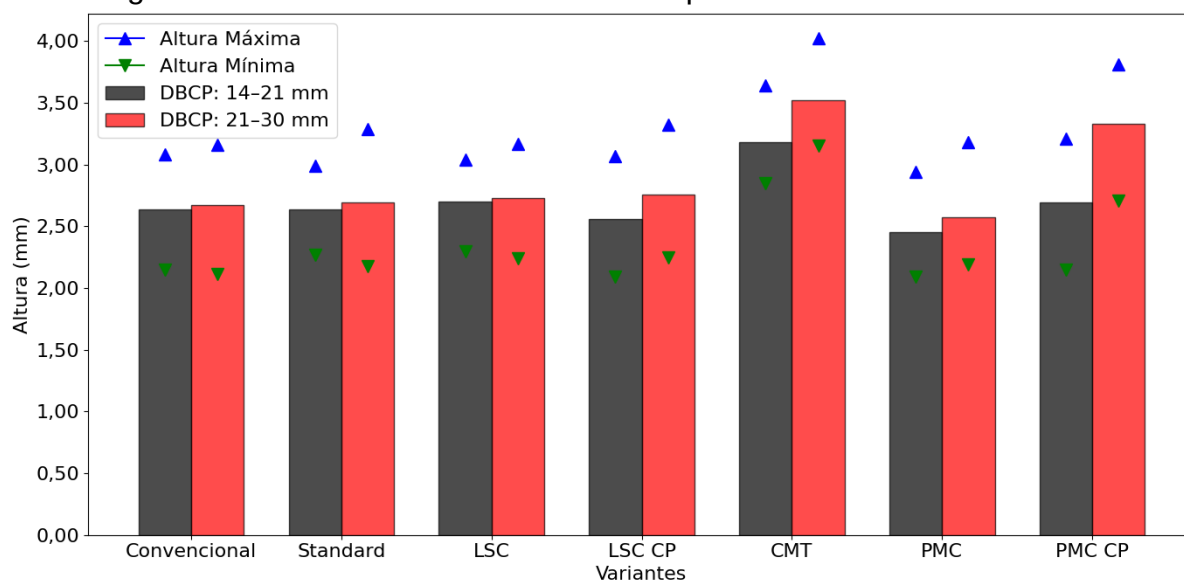
Acredita-se que as principais diferenças entre as distintas variantes, quando se varia a DBCP, são:

- a) **Tensão (U) média:** A maioria das variantes apresenta variação reduzida da U média ao se aumentar a DBCP, indicando possível controle desse parâmetro. O pulsado convencional exibe maiores variações de U média com o incremento da DBCP devido à imposição de forma de onda de corrente fixa.
- b) **Velocidade de alimentação de arame (VA):** As variantes CMT, PMC CP e LSC CP não mantêm a VA constante, resultando em variação da taxa de deposição com o aumento da DBCP. As demais variantes mantêm a VA constante, apresentando comportamento mais previsível em relação à taxa de fusão do arame.
- c) **Corrente média (IM) e Corrente eficaz (IE):** De modo geral, o aumento da DBCP tende a reduzir a IM e a IE em todas as variantes, exceto o PMC CP e Pulsado convencional. No Pulsado convencional, a resposta dinâmica e o limite de potência do equipamento impactaram diretamente a forma de onda da corrente, resultando em variações nos valores de IM e IE – um comportamento não previsto inicialmente.
- d) **Potência média (P) e Energia de soldagem (ES):** A potência média e energia de soldagem geralmente diminuem com o aumento da DBCP, indicando menor aporte térmico ao longo dos cordões quando a distância aumenta. As variantes PMC CP, LSC CP e CMT parecem controlar este parâmetro ainda que apresentando variações.
- e) **Frequência de destacamento:** As variantes CMT, PMC CP e Pulsado Convencional mantêm a frequência de destacamento estável, enquanto as demais variantes apresentam uma redução na frequência média à medida que a DBCP aumenta.

Na Figura 119 estão reunidos os dados das distâncias medidas nas superfícies das sobreposições para as diversas variantes testadas. Vale destacar que os valores devem ser interpretados com cautela, pois não consideram a deformação da chapa. Se essa deformação fosse considerada, as distâncias seriam levemente superiores. A análise das médias revela uma tendência, as variantes que não mantêm a VA fixa tendem a depositar mais material em faixas de DBCP mais amplas, e essa diferença é maior no caso do PMC CP. Nos processos CMT e PMC CP os resultados sugerem maior dificuldade na estimativa da espessura.

De forma geral, todas as variantes se sobressaíram no objetivo de aumentar a espessura, cada uma apresentando suas particularidades.

Figura 119 - Distância média e extremos por variante e faixa de DBCP.

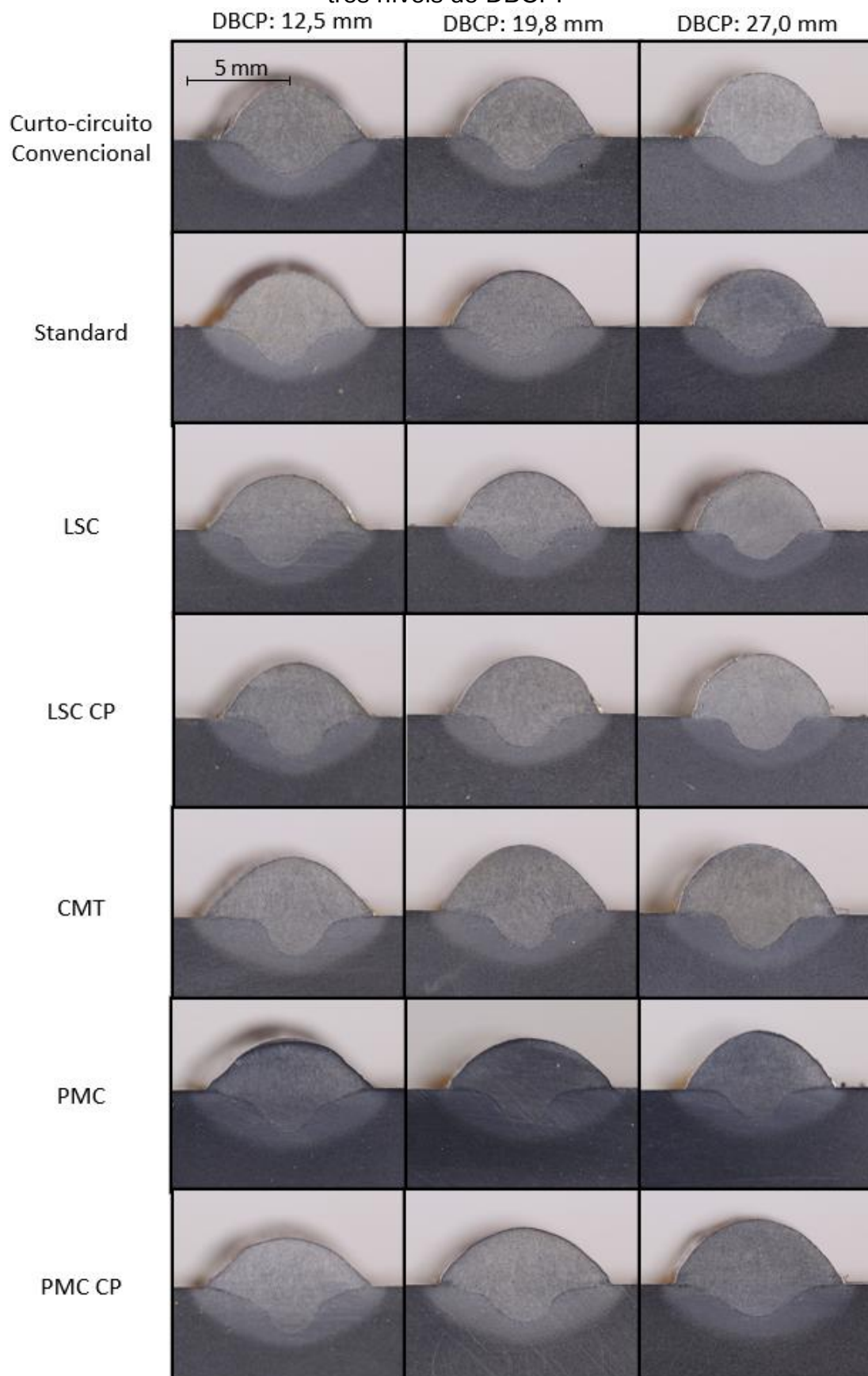


Fonte: Próprio autor.

4.2.10 Macrografias

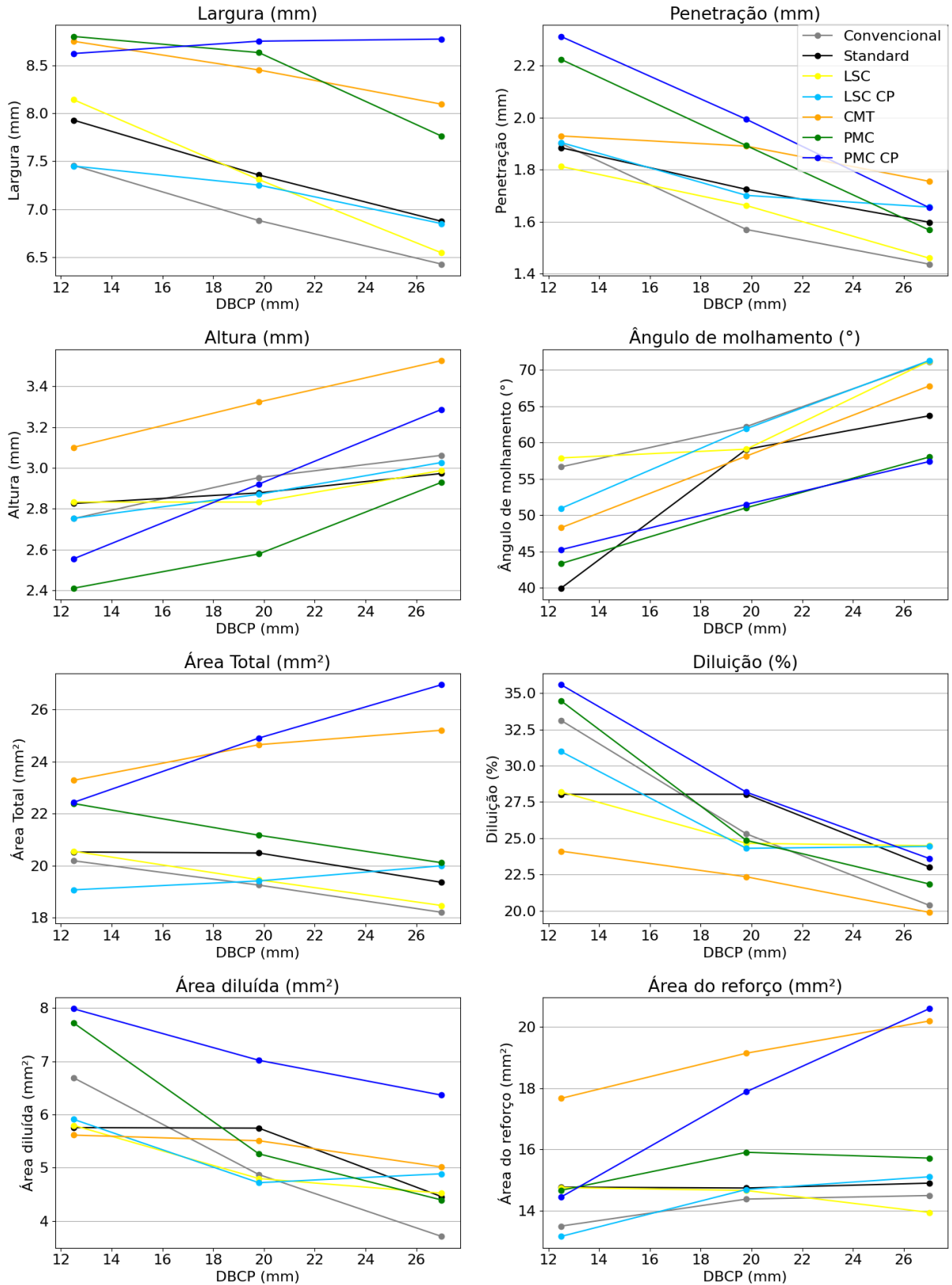
A Figura 120 apresenta as macrografias das seções transversais das variantes para os três níveis de DBCP (12,5; 19,8; e 27 mm), a partir das quais foram extraídos os valores utilizados na elaboração dos gráficos comparativos apresentados na Figura 121.

Figura 120 – Macrografias das seções transversais das variantes apresentadas para três níveis de DBCP.



Fonte: Próprio autor.

Figura 121 – Gráficos comparativos das características geométricas das seções transversais das variantes em função da DBCP.



Fonte: Próprio autor.

Considerando que os dados foram obtidos a partir de uma única amostra para cada condição, as análises devem ser interpretadas como tendências ou hipóteses preliminares, com a possibilidade de erros aleatórios. As principais tendências observadas foram:

- a) **Largura (mm):** A maioria das variantes (Convencional, Standard, LSC, LSC CP, CMT e PMC) apresenta uma diminuição na largura dos cordões com o aumento da DBCP. A variante PMC CP manteve praticamente a mesma largura ($8,6 \rightarrow 8,8 \rightarrow 8,8$ mm), possivelmente em função do aumento na VA, que contribuiu para uma maior deposição de material.
- b) **Penetração (mm):** Em todas as variantes, verifica-se uma redução consistente da penetração com o aumento da DBCP.
- c) **Altura (mm):** Os dados demonstram uma tendência geral de aumento da altura dos cordões à medida que a DBCP aumenta. Essa relação é compatível com a expectativa de que a deposição de uma camada mais espessa resulte em cordões mais altos.
- d) **Ângulo de Molhamento (°):** O ângulo de molhamento tende a aumentar com a DBCP.
- e) **Área Total (mm²):** O comportamento da área total varia entre as variantes. Enquanto as variantes Convencional, Standard, LSC e PMC apresentam uma tendência à redução da área total com o aumento da DBCP, as variantes LSC CP, CMT e PMC CP exibem o comportamento inverso, com um aumento. Esse padrão provavelmente está relacionado ao acréscimo da VA e ao controle da potência com o aumento da DBCP.
- f) **Diluição (%):** Os gráficos indicam que a diluição diminui à medida que a DBCP aumenta, independentemente da variante.
- g) **Área diluída (mm²):** A maioria das variantes mostra uma tendência decrescente na área diluída com o aumento da DBCP.
- h) **Área do Reforço (mm²):** Em quase todas as variantes, a área do reforço tende a aumentar conforme a DBCP é incrementada. Essa variação geralmente está associada à perda de material por respingos e vaporização metálica, efeitos diretamente relacionados à corrente de soldagem. Nas variantes LSC CP, CMT e PMC CP, o aumento da área

do reforço está mais associado ao incremento da VA ao se aumentar a DBCP.

Dessa forma, os dados apresentados na Figura 121 sugerem que o aumento da DBCP favorece a obtenção de cordões com menor penetração e área diluída, bem como com maior altura e ângulo de molhamento.

Ao analisar os dados de penetração e área fundida do metal de base, observa-se que esses valores não se mantiveram constantes, ou próximos, à medida que a DBCP foi aumentada, mesmo nas variantes com recurso de “controle de penetração” ativado, caso das variantes LSC CP e PMC CP. É importante ressaltar que os valores de penetração dessas variantes foram avaliados em apenas uma condição de VA e VS, o que pode indicar que os controles de penetração poderiam apresentar um desempenho superior sob outras condições.

Os resultados obtidos levantam questionamentos quanto à eficácia de se conseguir manter a penetração constante através do controle e da manutenção do comprimento do arco e corrente média em valores constantes, ao se variar a DBCP. Acredita-se que o aumento da VA nesses controles resulte em uma taxa de deposição mais elevada e em uma interposição maior da poça entre o arco e a peça, contribuindo para a tendência em redução da penetração.

5 OBSERVAÇÕES GERAIS

Nas análises realizadas com a variação da velocidade de alimentação (VA), as principais observações foram:

- a) O LSC apresentou eficácia limitada no controle da transferência metálica, com comportamento errático em VA de 5,9 m/min e transferência em voo livre em VA de 8,3 m/min, indicando baixa precisão do algoritmo de controle;
- b) A variante Standard demonstrou instabilidades significativas, como repulsão da gota e rompimento prematuro da ponte metálica, alto desvio padrão relativo dos períodos de transferência, indicando alta variabilidade no tamanho das gotas;
- c) As variantes LSC e Standard operaram em transferência por voo livre a partir de VA de 8,3 m/min, com limitações de controle em VA intermediárias (5,9 m/min), sugerindo a necessidade de ajustes finos para melhorar a estabilidade;
- d) O CMT manteve transferência por contato mesmo em VA elevadas (até 11 m/min) e IM acima da faixa de transição (~ 260 A), com frequência estável (~ 150 Hz) em diferentes VA, deposição uniforme e praticamente nenhum respingo;
- e) A limitação máxima de VA no CMT (11 m/min) parece relacionada às frequências máximas no controle mecânico do arame.
- f) No PMC, a IE superou significativamente a IM, com correntes de pulso até 14 vezes maiores que a corrente de base, resultando em relevante consumo de arame por efeito Joule e permitindo maiores VA para uma mesma IM;
- g) O PMC atingiu VA elevadas (até 14,6 m/min) e apresentou robustez na manutenção da condição UGPP. A VA pareceu limitada principalmente pela potência da fonte, não uma limitação da variante;
- h) O PMC atingiu frequências de destacamento de até 270 Hz em VA de 14,6 m/min, porém apresentou irregularidades morfológicas nos cordões em VA acima de 12,5 m/min;
- i) O CMT exibiu energia de soldagem inferior às demais variantes em VA elevadas, mas superior em VA baixas, sugerindo que a energia de soldagem está associada à VA;

- j) A comparação entre as variantes destacou que CMT e PMC apresentaram superfícies mais regulares e respingos insignificantes, enquanto LSC e Standard tiveram amplitudes maiores e maior geração de respingos, especialmente em condições instáveis;
- k) A robustez da transferência metálica no CMT parece estar vinculada à inversão da VA instantânea e à dependência reduzida do efeito pinch para destacamento da gota enquanto que a robustez do PMC depende da combinação de altas correntes de pulso e tempos de pulso curtos para manter a condição UGPP.

Nas análises realizadas com a variação da DBCP, as principais observações foram:

- a) Observou-se que o aumento progressivo da DBCP, em todas as variantes que mantêm a U e VA constante, tende a reduzir a IM ao longo do cordão, devido ao incremento do comprimento livre do eletrodo e consequente elevação da resistência elétrica;
- b) A variante LSC CP demonstrou que o acréscimo da VA suaviza a queda de IM e ajuda a manter a potência média estável, resultando em maior deposição de material à medida que a DBCP se eleva, aumentando a área média do reforço;
- c) No processo CMT, a fonte manteve U, IM e potência com pouca variação através do aumento da VA, resultando de forma evidente uma maior área do reforço em DBCP elevada. A superfície se mostrou bastante uniforme;
- d) A variante PMC mantém tanto a VA quanto a U médias praticamente constantes, o que sugere um controle automático de tensão pela fonte, permitindo que, mesmo com a variação da DBCP, ocorram poucas oscilações no comprimento do arco. Como desvantagem, não mantém corrente média constante como no GMAW-P com forma de onda de corrente constante;
- e) Visando preservar a condição UGPP, o PMC modifica a forma de onda da corrente (redução de corrente de pulso e aumento do tempo de base), reduzindo frequência de destacamento, IM e IE com o aumento

da DBCP. A redução da IM e IE foi a mais acentuada dentre as variantes analisadas;

- f) O PMC CP impõe forma de onda de corrente constante de forma similar ao GMAW-P convencional, mantendo IM e IE constantes. Buscando manter também o comprimento de arco constante, através do monitoramento de tensão, a DBCP mais elevada acarreta elevação automática da VA para compensar o acréscimo de consumo de arame por efeito Joule. Resulta então em maior taxa de fusão ao aumentar a DBCP, consequentemente, gerando maiores áreas do reforço;
- g) As macrografias revelaram uma redução consistente na penetração e na área diluída, além de um aumento na altura do reforço à medida que a DBCP era elevada em todas as variantes. Mesmo as variantes com o mencionado “controle de penetração” não conseguiram manter a penetração constante, levantando questionamentos quanto à eficácia de se conseguir manter a penetração constante através do controle e da manutenção do comprimento do arco e corrente média em valores constantes, ao se variar a DBCP;
- h) O ângulo de molhamento aumentou com a elevação da DBCP em todas as variantes, denotando cordões mais convexos, aspecto que deve ser levado em consideração nas aplicações que buscam aumento de espessura;
- i) Variantes como a CMT, LSC CP e a PMC CP mostraram maior dificuldade de prever a espessura final das sobreposições de cordões, pois a VA não permanece fixa;
- j) A energia de soldagem diminuiu com o aumento da DBCP, exceto nas variantes com variação ativa de VA (CMT, LSC CP, PMC CP).

6 CONCLUSÕES

Uma equação foi definida relacionando os parâmetros de soldagem — velocidade de soldagem (VS), velocidade de alimentação de arame (VA) e espaçamento entre cordões — necessários para alcançar um incremento de espessura pré-determinado em chapas planas, considerando perdas por respingos e vaporização. Essa equação, baseada na relação entre a massa do metal de adição depositada e a massa total da espessura acrescentada, atende ao objetivo de definir critérios para a seleção de parâmetros de soldagem visando aumentos de espessura específicos.

Em baixas velocidades de alimentação de arame (VA), as variantes Standard, LSC, CMT e PMC conseguiram aumentar a espessura das chapas, porém com desempenhos distintos em estabilidade, morfologia dos cordões e qualidade da superfície final. O CMT e o PMC se destacaram por produzir superfícies mais regulares e deposições com menos respingos, evidenciando maior controle da transferência metálica em comparação com a variante Standard, que apresentou alta irregularidade e geração de respingos devido a instabilidades na transferência metálica, e com o LSC, que também exibiu superfícies menos uniformes e maior sensibilidade a variações nas VA. Essas diferenças iniciais sugerem que, em baixas VA, o CMT e o PMC possuem vantagens claras em termos de acabamento e robustez no controle, enquanto Standard e LSC demandariam ajustes adicionais para atingir melhores resultados.

Ao analisar as características específicas de cada variante, as distinções se tornam ainda mais evidentes. A variante Standard sofreu com instabilidades na transferência metálica significativas. A variante LSC, por outro lado, apresentou controle limitado, com maiores instabilidades ao aumentar a VA para 5,9 m/min, com comportamento errático que possivelmente dependeriam de ajustes finos nas variáveis secundárias da fonte, como correção do comprimento do arco, para melhorar sua estabilidade — algo menos necessário no CMT e no PMC. O CMT mostrou um controle robusto da transferência metálica, mantendo a transferência por contato mesmo em VA elevadas (até 11 m/min) e corrente média acima da faixa de transição (~260 A), resultando em deposição uniforme, ausência de respingos e frequência estável na ordem de 150 Hz. Já o PMC demonstrou eficiência na transferência por voo livre em VA ainda mais altas (até 14,6 m/min), mantendo a condição Uma Gota

Por Pulso (UGPP), embora tenha exibido irregularidades morfológicas em VA acima de 12,5 m/min.

Outro aspecto relevante na comparação entre as variantes é a energia de soldagem. Em altas VA, a variante CMT se sobressaiu com menor energia de soldagem em comparação com Standard, LSC e PMC, o que tende a reduzir deformações térmicas nas chapas — uma característica importante para aplicações de aumento de espessura. O PMC, embora eficiente em altas VA, resultou em maior energia de soldagem, podendo ser menos ideal em situações onde a minimização de deformações é prioritária.

Finalmente, os controles de penetração (CP) disponíveis nas variantes LSC e PMC foram avaliados e mostraram-se ineficazes em manter a penetração constante com a variação da Distância Bico de Contato Peça (DBCP), na condição analisada.

Em síntese, para o aumento de espessura em chapas de aço ASTM A36 com foco em recuperação ou reparo na indústria naval, a variante CMT se destaca como a variante mais promissora entre as analisadas. De uma forma geral, seu controle robusto da transferência metálica, deposição uniforme, ausência de respingos e menor energia de soldagem — que minimiza deformações térmicas — superam os desempenhos observados nas variantes Standard, LSC e PMC, tornando-o uma escolha preferencial para esse tipo de aplicação.

7 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Este trabalho constitui uma base sólida para a compreensão dos princípios de funcionamento, das vantagens e, especialmente, das limitações das variantes avançadas do processo MIG/MAG aqui apresentadas, direcionadas à aplicação na recuperação ou no aumento de espessura de chapas de embarcações. As investigações dessas variantes avançadas terão continuidade no LABSOLDA, aprofundando o conhecimento e o domínio dessas tecnologias. Nesse contexto, algumas sugestões para pesquisas futuras incluem:

- a) Estudar a influência das distâncias entre cordões na superfície final;
- b) Verificar a influência da posição de soldagem refazendo os estudos nas posições vertical, horizontal e sobre-cabeça;
- c) Conduzir ensaios não destrutivos para quantificar e caracterizar descontinuidades presentes nas peças;
- d) Analisar a influência de diferentes tipos de gases de proteção nas variantes apresentadas;
- e) Analisar os recursos de controle de penetração em diferentes velocidades de soldagem;
- f) Investigar a influência dos ajustes secundários de cada variante, como os controles de "correção do comprimento do arco" e "correção dinâmica", no comportamento do processo.

REFERÊNCIAS

CUIURI, Dominic. **Control of the short-circuit gas metal arc welding process using instantaneous current regulation**. 2000. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of Wollongong, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, Wollongong, 2000.

GALEAZZI, Daniel. **Desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura aditiva por deposição a arco usando a variante GMAW com alimentação dinâmica CMT**. 2024. 278 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2024.

DUTRA, Jair Carlos. **Ciência e Tecnologia da soldagem a Arco Voltaico: Dos Fundamentos às Modernas Técnicas**. 1ª ed. Florianópolis, SC: Editora Alfa Centauri Ltda., 2023.

FRONIUS. **PMC - Fronius welding processes**. Disponível em: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/pmc>. Acesso em: 11 abr. 2024.

FRONIUS DO BRASIL. **Webinar: processos de soldagem Fronius – PMC e TPS/i**. YouTube, 07 jul. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KAwHhY6rVGQ&t=2403s>. Acesso em: 11 abr. 2024.

IACS. **Guidelines for coating maintenance & repairs for ballast tanks and combined cargo/ballast tanks on oil tankers**. Recommendation 87. June 2004/Rev.1 June 2006/Rev.2 May 2015. International Association of Classification Societies, 2015.

LESNEWICH, A. **Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding. Part I: control of electrode melting rate**. Welding Journal, v. 37, n. 8, p. 343-353, Aug. 1958a.

LESNEWICH, A. **Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding. Part II: control of metal transfer**. Welding Journal, v. 37, n. 8, p. 418s-426s, Aug. 1958b.

LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **Gas metal arc welding: product and procedure selection**. Editor: Jeff Nadzam. Cleveland: Lincoln Electric, 2014. Publication C4.200.

MARQUES, Cleber. **Prospecções da natureza física da soldagem MIG automática de ligas de alumínio**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Applied statistics and probability for engineers**. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2014. ISBN 978-1118539712.

NORRISH, John. **Advanced welding processes: technologies and process control**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.

NORRISH, John. **Recent gas metal arc welding (GMAW) process developments: the implications related to international fabrication standards**. Weld World, v. 61, p. 755-767, 2017. DOI: 10.1007/s40194-017-0463-8.

NORRISH, John; CUIURI, Dominic. **The controlled short circuit GMAW process: a tutorial**. Journal of Manufacturing Processes, v. 16, p. 86-92, 2014. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.08.006.

SELVI, S.; VISHVAKSENAN, A.; RAJASEKAR, E. **Cold metal transfer (CMT) technology – An overview**. Defence Technology, v. 14, n. 1, p. 28-44, 2018. DOI: 10.1016/j.dt.2017.08.002.

SILVA, Régis Henrique Gonçalves e. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

APÊNDICE A – DADOS VARIANDO VA

A Tabela 22 apresenta os principais dados relacionados às diferentes variantes de soldagem e às diversas combinações de VA e VS. Os valores de corrente, tensão e VA foram aquiritados e organizados por meio do Sistema de Aquisição Portátil (SAP). Os dados aquiritados são de cordões sobre chapa. Onde o dado que não se aplica a determinada condição foi colocada a sigla “N/A”.

Os dados do PMC apresentados na Tabela 22 foram selecionados considerando pequenos intervalos nos quais não ocorreram curtos-circuitos acidentais, com o objetivo de compreender melhor como a fonte de soldagem busca impor a forma de onda de corrente. Em decorrência dessa seleção, os desvios padrão do PMC apresentados na tabela são inferiores aos desvios padrão reais do processo.

Para uma análise mais abrangente da estabilidade e dispersão do processo, recomenda-se consultar os dados entre a Figura 150 e Figura 166, nas quais os ciclogramas foram analisados com base em um intervalo de 1 s de aquisição, enquanto os histogramas foram construídos considerando 3 s de dados.

Vale ressaltar que a separação das fases de pulso e base foi realizada por meio do monitoramento da tensão, conforme descrito no item 3.3.3 deste documento.

Entre a Figura 122 até a Figura 166 encontram-se os oscilogramas, ciclogramas e histogramas correspondentes às diferentes variantes de soldagem e combinações de VA e VS, possibilitando uma análise detalhada do processo.

Tanto a tabela quanto as figuras deste apêndice são de autoria do próprio autor.

Tabela 22 - Dados relacionados às diferentes variantes de soldagem e às diversas combinações de VA e VS.

Modo	Vs (cm/min)	va média (m/min)	Im(A)	Um(V)	Ie(A)	P(kW)	Vm (mm³)	Dm (mm)	Picos de corrente				Período				Picos de tensão			
									total de picos	média (A)	DP (A)	DPR (%)	Total	média (ms)	DP (ms)	DPR (%)	Total	médi a (V)	DP (V)	DPR (%)
CMT	30	4,3	151,8	15,8	170,9	3,0	0,54	1,0	451	247,0	0,5	1,2	451	6,6	0,8	11,3	451	24,8	1,7	7,0
	43	5,8	198,1	17,2	218,7	4,3	0,75	1,1	437	311,6	1,4	0,5	437	6,8	0,3	4,1	437	26,6	0,3	1,0
	60	7,9	247,0	17	256,8	4,4	1,1	1,3	407	312,4	1,7	0,5	406	7,4	0,5	6,5	407	26,8	0,3	1,1
	75	10	294,6	18,1	302,0	5,7	1,27	1,3	445	366,5	4,4	1,2	446	6,7	0,9	13,2	439	27,4	0,4	1,5
	80	11	311,1	18,3	318,5	6,0	1,31	1,4	473	381,5	7,6	2,0	472	6,3	1,0	16,3	452	27,1	0,7	2,7
LSC	30	4	162,3	17,3	171,6	2,8	1,16	1,3	N/A	N/A	N/A	N/A	194	15,4	6,1	39,3	167	24,7	2,5	10,2
	43	5,9	218,3	20,1	222,5	4,4	1,59	1,5	N/A	N/A	N/A	N/A	206	14,3	8,5	59,4	131	29,0	3,2	11,2
Standard	30	4,1	172,6	16,6	179,3	2,9	0,95	1,2	N/A	N/A	N/A	N/A	243	12,3	5,6	45,6	200	24,1	2,6	10,7
	43	5,9	217,7	18,7	218,9	4,1	1,32	1,4	N/A	N/A	N/A	N/A	252	11,8	5,6	47,2	174	27,1	3,5	12,9
PMC	30	4,1	121,1	21,4	196,5	3,3	0,73	1,1	53	525,3	4,5	0,9	52	9,5	0,1	1,1	53	33,4	0,3	0,8
	43	6,2	163,9	23	238,3	4,7	0,81	1,2	105	535,5	4,3	0,8	104	6,9	0,1	1,5	105	34,3	0,3	0,8
	60	8,3	213,9	25	283,5	6,3	0,84	1,2	7	555,5	2,5	0,5	6	5,4	0,0	0,0	7	34,5	0,2	0,6
	75	10,4	261,4	26,7	321,5	8,0	0,93	1,2	61	544,3	2,9	0,5	60	4,8	0,1	1,7	61	35,1	0,3	0,8
	90	12,5	314,7	29,1	356,9	9,9	0,96	1,2	244	532,7	2,5	0,5	244	4,1	0,1	2,4	244	35,5	0,2	0,7
	105	14,6	362,0	30,7	392,0	11,7	1,01	1,3	272	532,8	2,3	0,4	271	3,7	0,1	2,6	272	35,7	0,2	0,6

			Arco / Pulso ¹								Curto-circuito / Base ¹								Frequência			Energia de soldagem (kJ/cm)
Modo	Vs (cm/min)	Va média (m/min)	Total	médiana (ms)	DP (ms)	DPR (%)	Um (V)	Im (A)	Ie (A)	P (W)	Total	médiana (ms)	DP (ms)	DPR (%)	Um (V)	Im (A)	Ie (A)	P (W)	média (Hz)	DP (Hz)	DPR (%)	
CMT	30	4,3	450	4,6	0,5	11,2	22,1	189,6	200,9	4,4	452	2,1	0,3	16,4	1,9	69,4	70,0	0,1	151,5	18,4	11,3	6,0
	43	5,8	436	4,7	0,3	5,6	24,0	244,1	255,8	6,1	438	2,2	0,2	7,2	2,5	98,8	99,3	0,2	147,1	6,5	4,1	6,0
	60	7,9	406	4,8	0,2	4,8	23,8	253,8	265,2	6,3	407	2,6	0,6	21,6	4,3	234,4	240,6	1,0	135,1	9,1	6,5	4,4
	75	10	445	4,6	0,6	12,9	24,4	307,3	316,0	7,7	446	2,2	0,5	22,0	5,0	267,7	270,2	1,3	149,3	20,0	13,2	4,6
	80	11	472	4,4	0,7	15,1	23,9	326,3	334,4	8,0	473	1,9	0,6	28,9	5,3	276,5	278,7	1,4	158,7	25,2	16,3	4,5
LSC	30	4	193	12,7	5,4	43,0	20,4	155,9	165,4	3,3	195	2,8	1,1	37,6	3,2	191,3	197,2	0,6	64,9	25,7	39,3	5,6
	43	5,9	205	12,2	7,9	64,3	23,0	216,5	220,8	5,0	206	2,2	1,5	71,1	3,9	228,5	231,8	0,9	69,9	41,6	59,4	6,1
Standard	30	4,1	242	9,6	4,7	49,4	20,5	170,4	177,6	3,6	244	2,8	1,3	48,9	2,8	180,1	185,1	0,5	81,3	37,0	45,6	5,8
	43	5,9	251	9,4	5,0	53,2	22,6	219,6	220,8	5,0	253	2,4	1,6	67,1	3,5	210,3	211,4	0,7	84,7	40,2	47,2	5,7
PMC	30	4,1	52	2,1	0,2	7,6	29,9	389,2	410,5	12,0	52	7,5	0,2	2,0	19,0	48,1	56,3	0,9	105,3	1,1	1,1	6,6
	43	6,2	104	1,7	0,1	5,2	31,9	456,9	464,1	14,8	105	5,3	0,1	1,9	20,2	72,7	85,6	1,5	144,9	2,1	1,5	6,6
	60	8,3	6	2,0	0,3	17,3	32,7	485,8	485,7	15,8	6	3,7	0,1	3,0	21,6	95,9	107,9	2,1	185,2	0,0	0,0	6,3
	75	10,4	60	2,0	0,1	3,6	32,6	465,9	474,3	15,4	60	2,7	0,1	3,4	22,5	111,0	117,6	2,5	208,3	4,3	1,7	6,4
	90	12,5	243	2,4	0,1	3,7	32,5	438,6	451,1	14,6	245	1,7	0,1	6,0	24,4	140,1	141,6	3,4	243,9	5,9	2,4	6,6
	105	14,6	271	1,7	0,1	5,4	34,6	507,4	508,2	17,6	271	1,9	0,1	4,9	27,2	232,0	245,1	6,5	270,3	7,3	2,6	6,7

¹ No modo PMC os valores referentes ao período de Pulso e Base foram calculados com tensão de referência escolhida próximos e superiores às correntes de base.

LSC:

Figura 122 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante LSC, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.

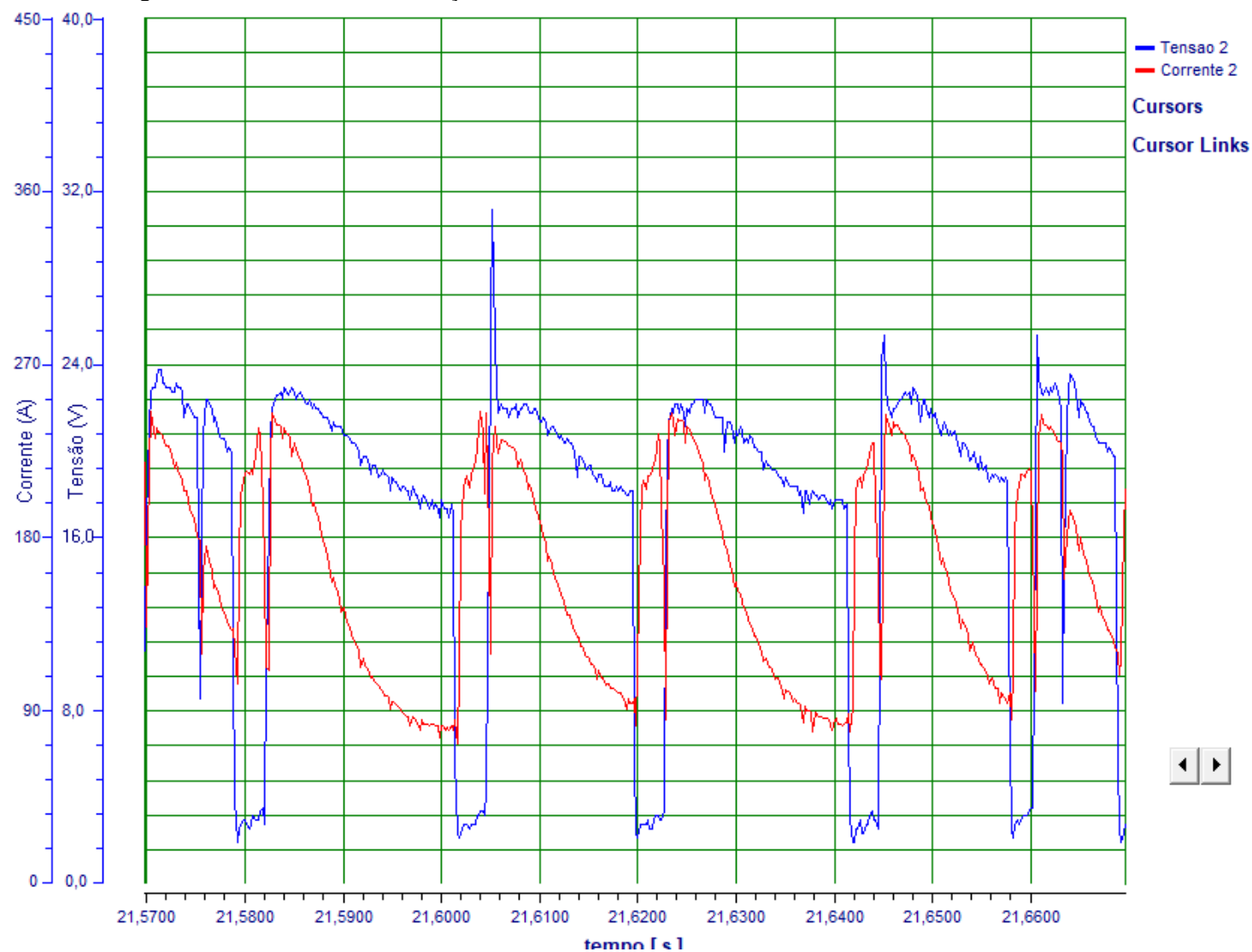


Figura 123 - Ciclograma de corrente (A) e tensão (V) nos eixos horizontal e vertical respectivamente, na variante LSC com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min com duração total de 1 s.

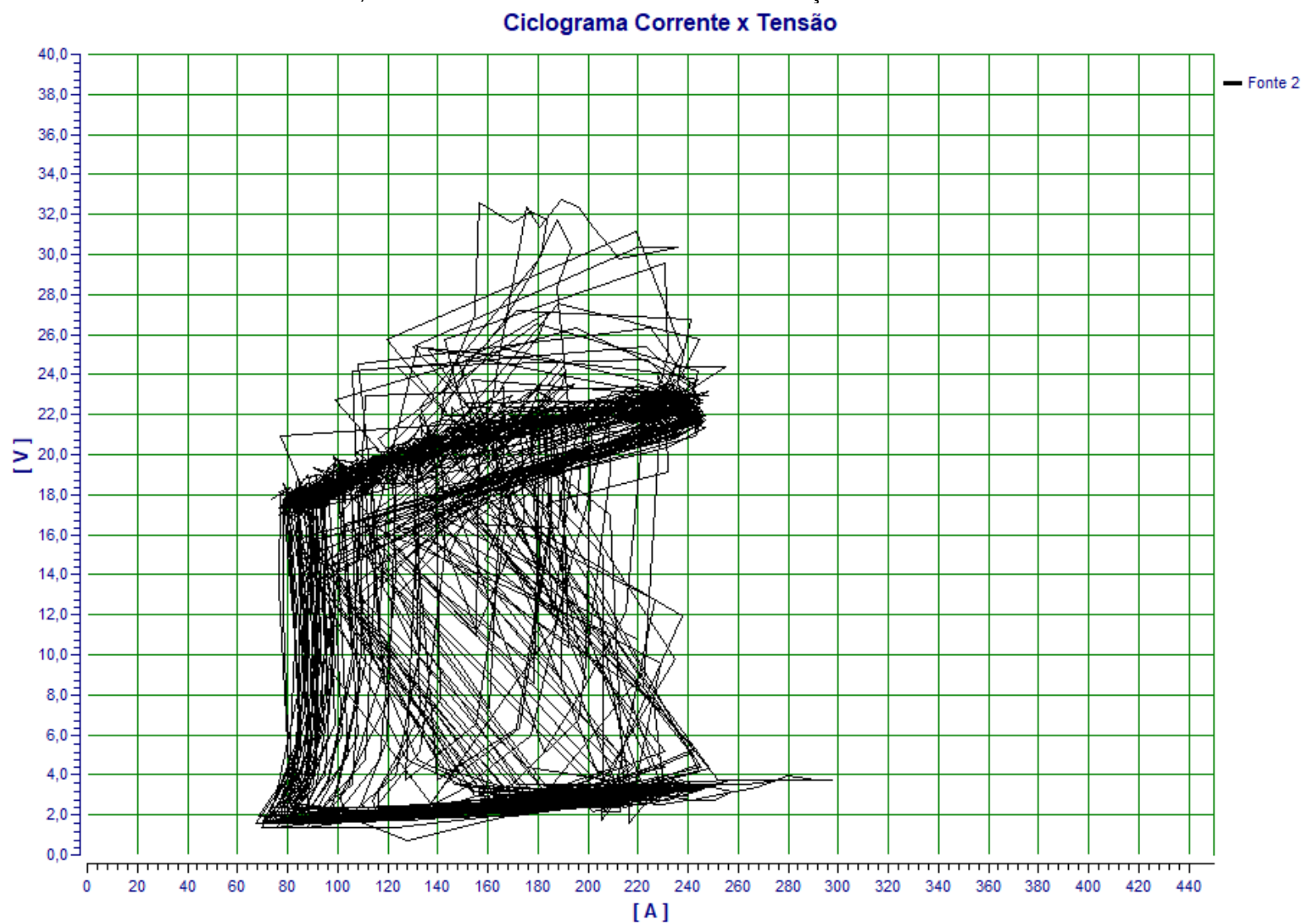


Figura 124 – Histogramas referentes à variante LSC, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

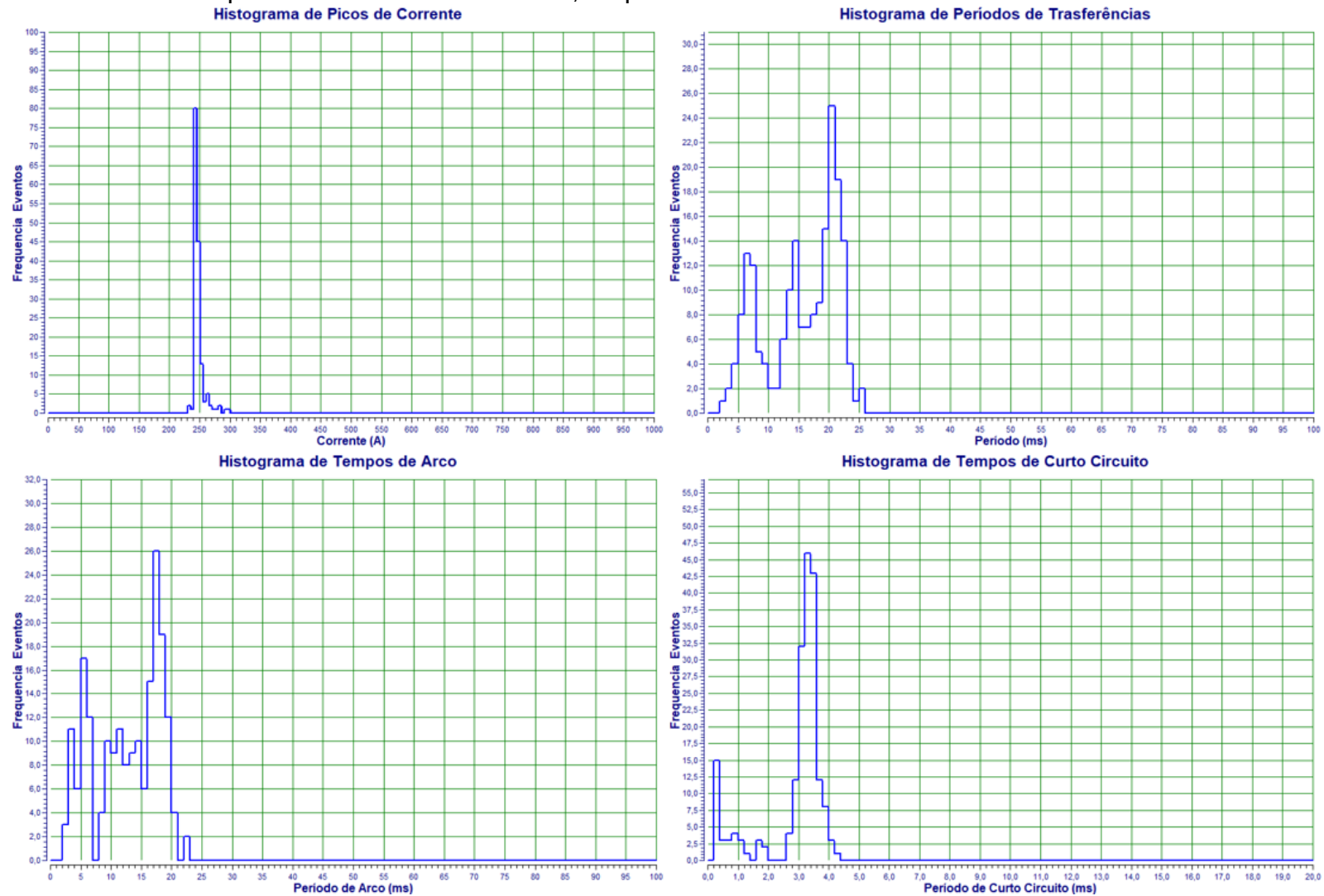


Figura 125 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante LSC, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.

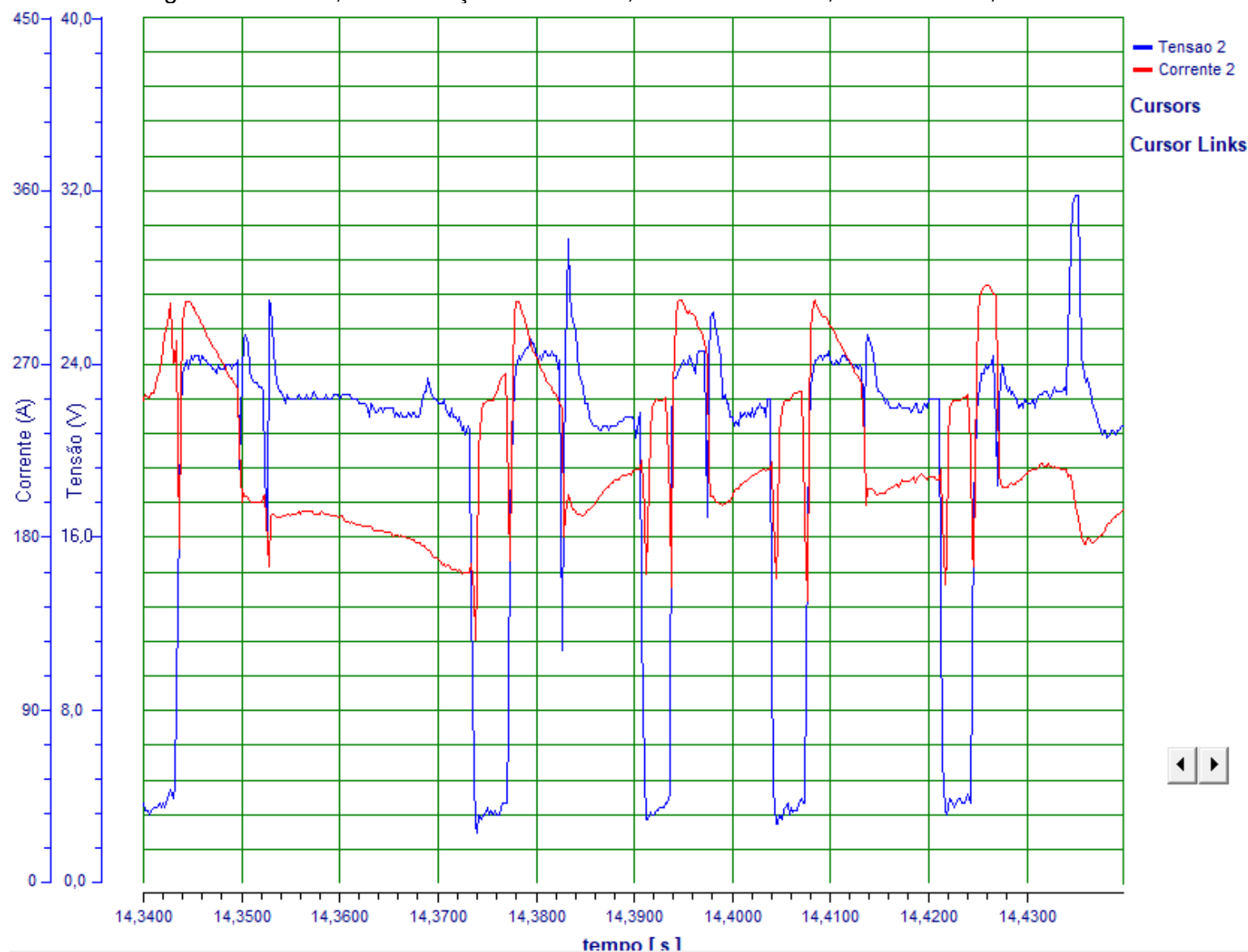


Figura 126 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante LSC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.

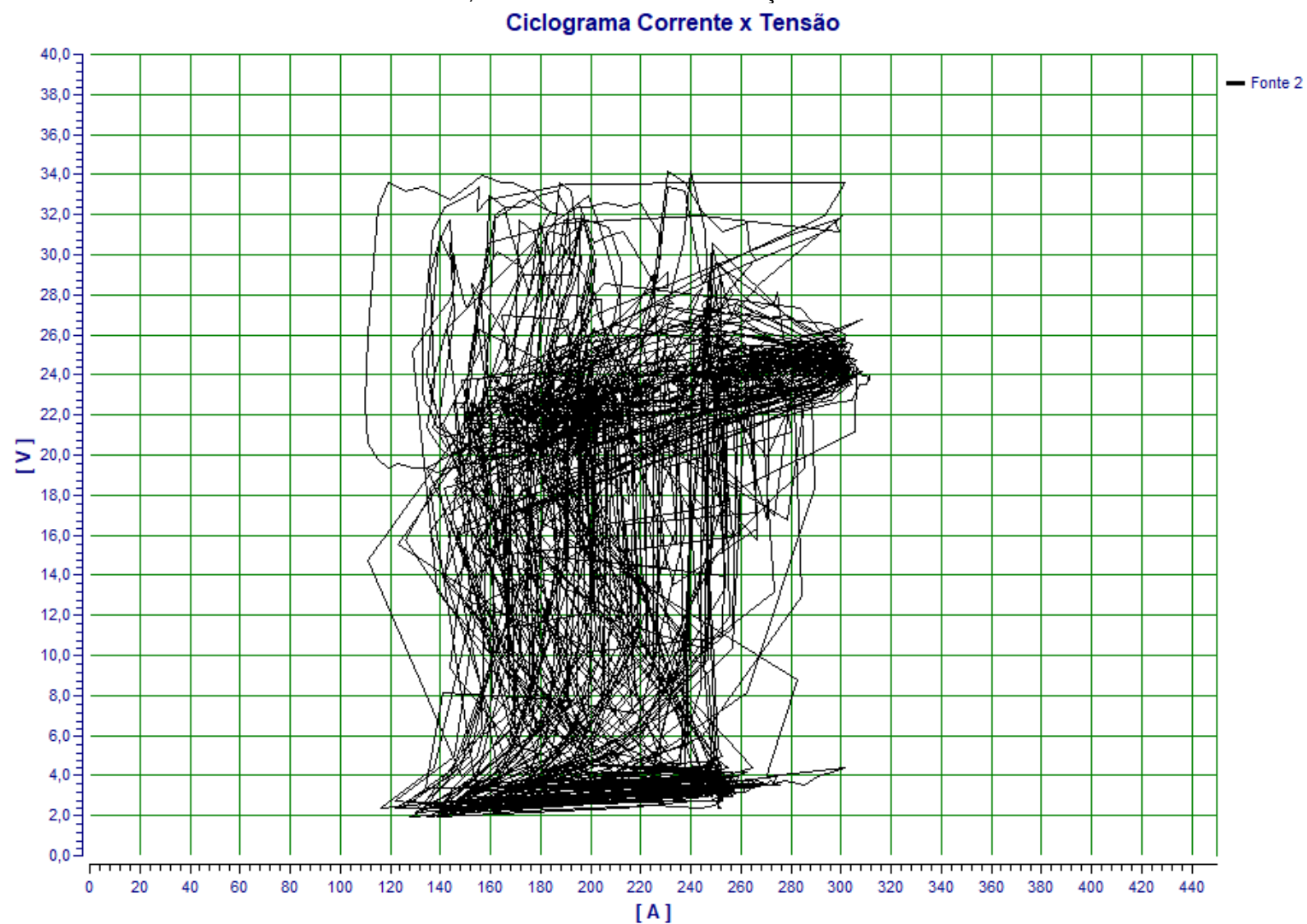
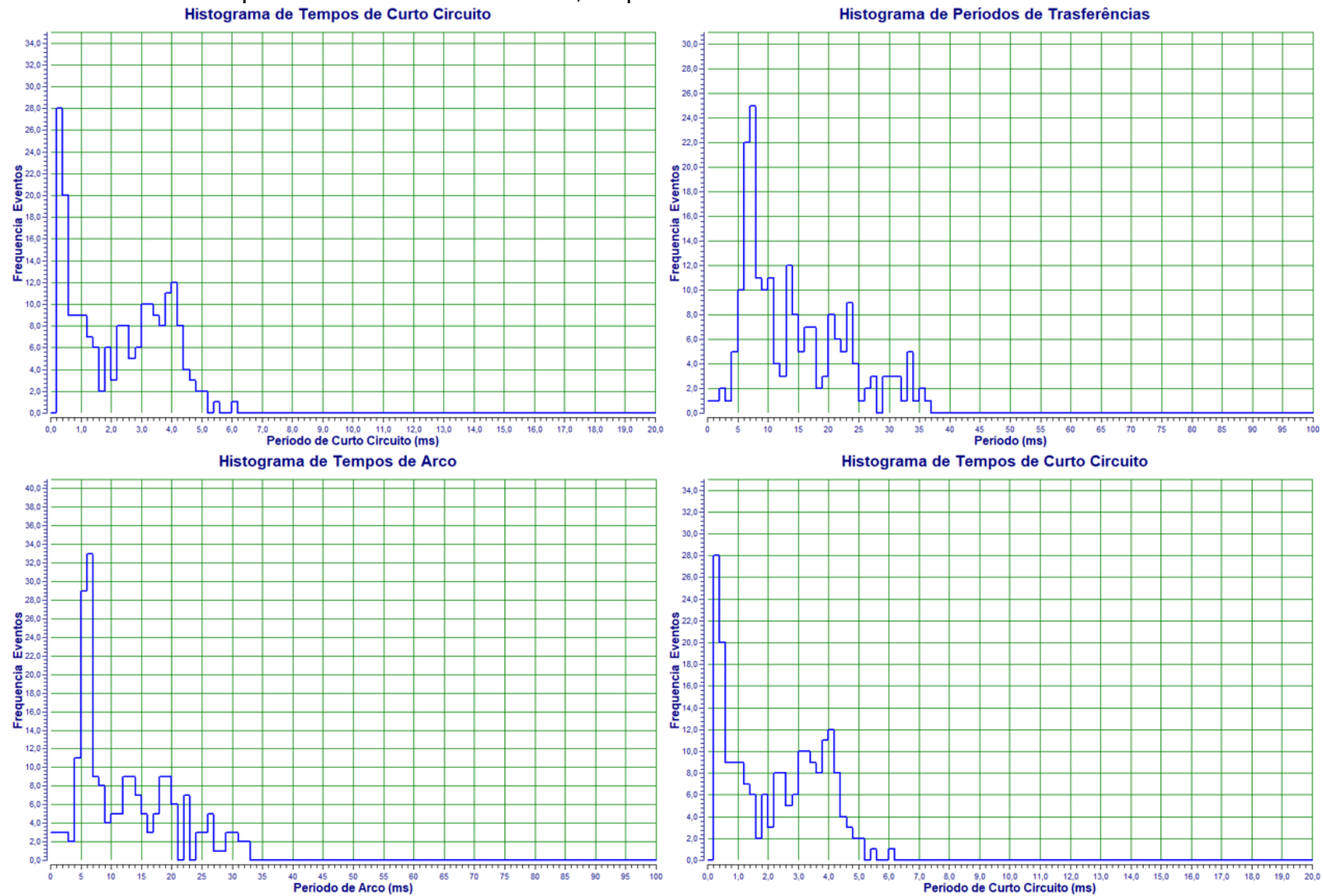


Figura 127 - Histogramas referentes à variante LSC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.



Standard:

Figura 128 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante Standard, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.

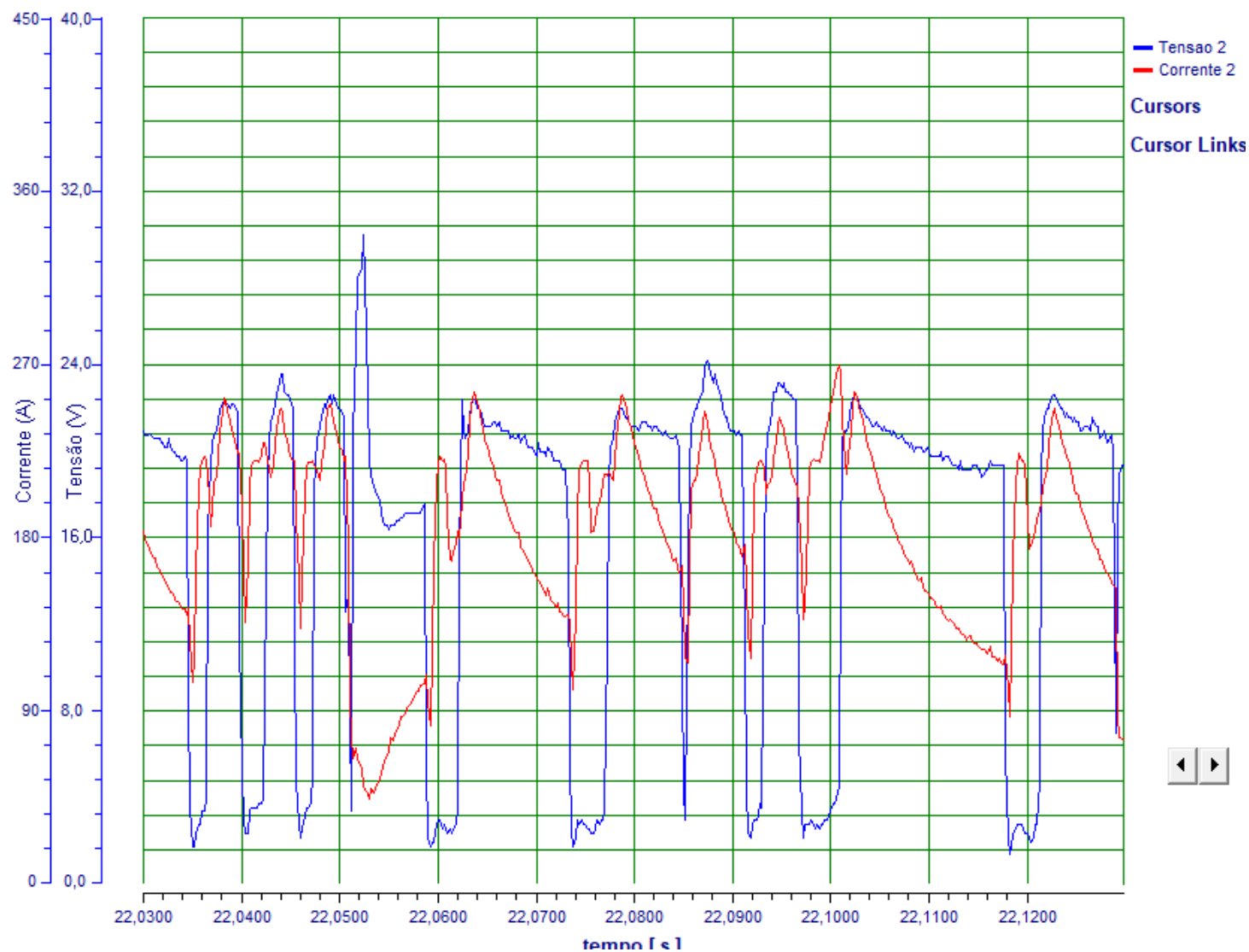


Figura 129 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante Standard, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 1 s.

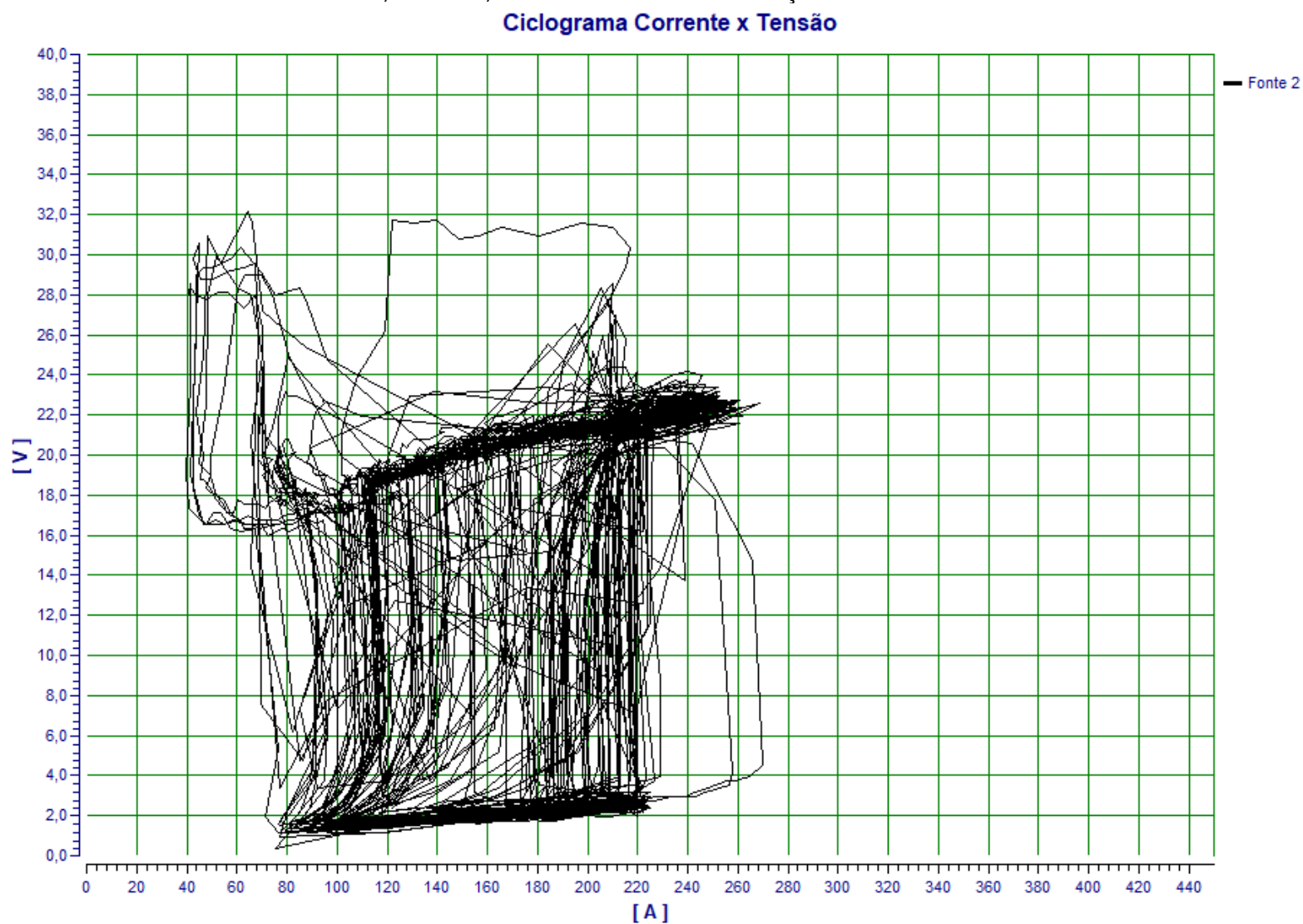


Figura 130 - Histogramas referentes à variante Standard, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

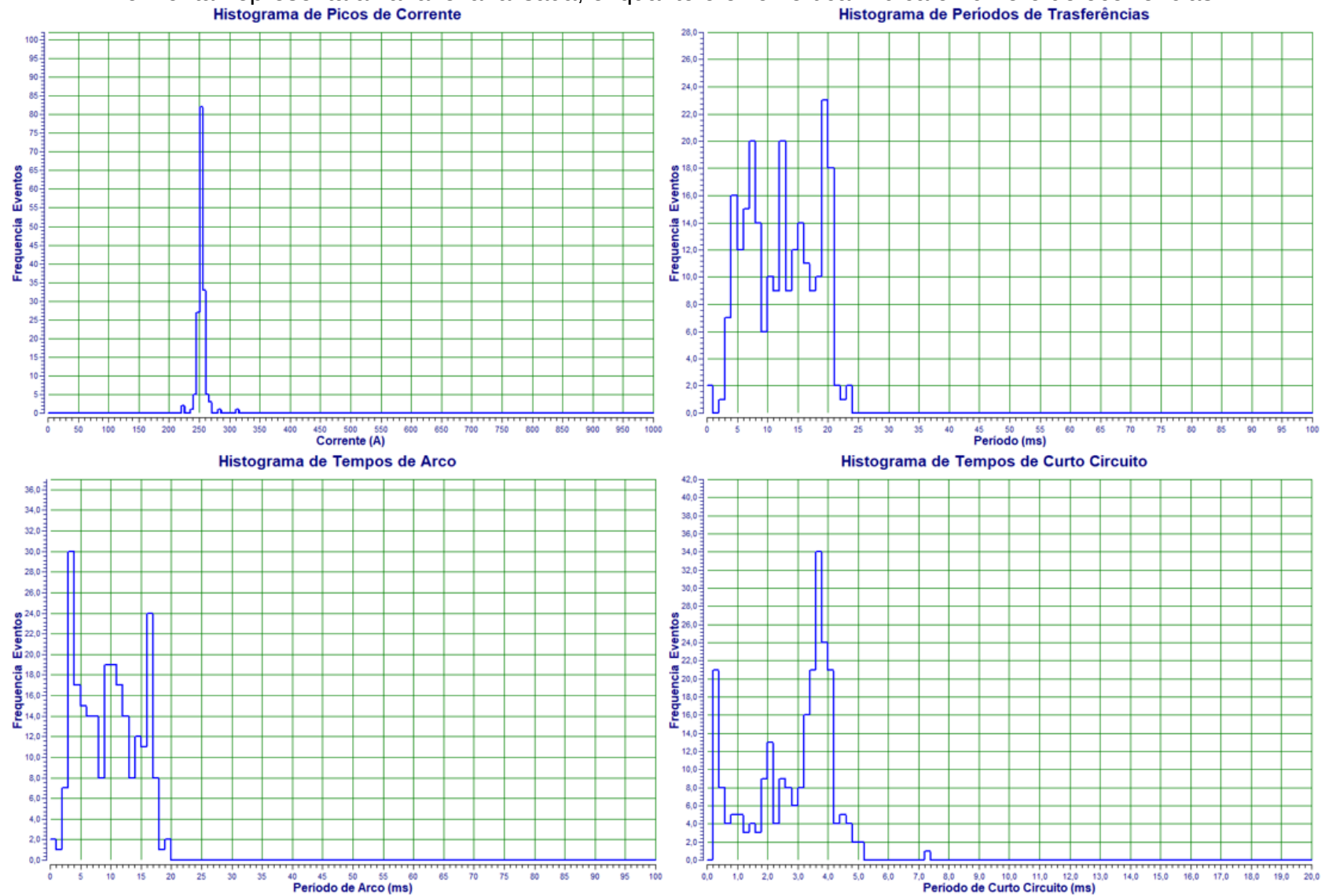


Figura 131 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante Standard, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.

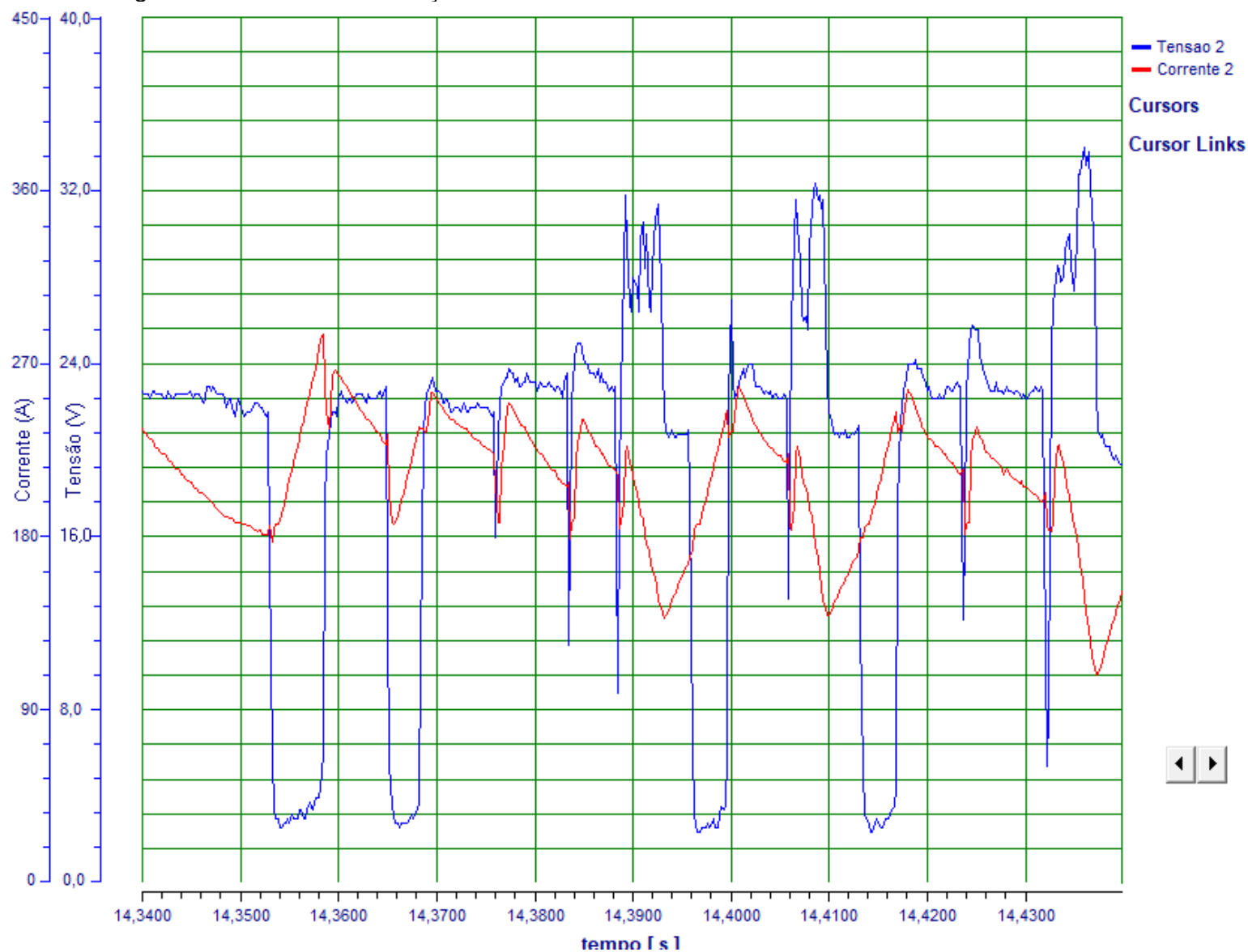


Figura 132 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante Standard, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.

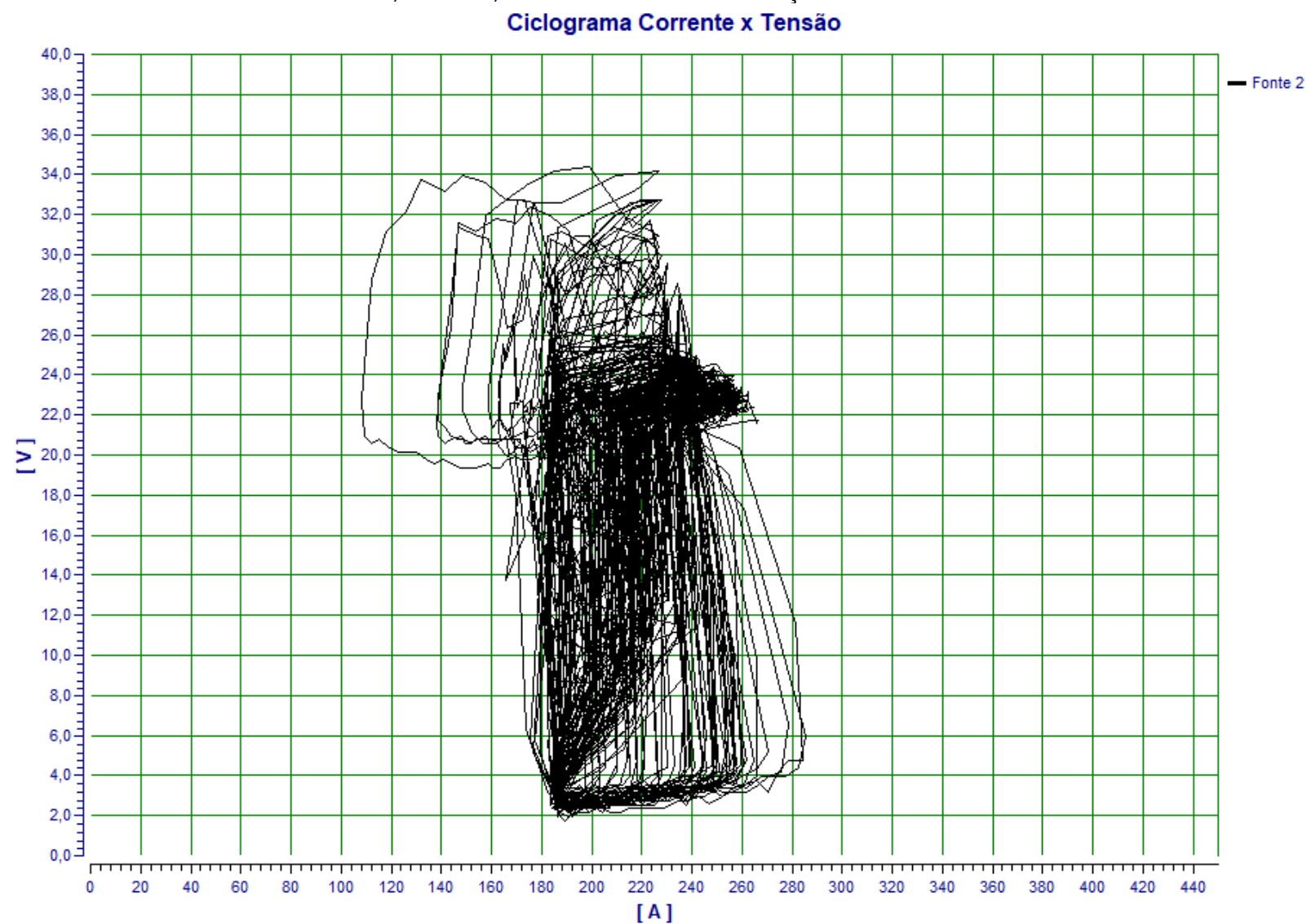
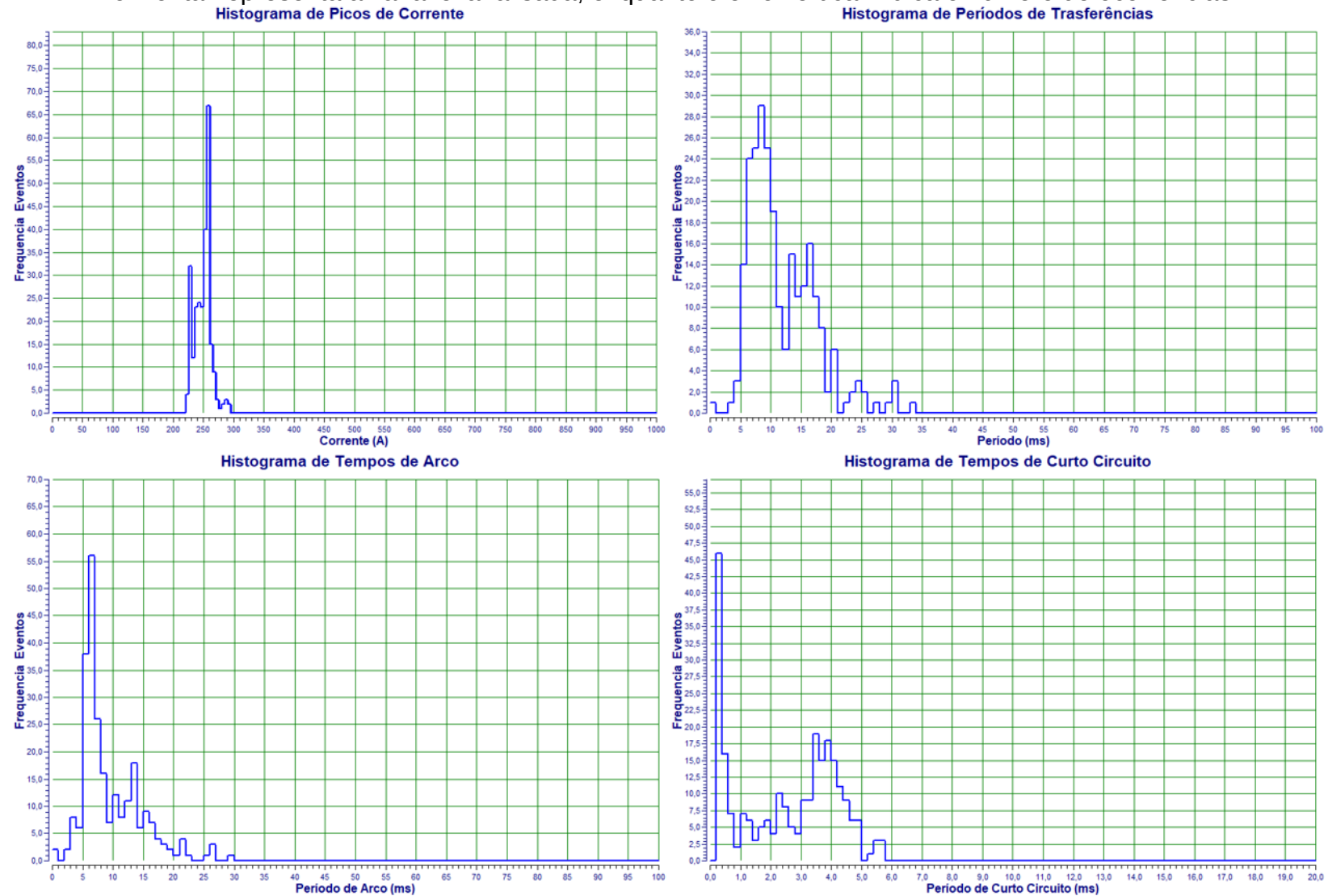


Figura 133 - Histogramas referentes à variante Standard, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.



CMT:

Figura 134 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.

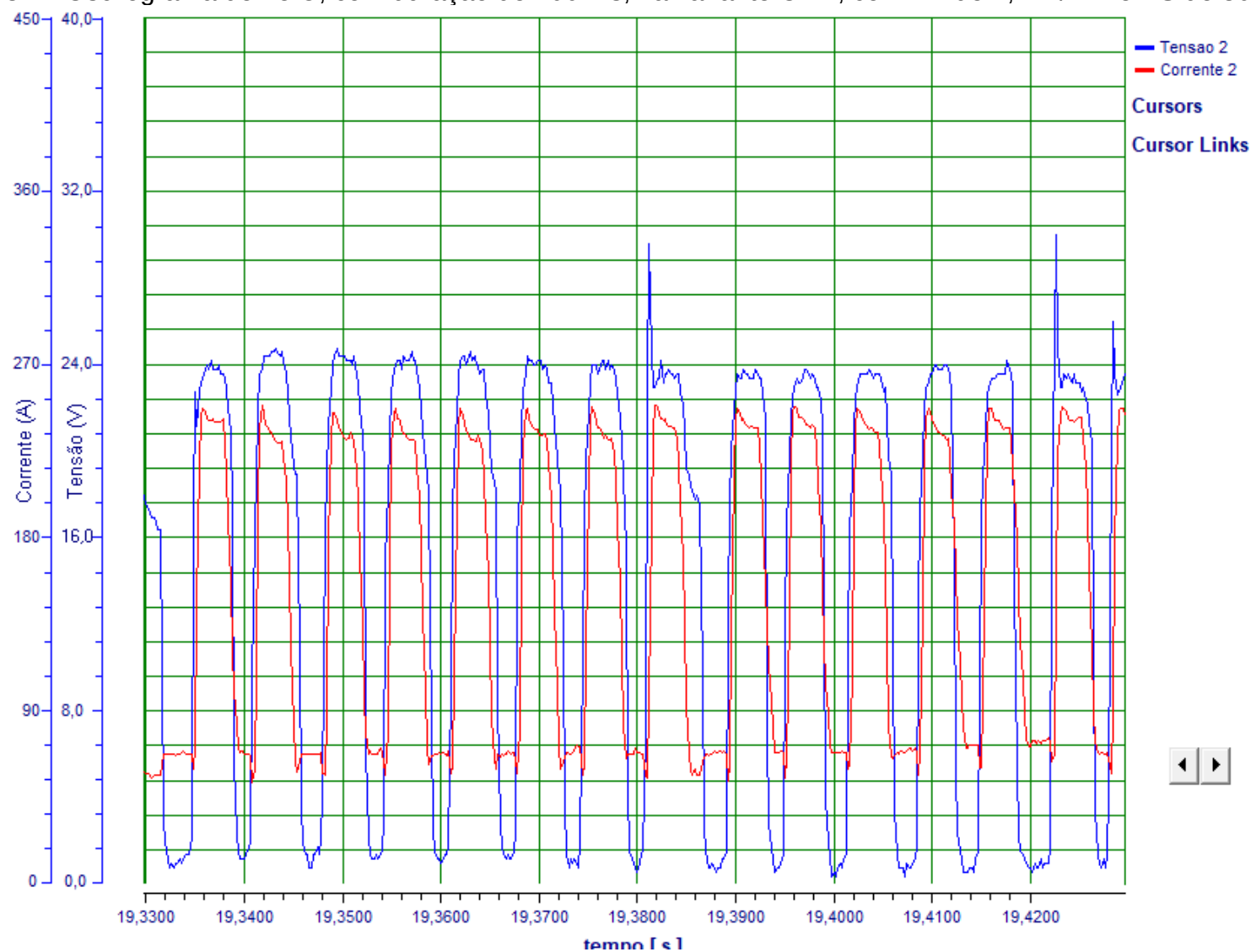


Figura 135 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 1 s.

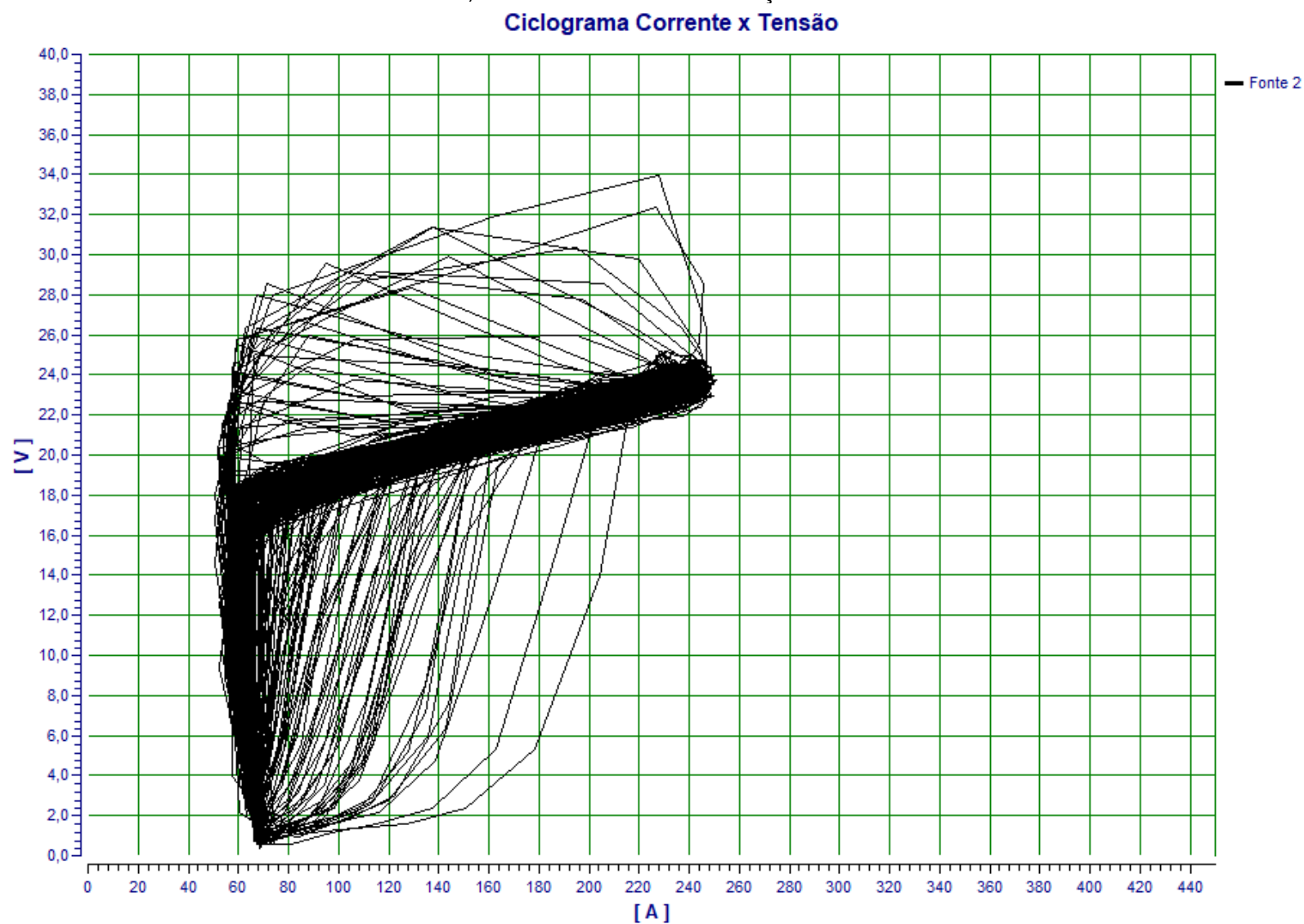


Figura 136 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

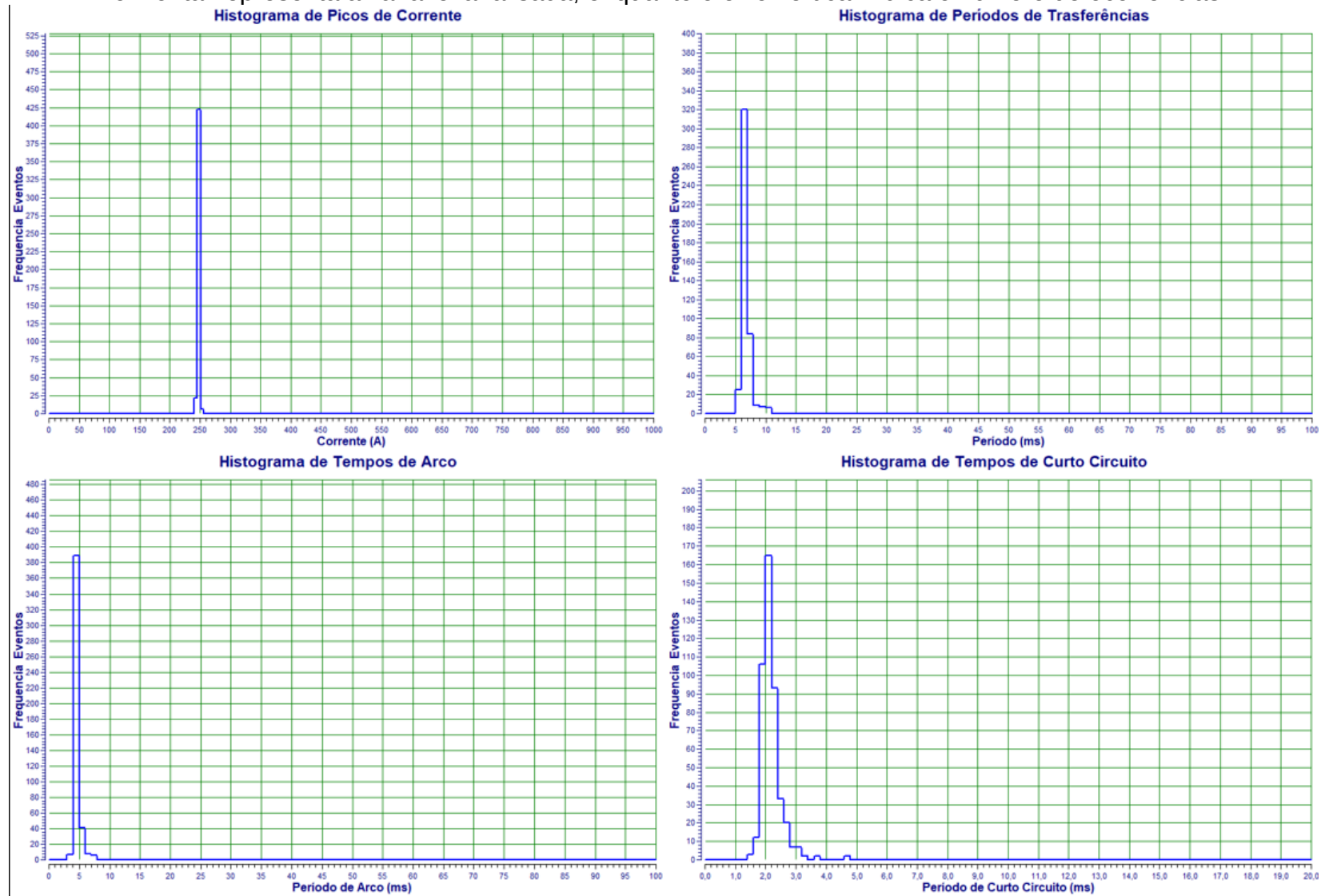


Figura 137 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.

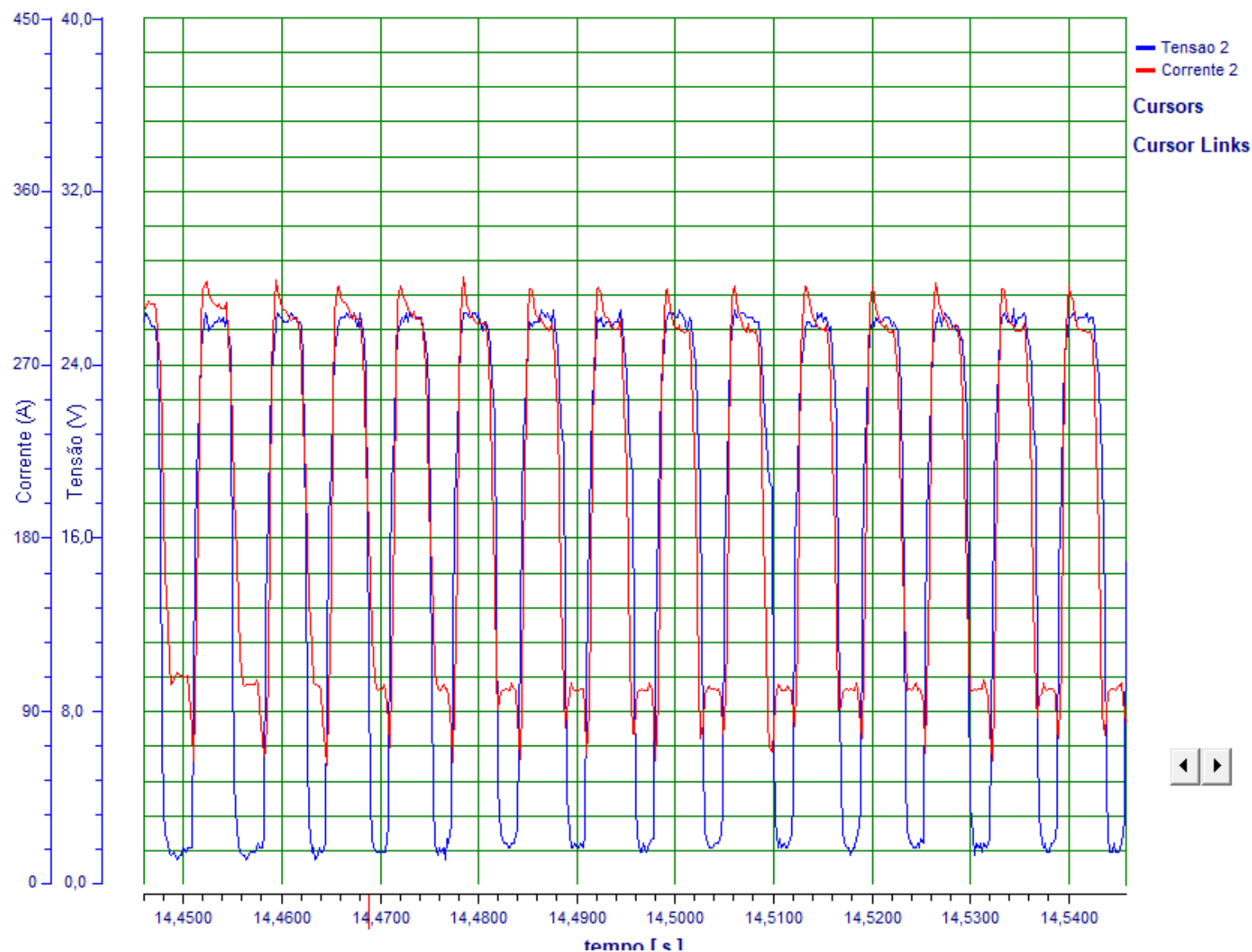


Figura 138 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.

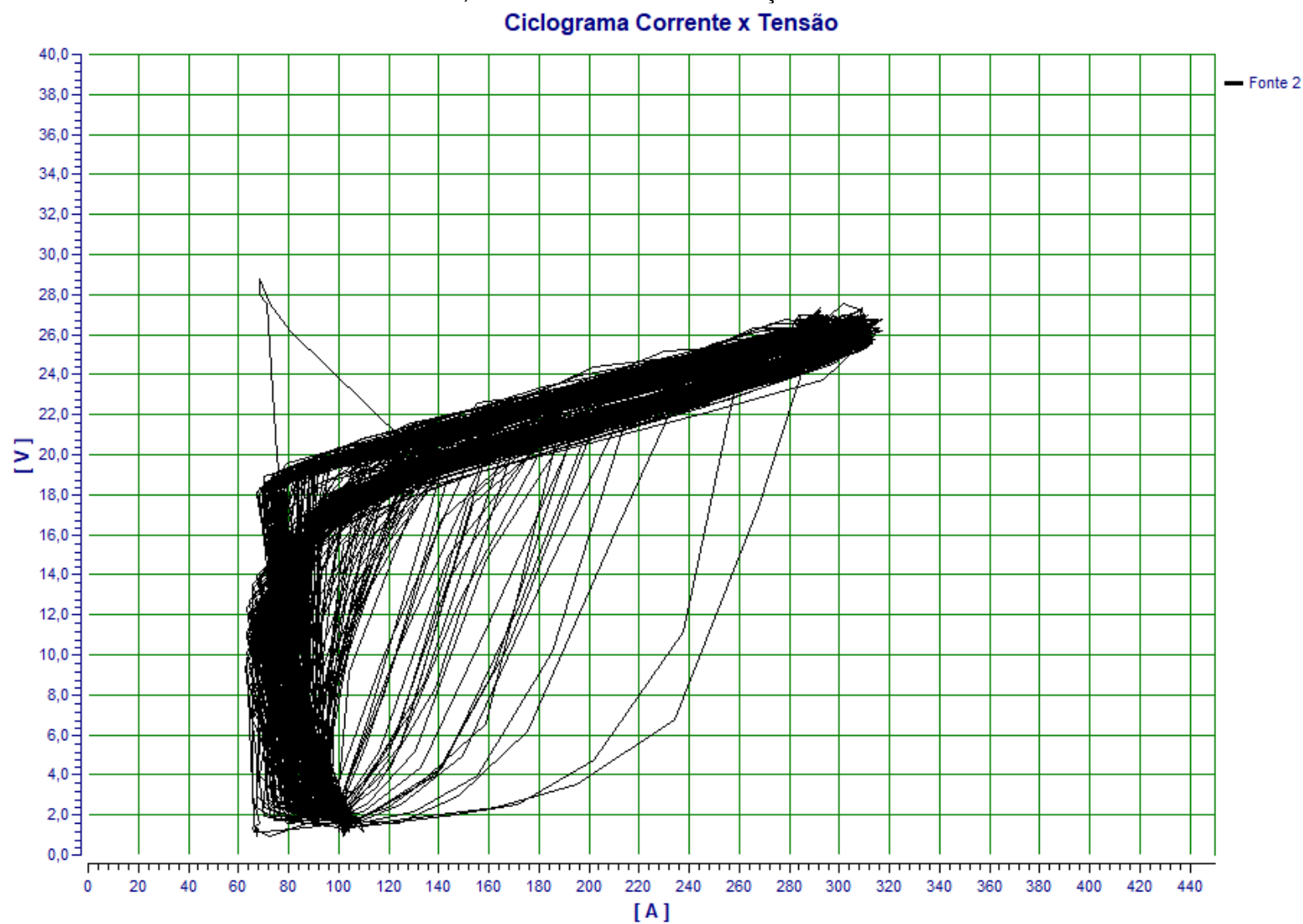


Figura 139 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

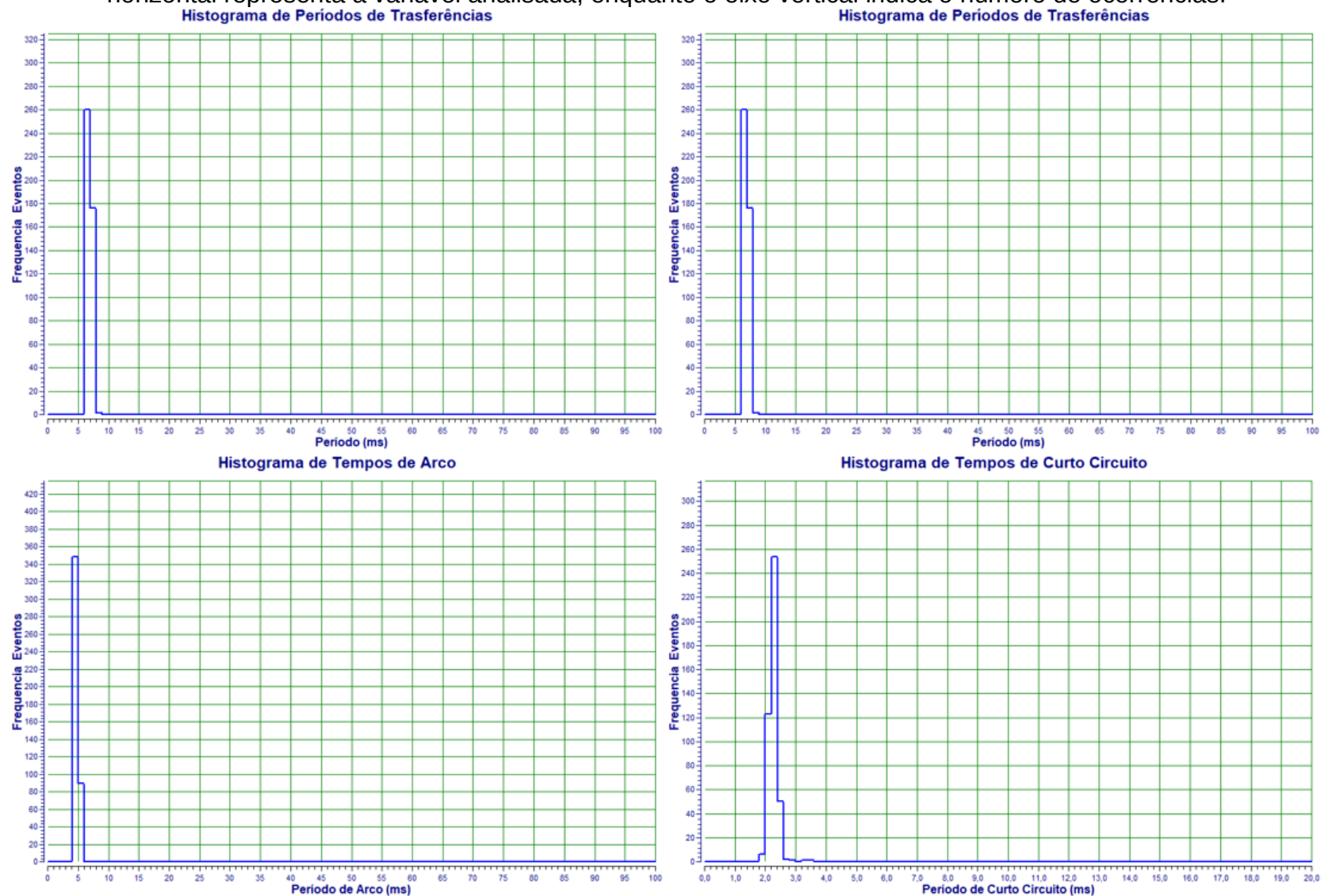


Figura 140 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.

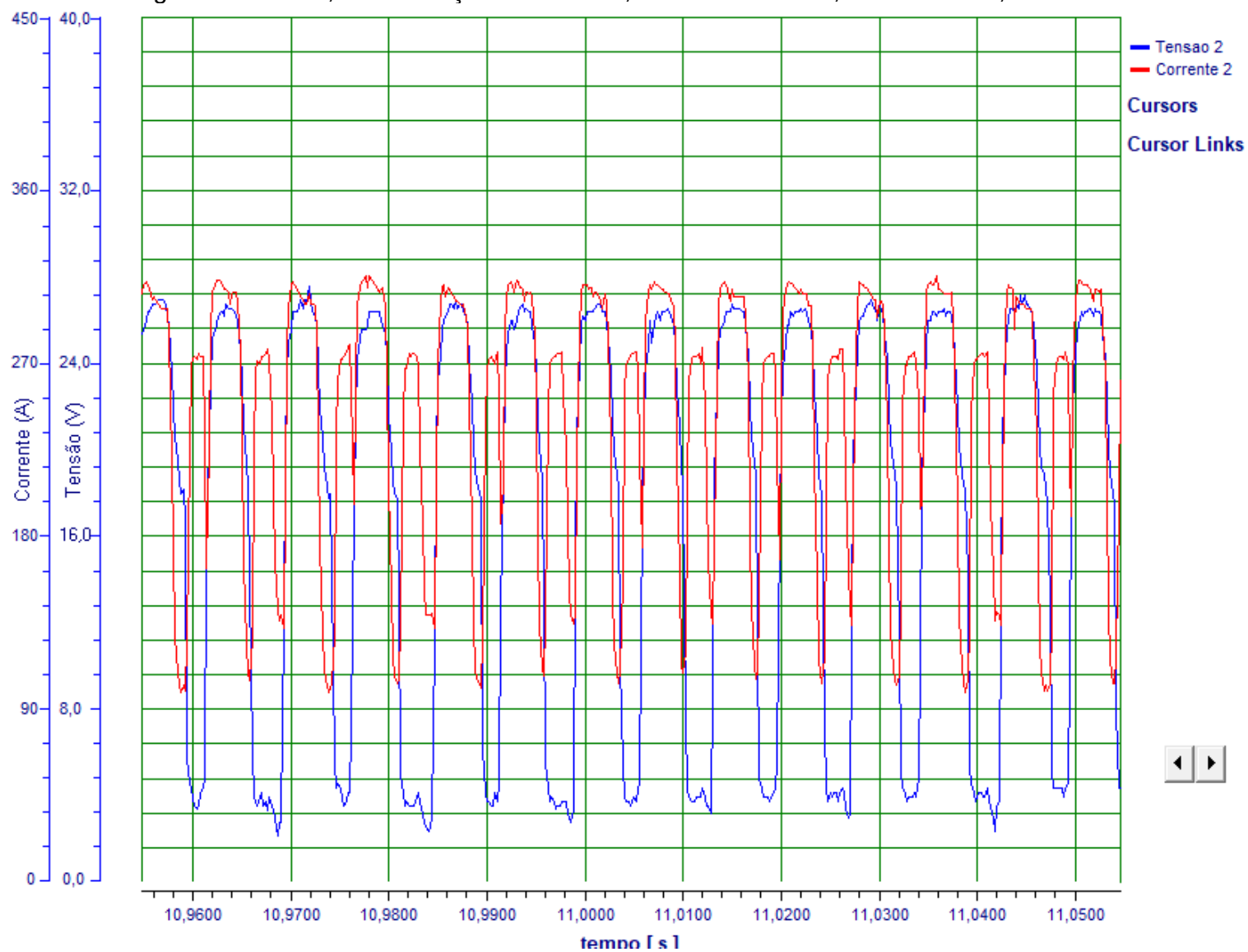


Figura 141 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 1 s.

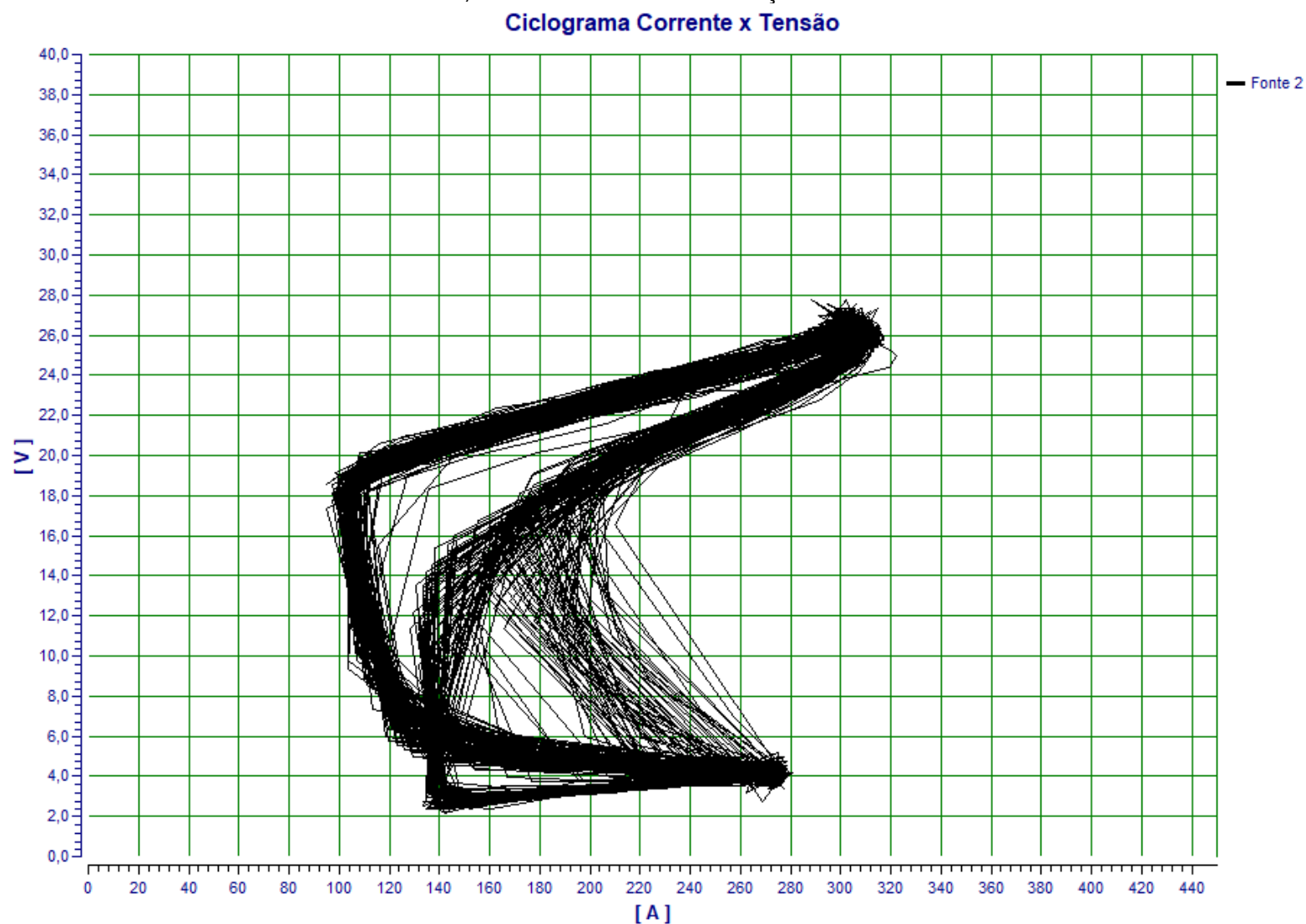


Figura 142 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

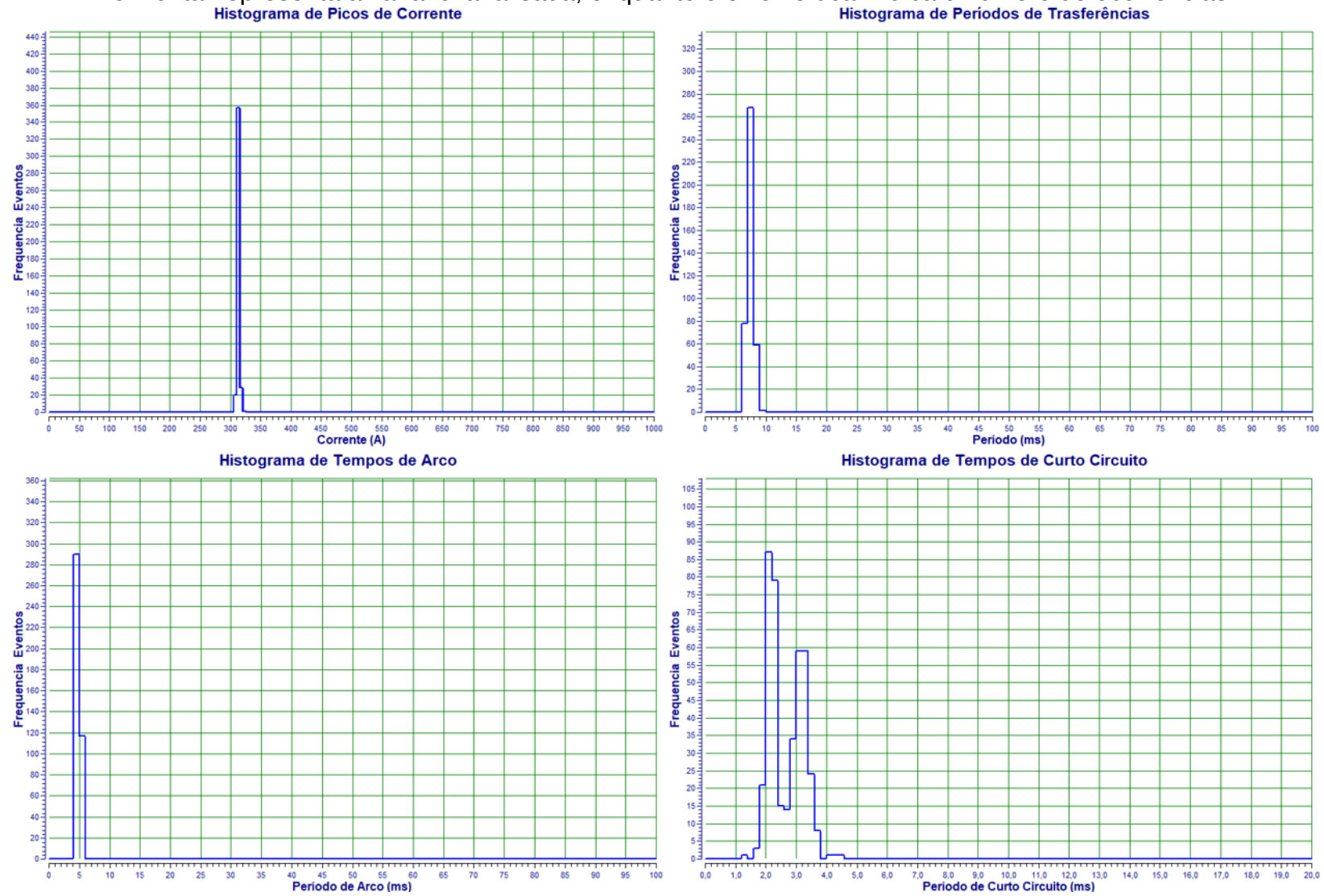


Figura 143 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.

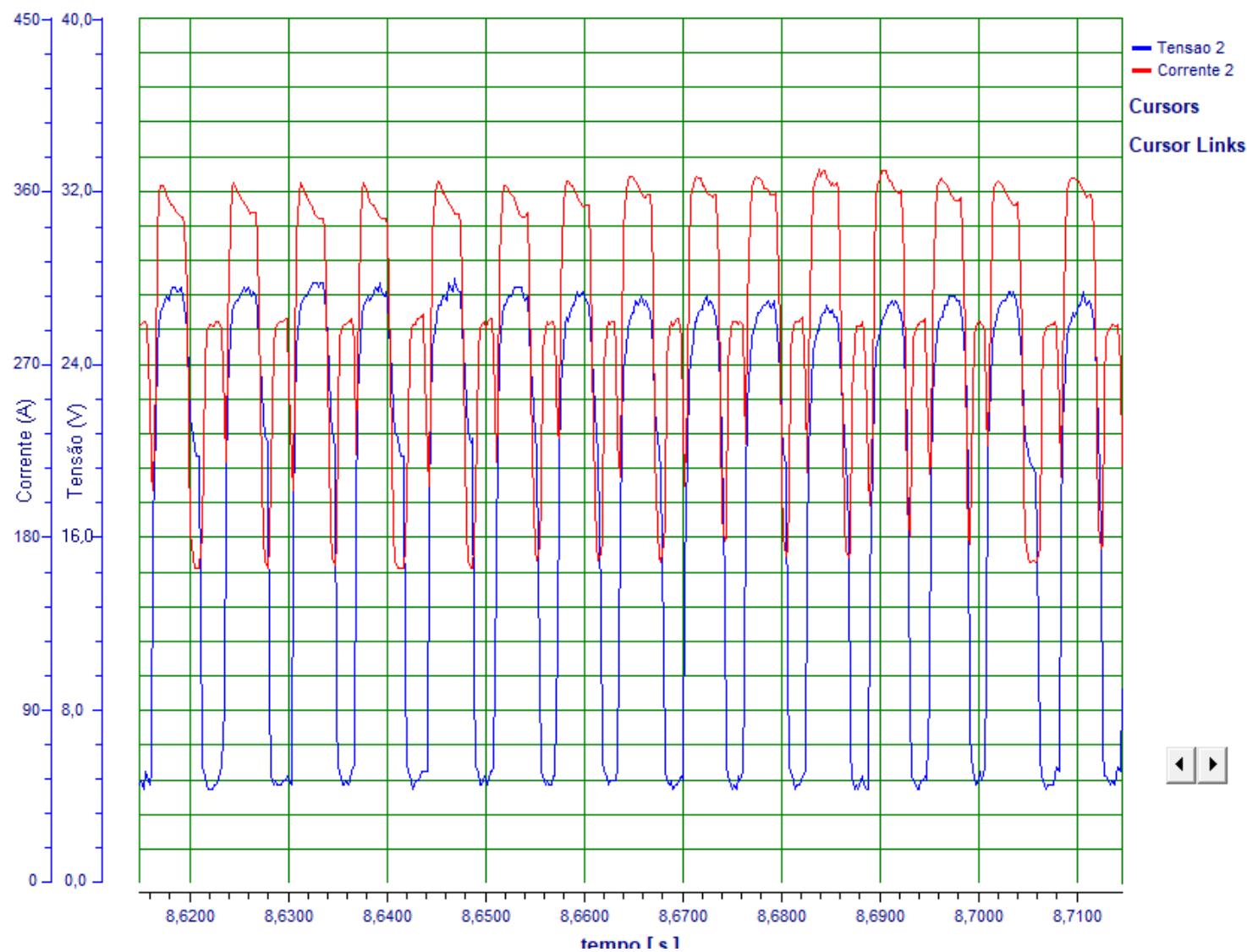


Figura 144 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 1 s.

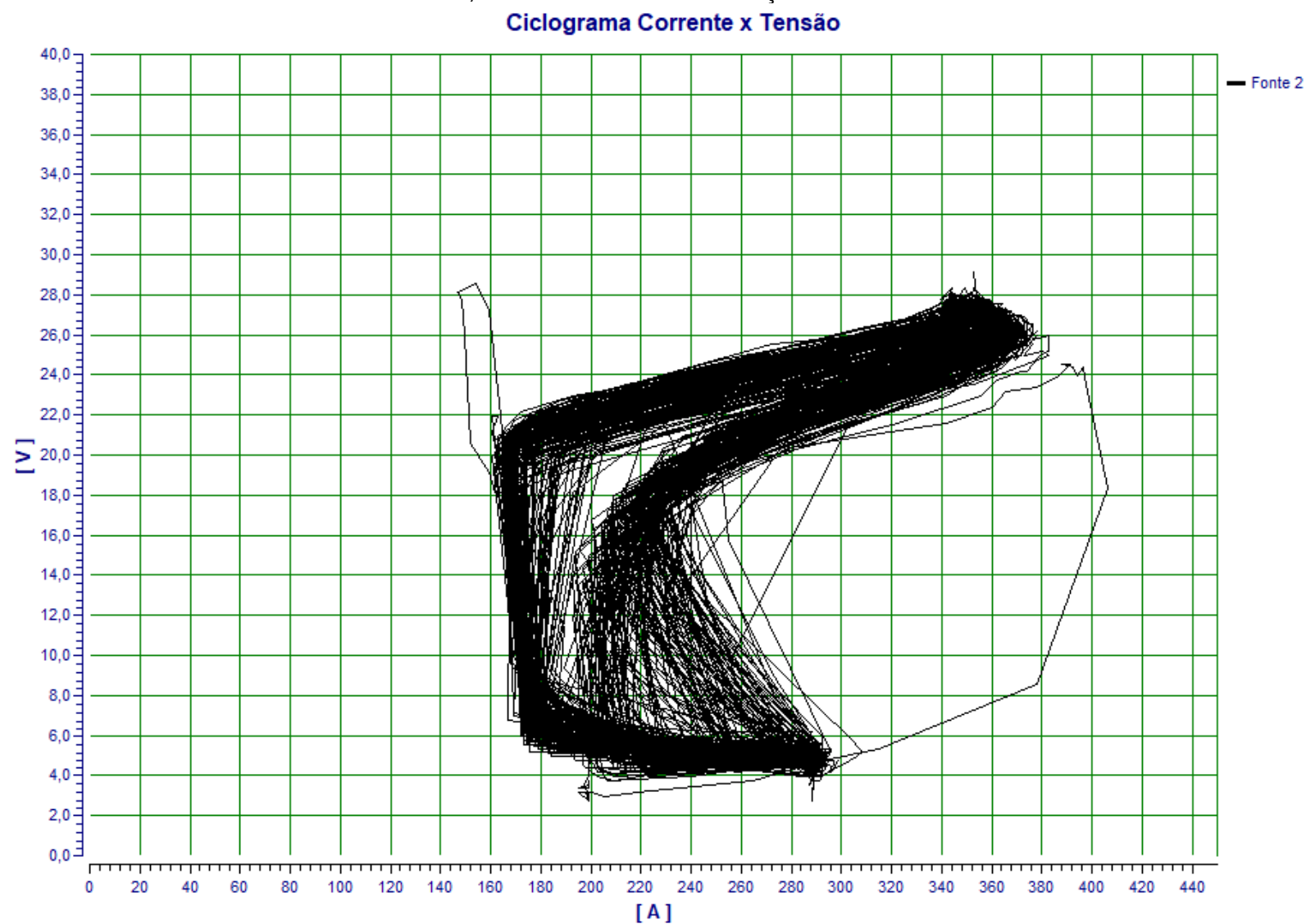


Figura 145 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

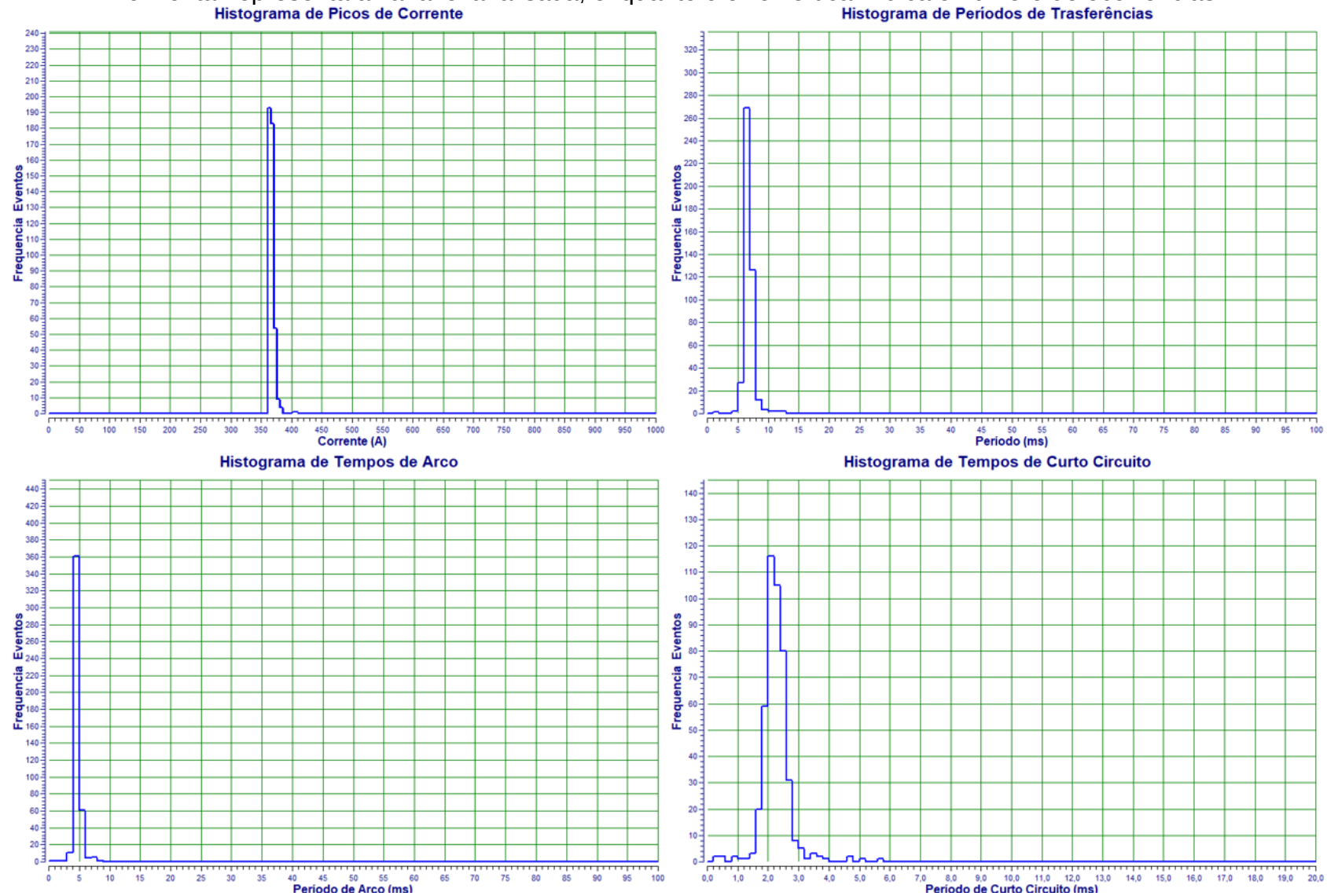


Figura 146 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante CMT, com VA de 11 m/min e VS de 80 cm/min.

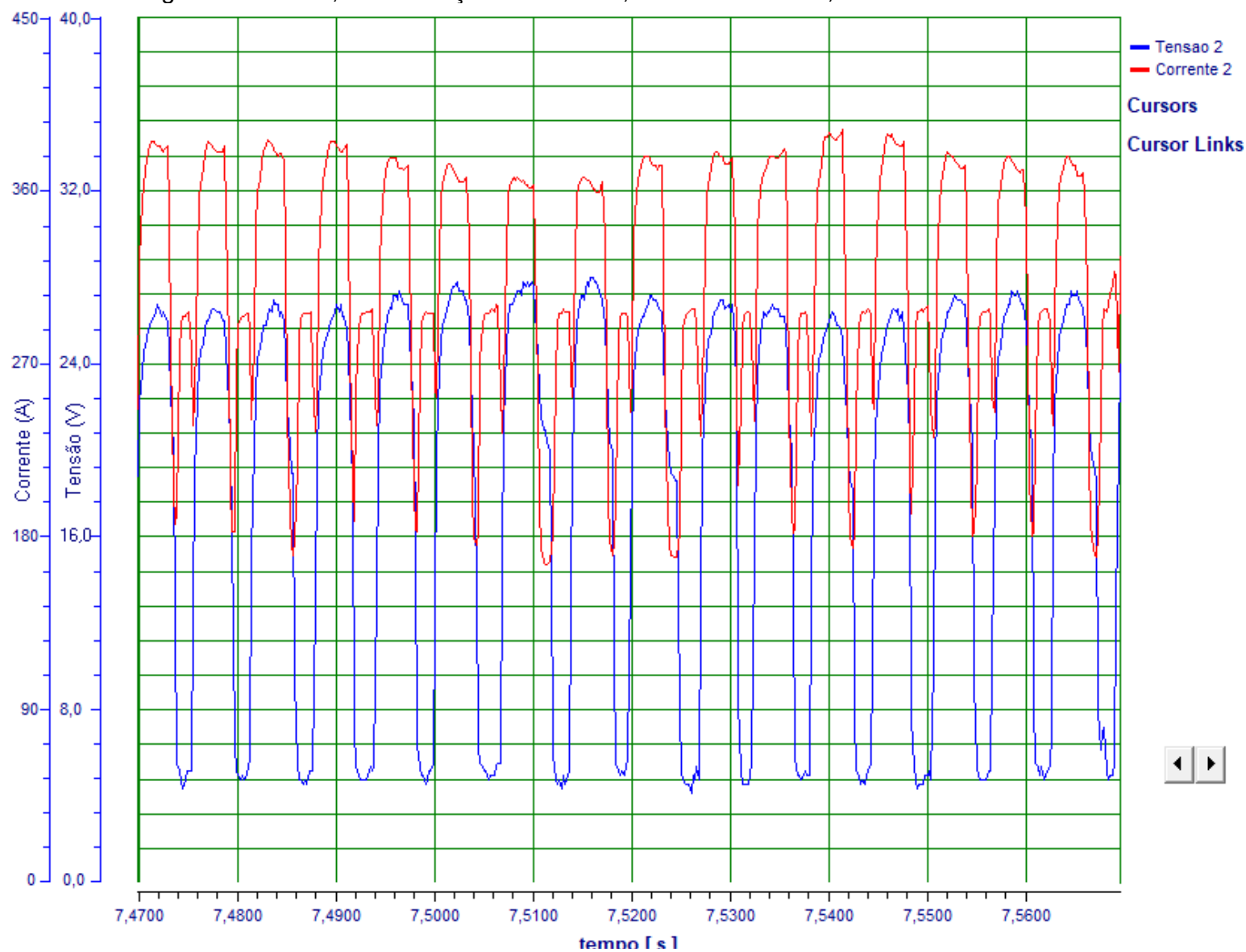


Figura 147 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante CMT, com VA de 11 m/min, VS de 80 cm/min e duração total de 1 s.

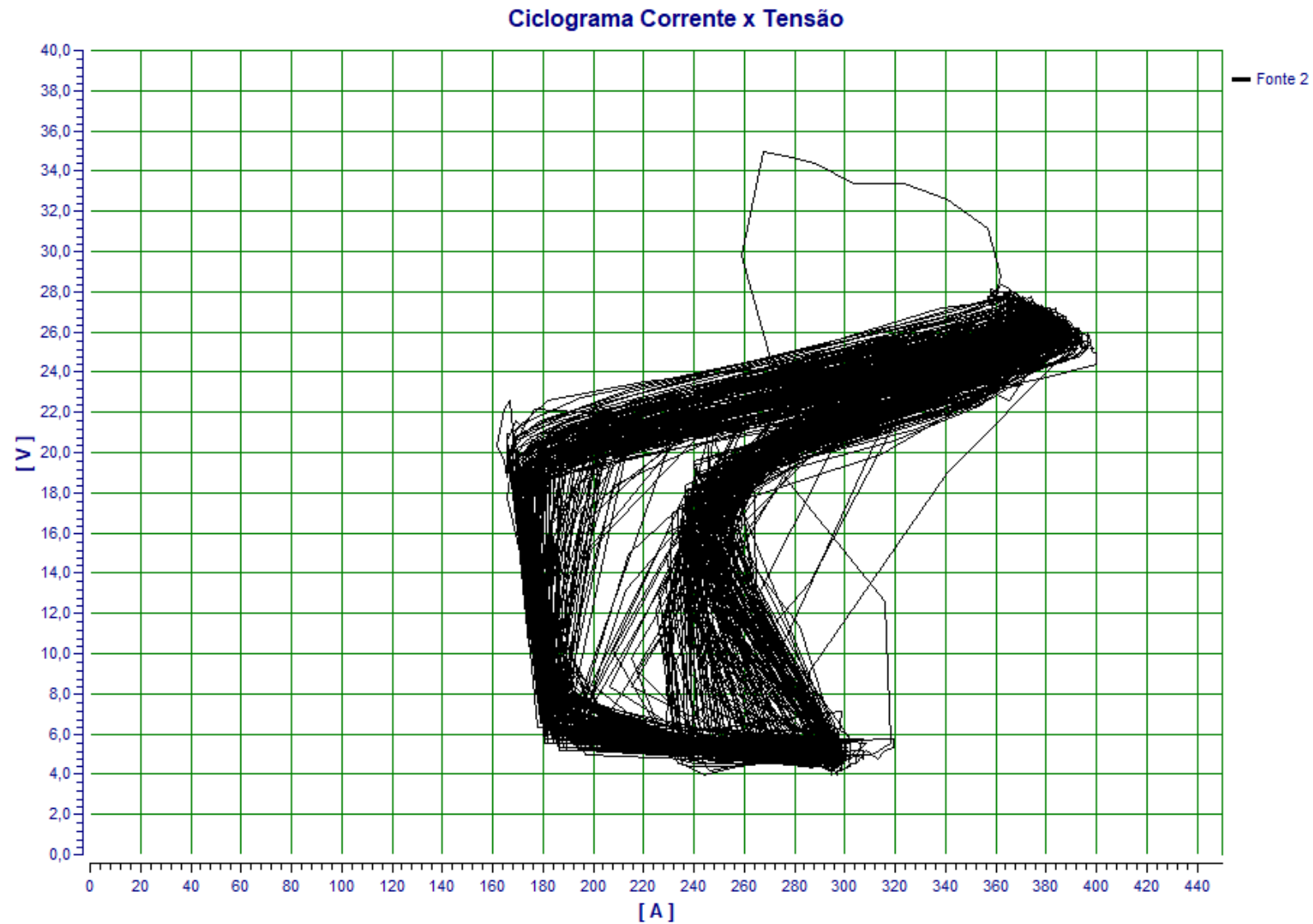
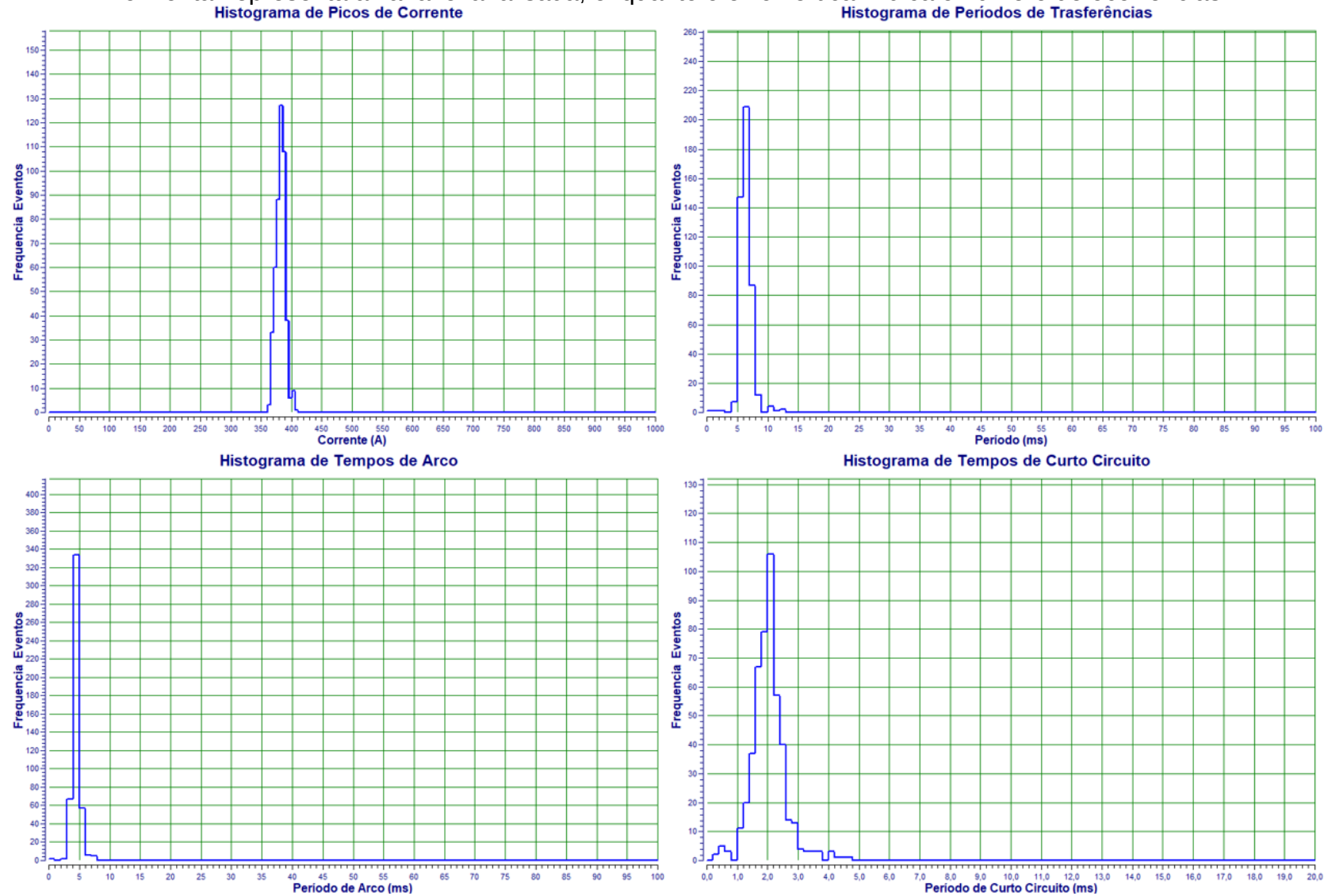


Figura 148 - Histogramas referentes à variante CMT, com VA de 11 m/min, VS de 80 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.



PMC:

Figura 149 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 4,1 m/min e VS de 30 cm/min.

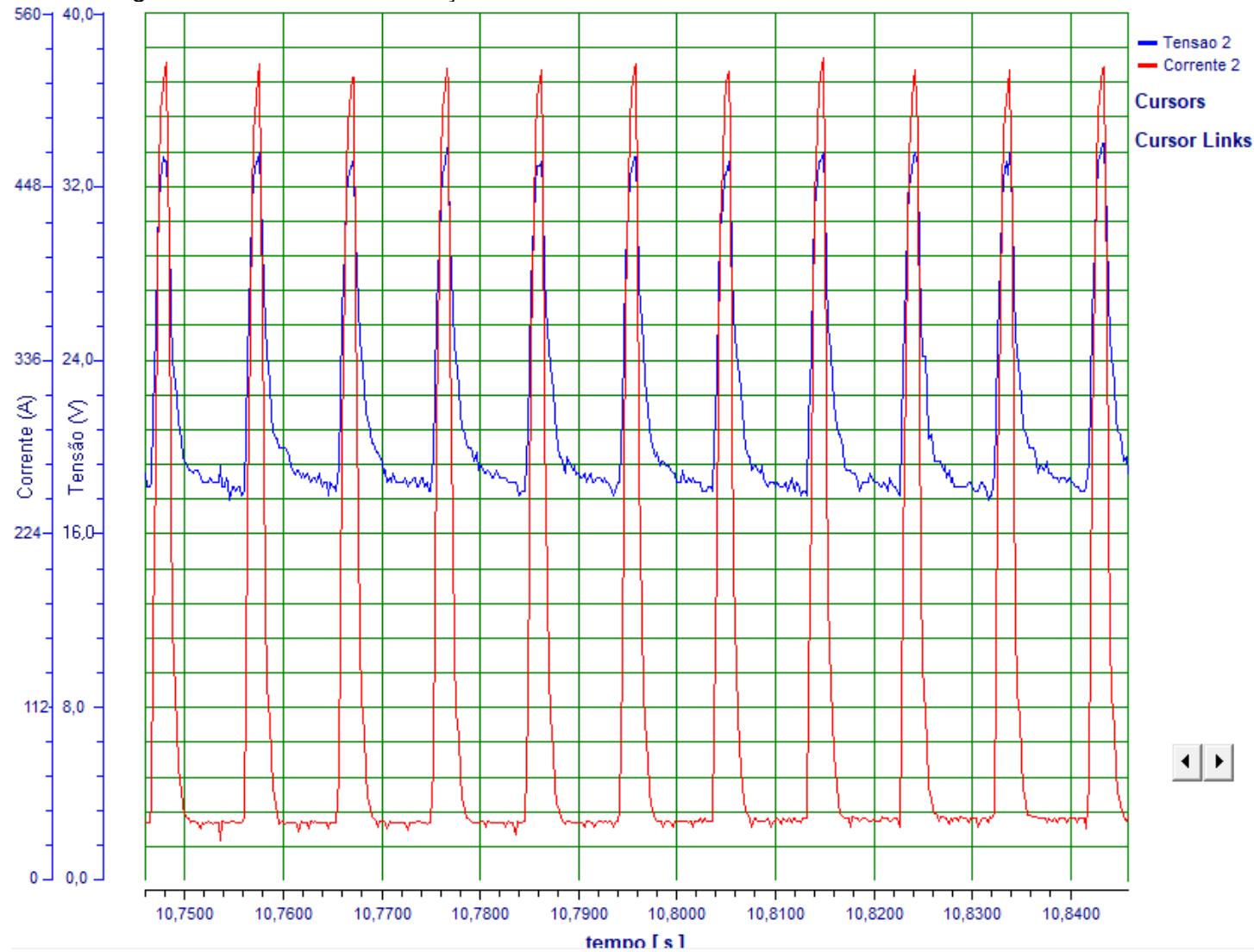


Figura 150 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 1 s.

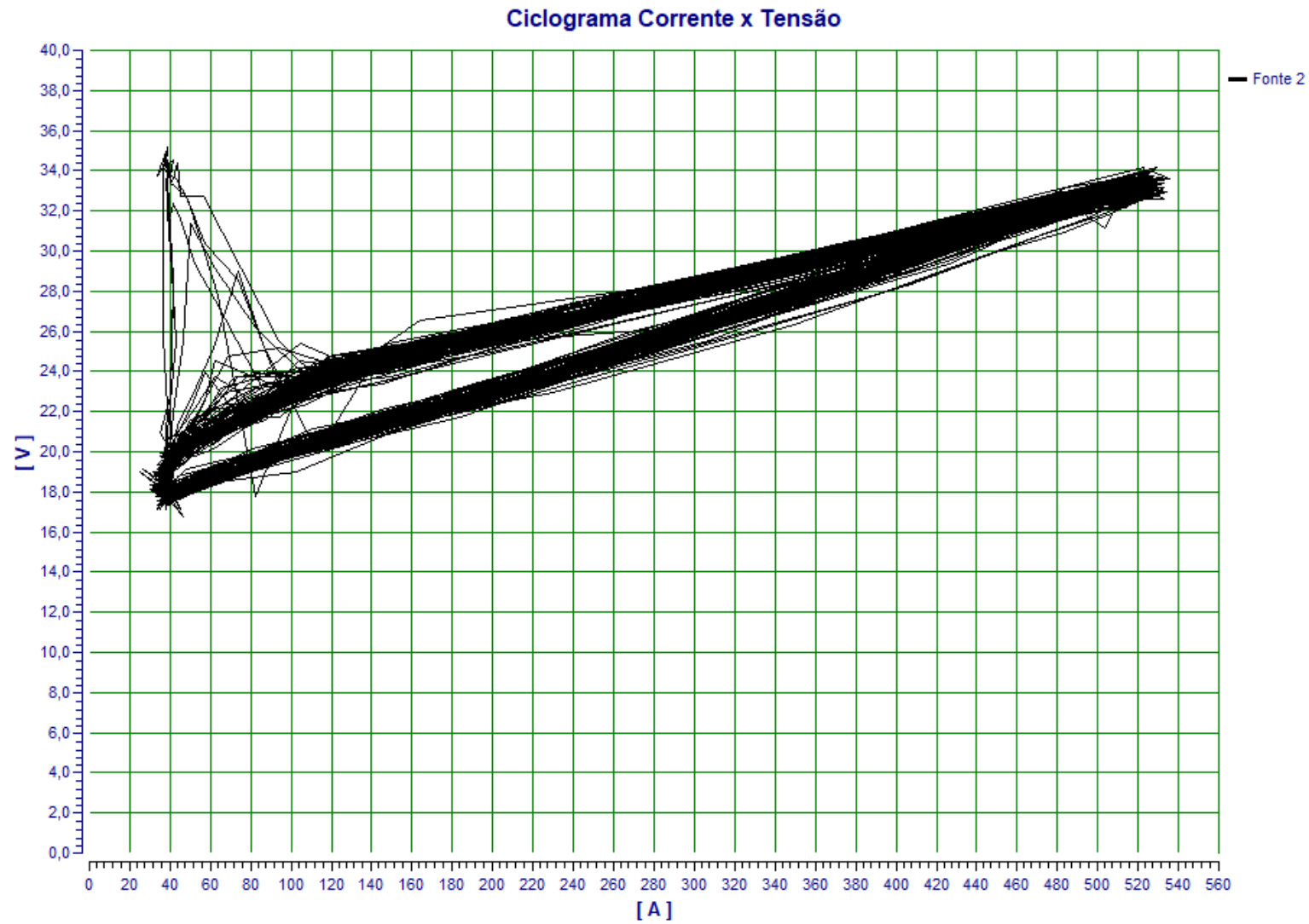


Figura 151 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 4,1 m/min, VS de 30 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

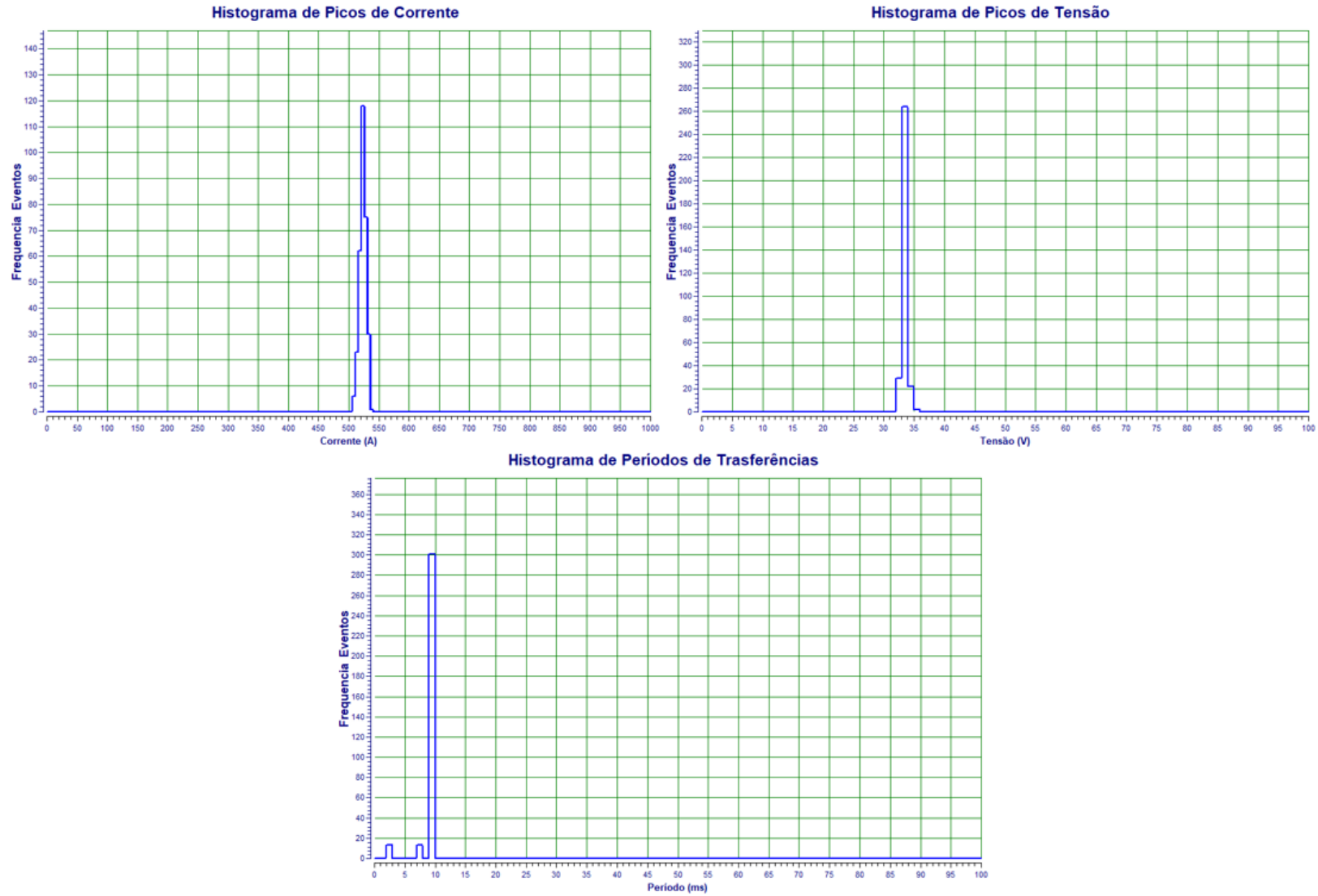


Figura 152 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 5,9 m/min e VS de 43 cm/min.

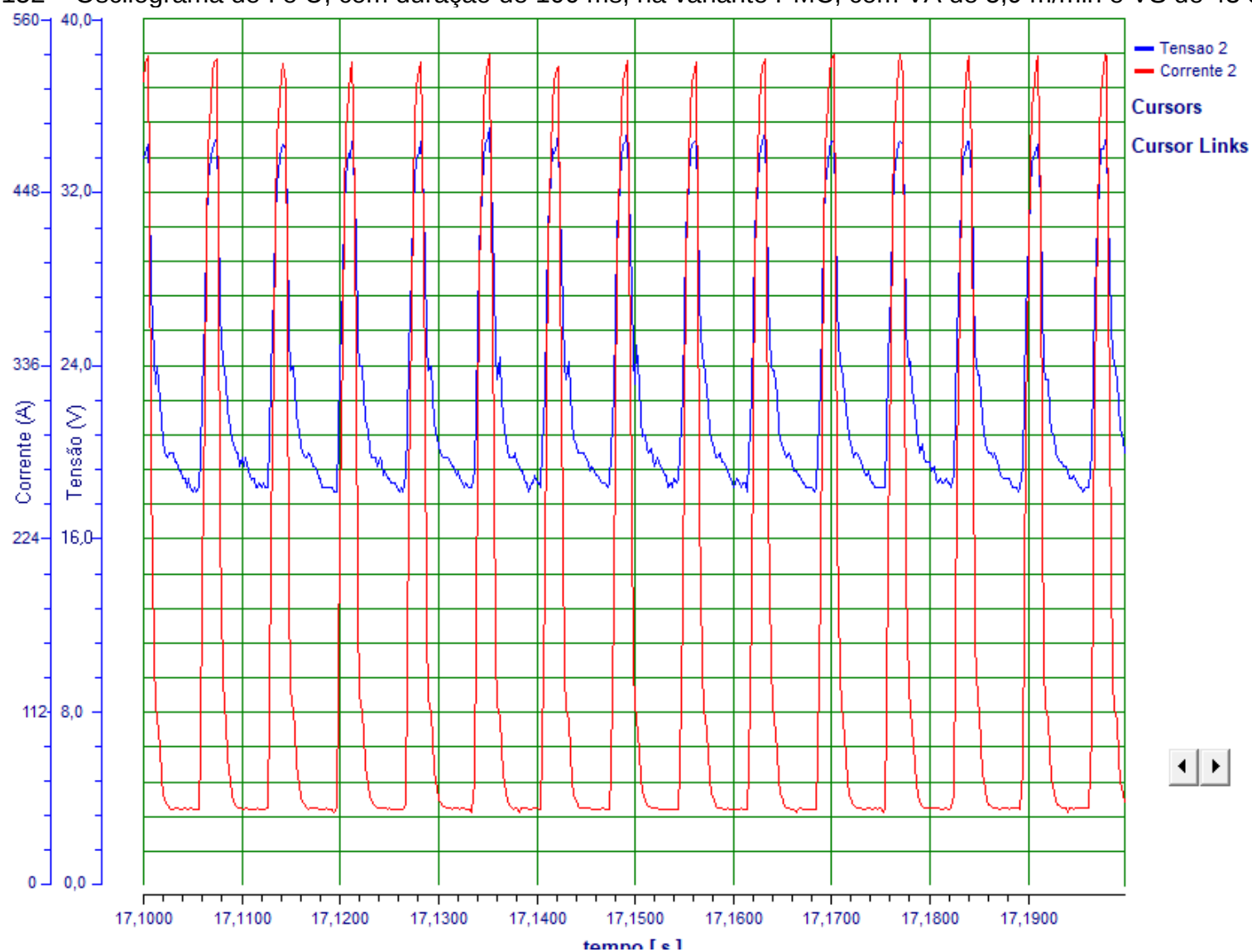


Figura 153 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 1 s.

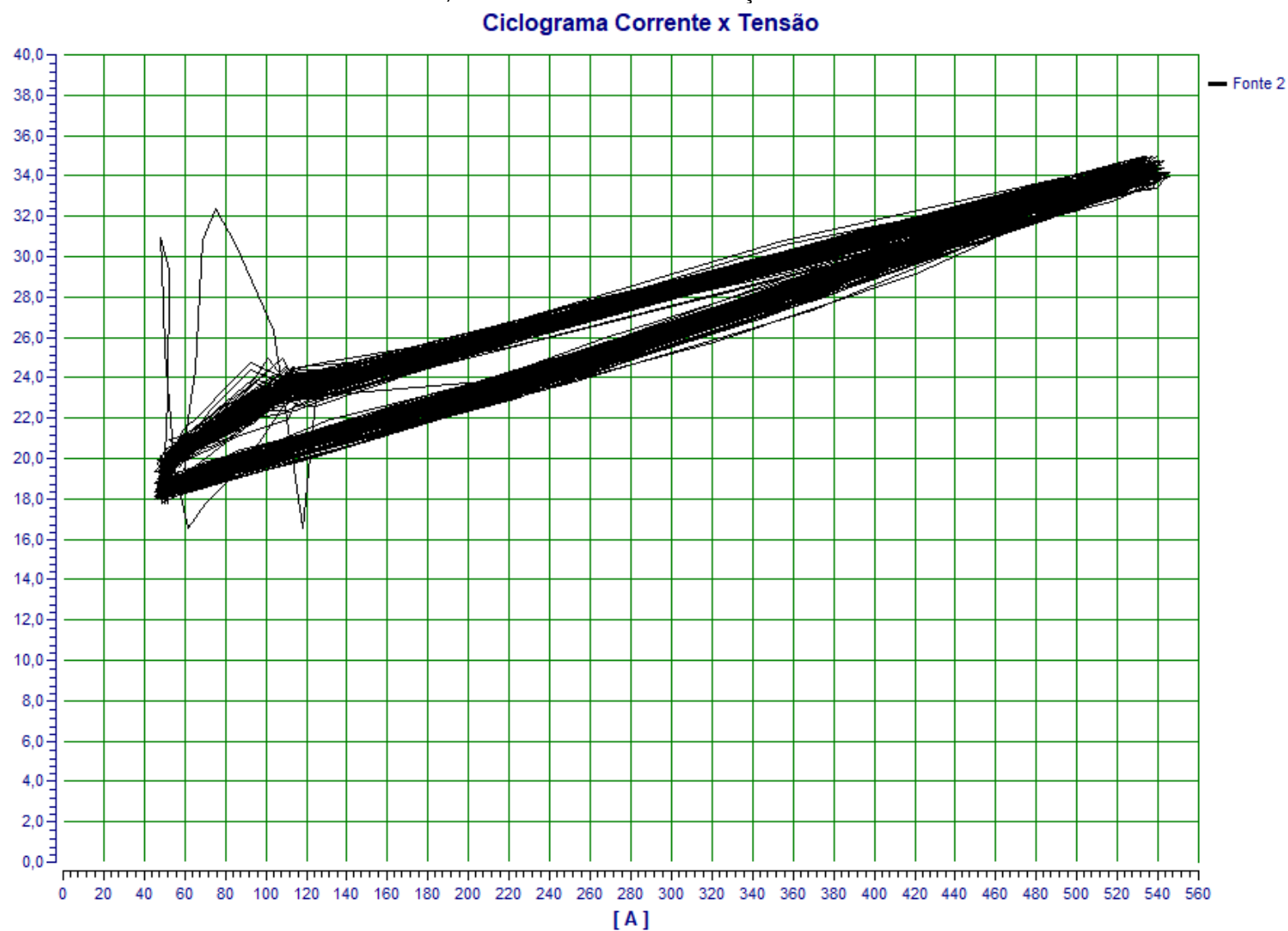


Figura 154 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 5,9 m/min, VS de 43 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

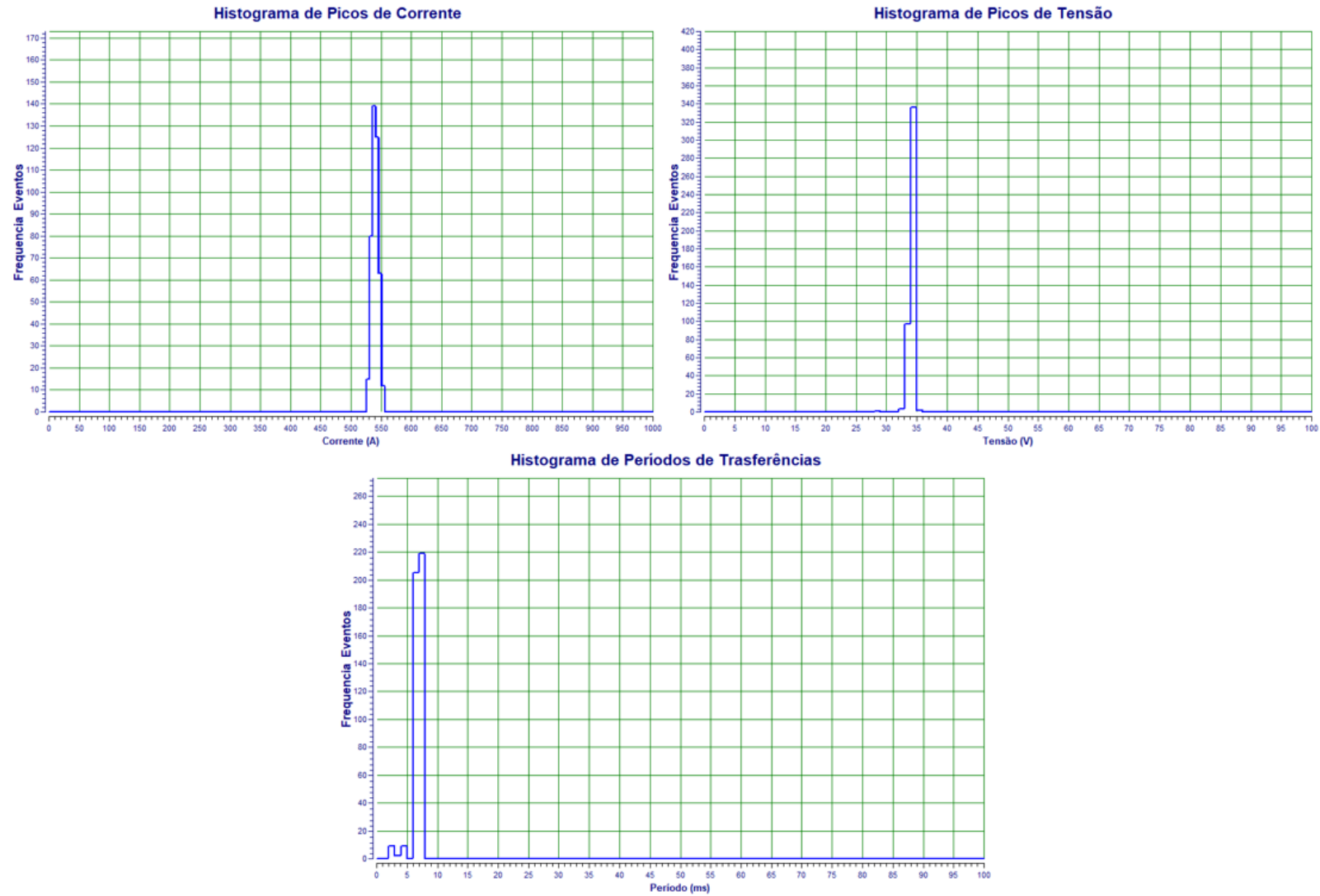


Figura 155 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 8,3 m/min e VS de 60 cm/min.

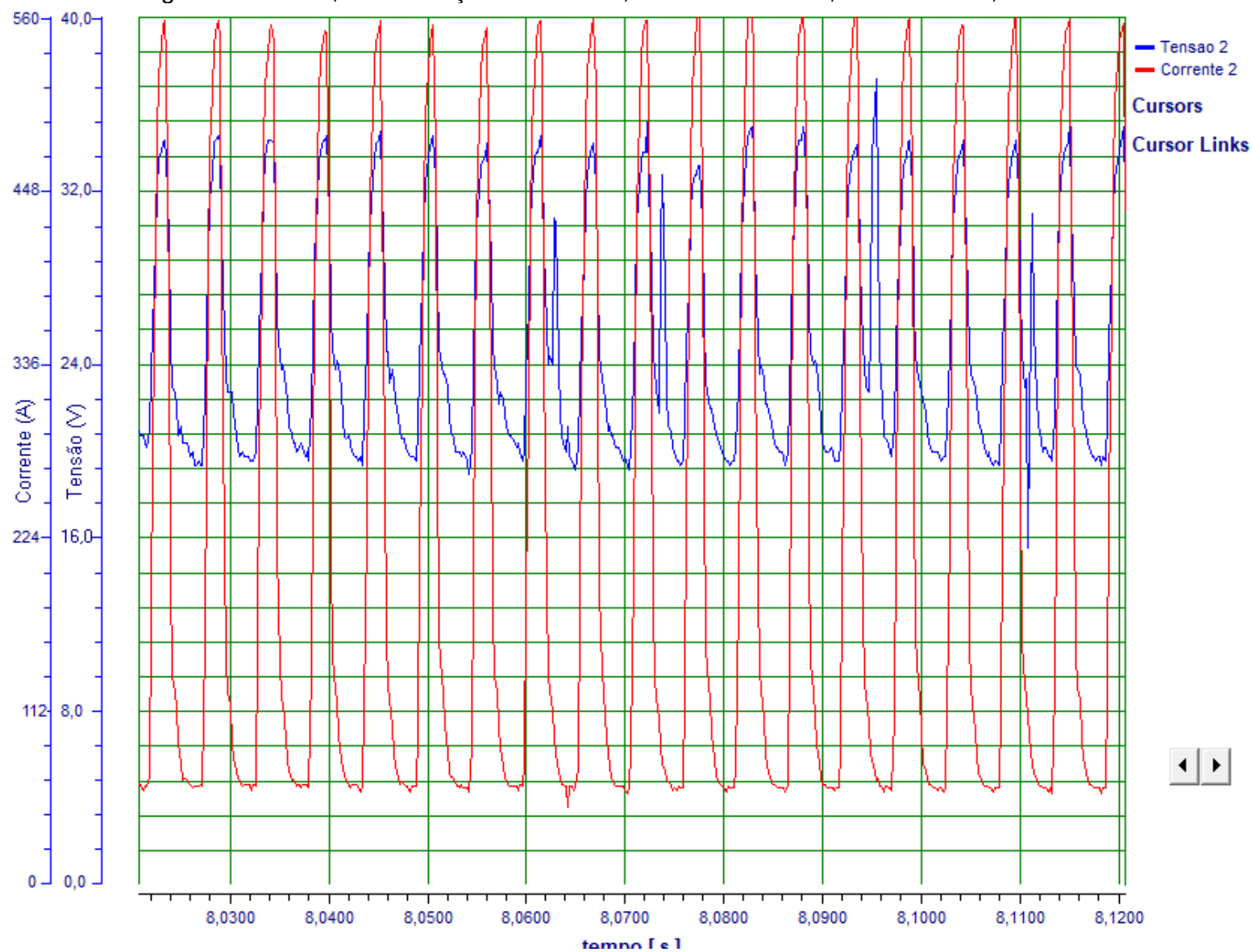


Figura 156 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 1 s.

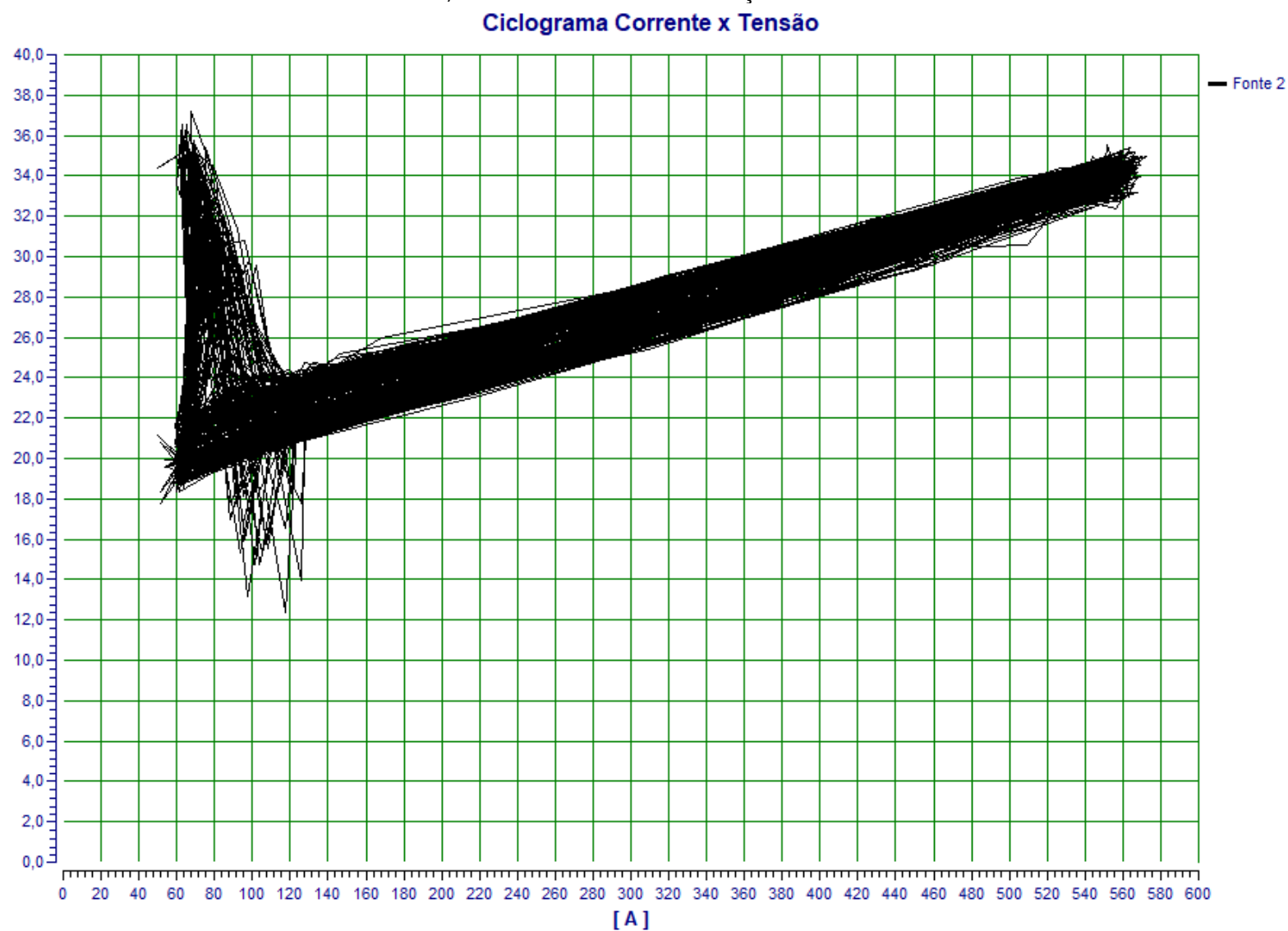


Figura 157 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 8,3 m/min, VS de 60 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

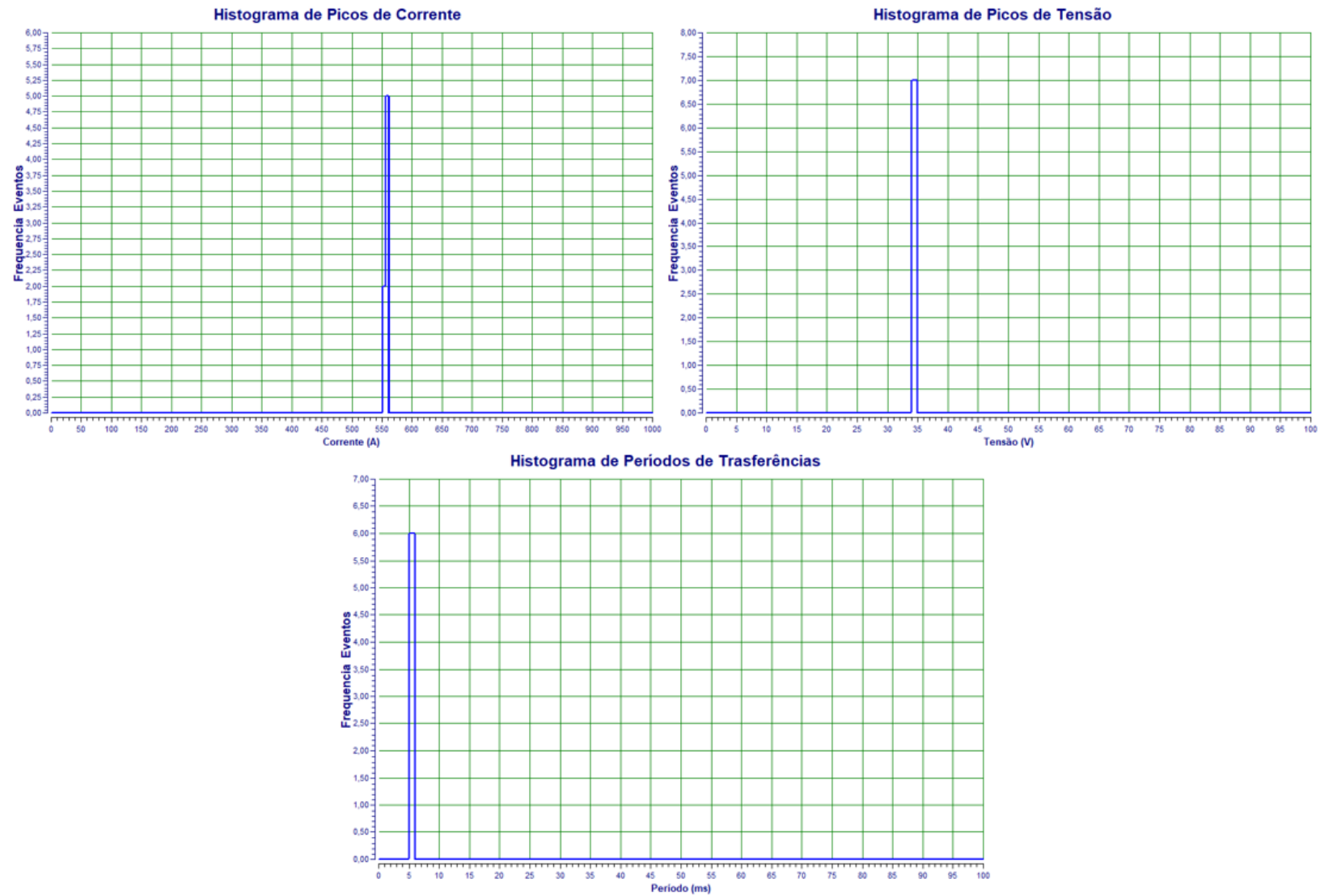


Figura 158 - – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 10,3 m/min e VS de 75 cm/min.

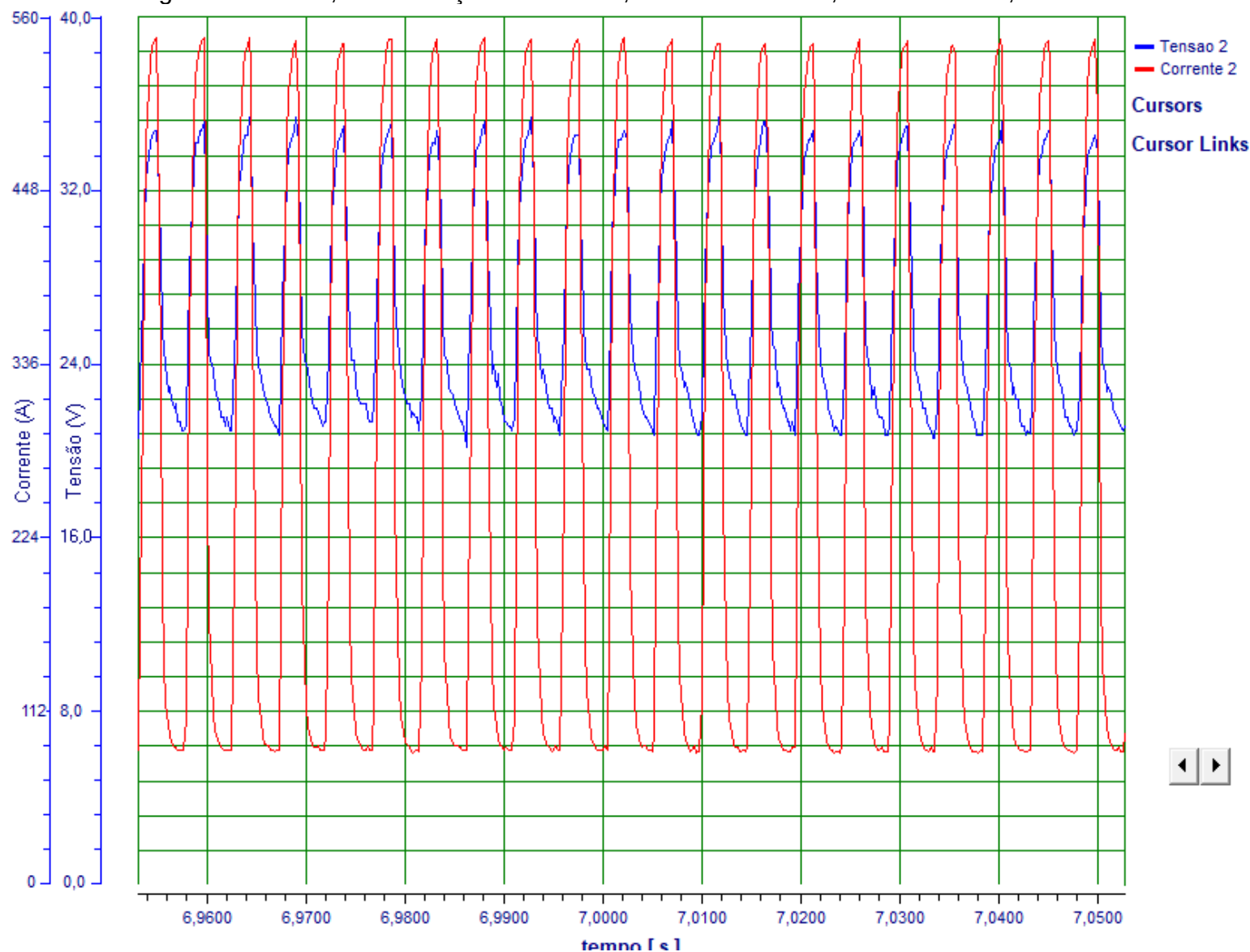


Figura 159 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 1 s.

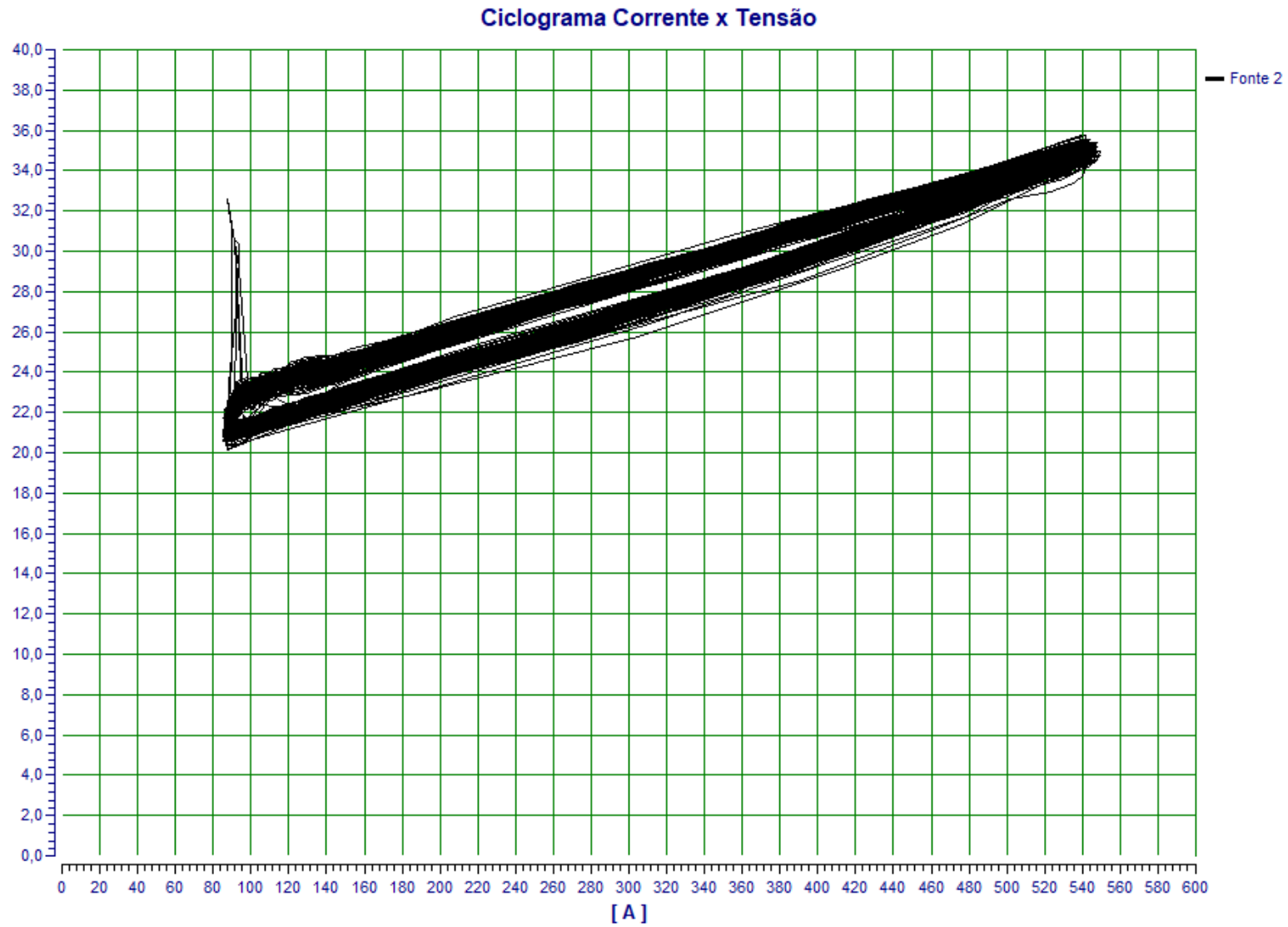


Figura 160 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 10,3 m/min, VS de 75 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

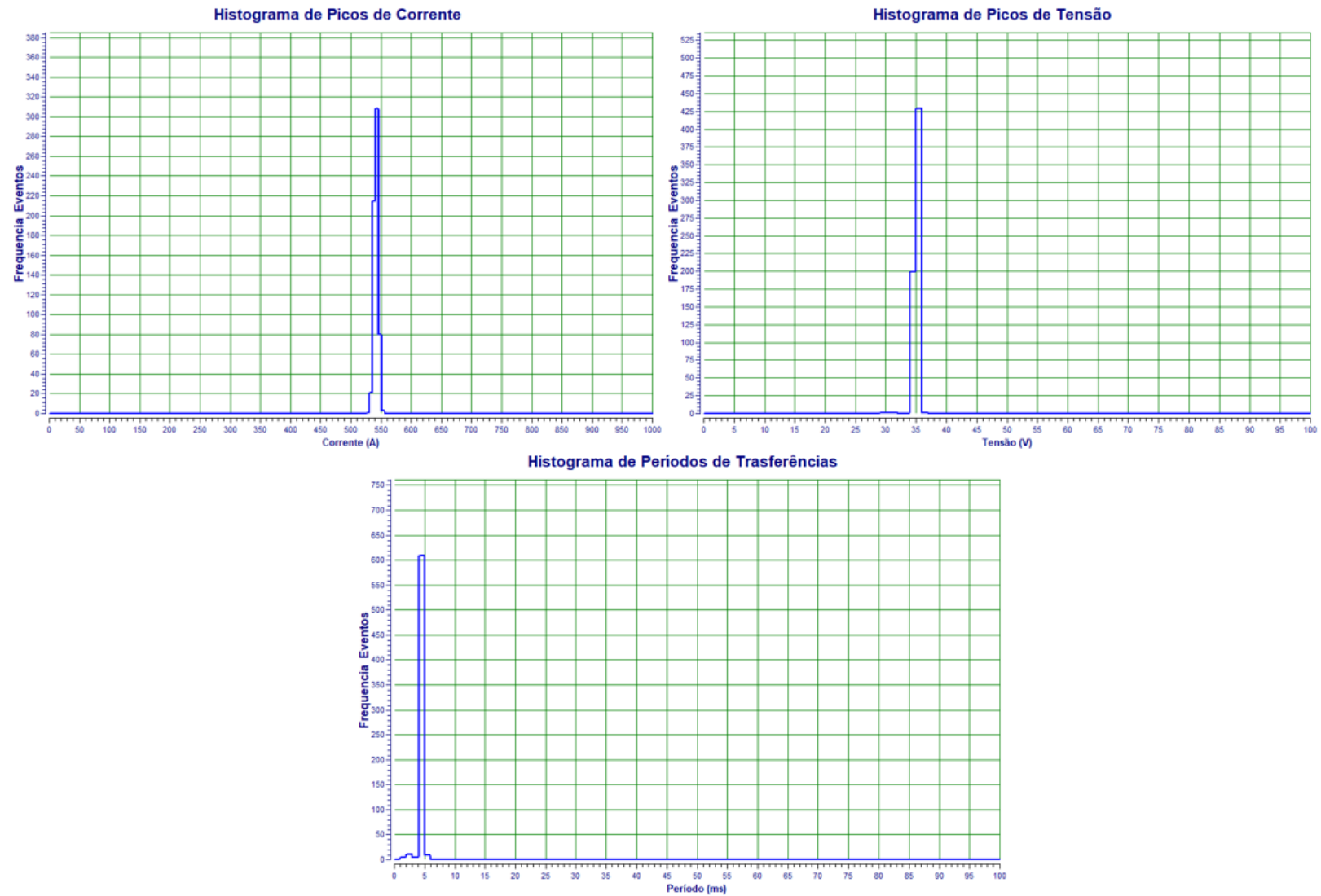


Figura 161 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 12,5 m/min e VS de 90 cm/min.

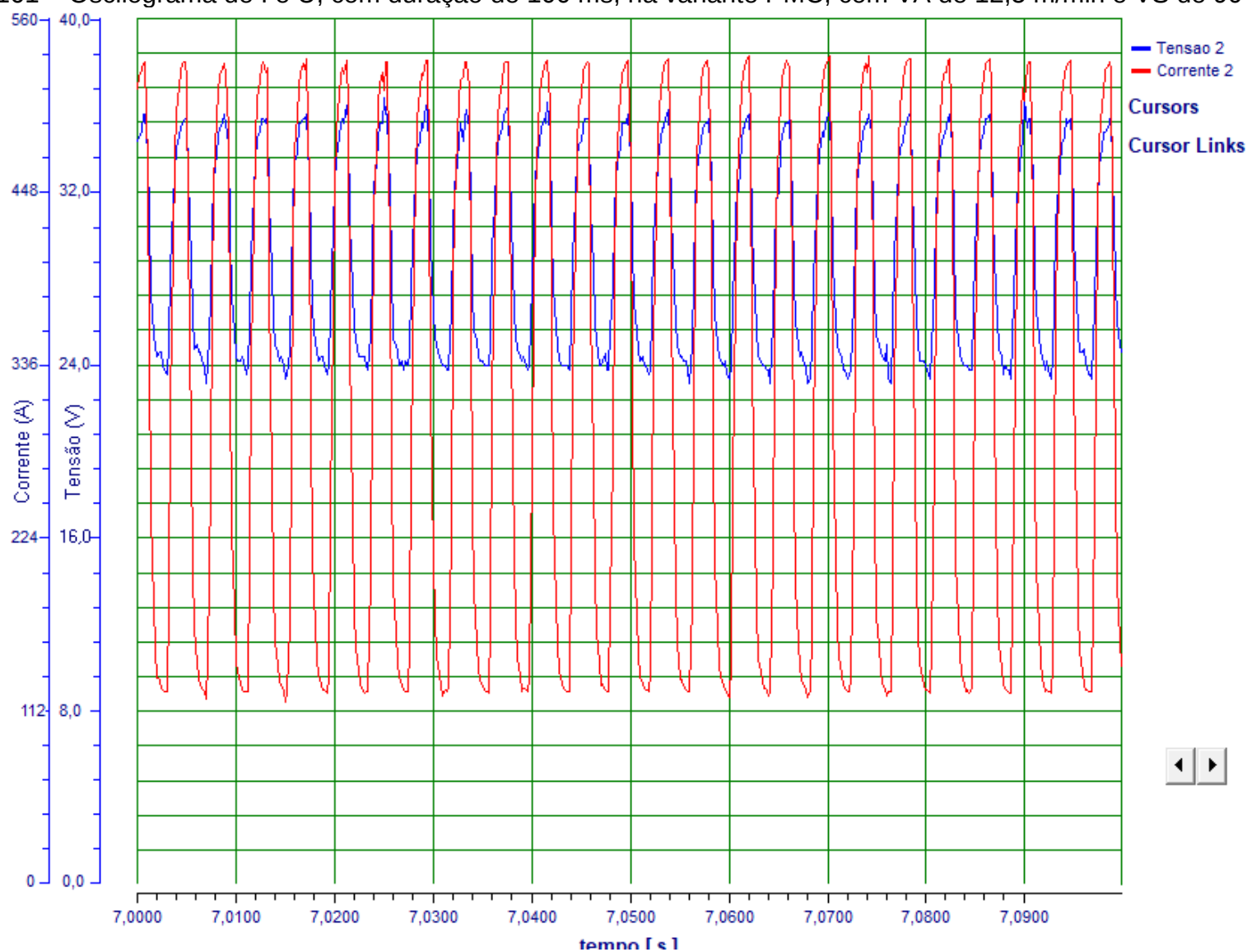


Figura 162 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 12,5 m/min, VS de 90 cm/min e duração total de 1 s.

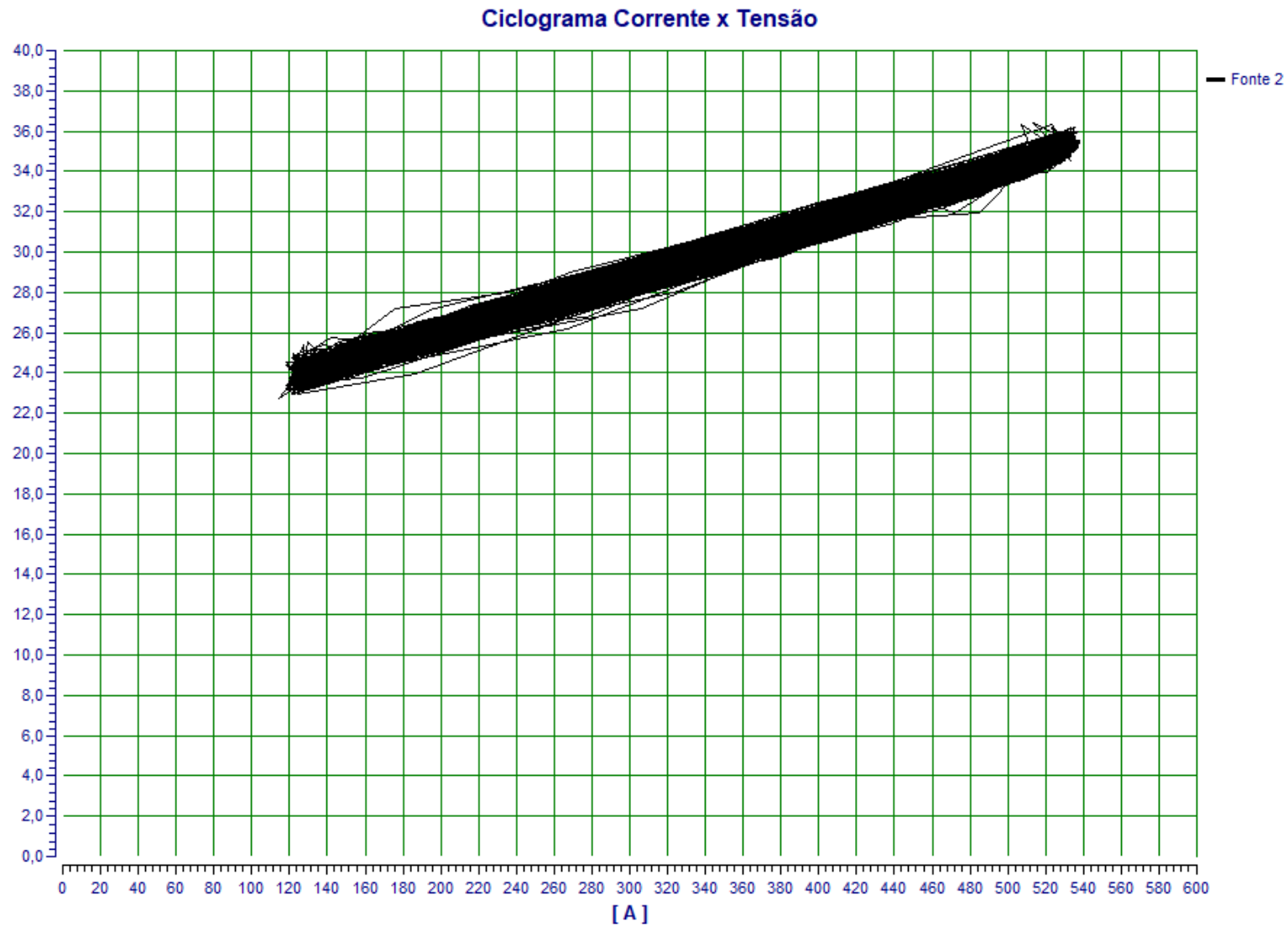


Figura 163 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 12,5 m/min, VS de 90 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.

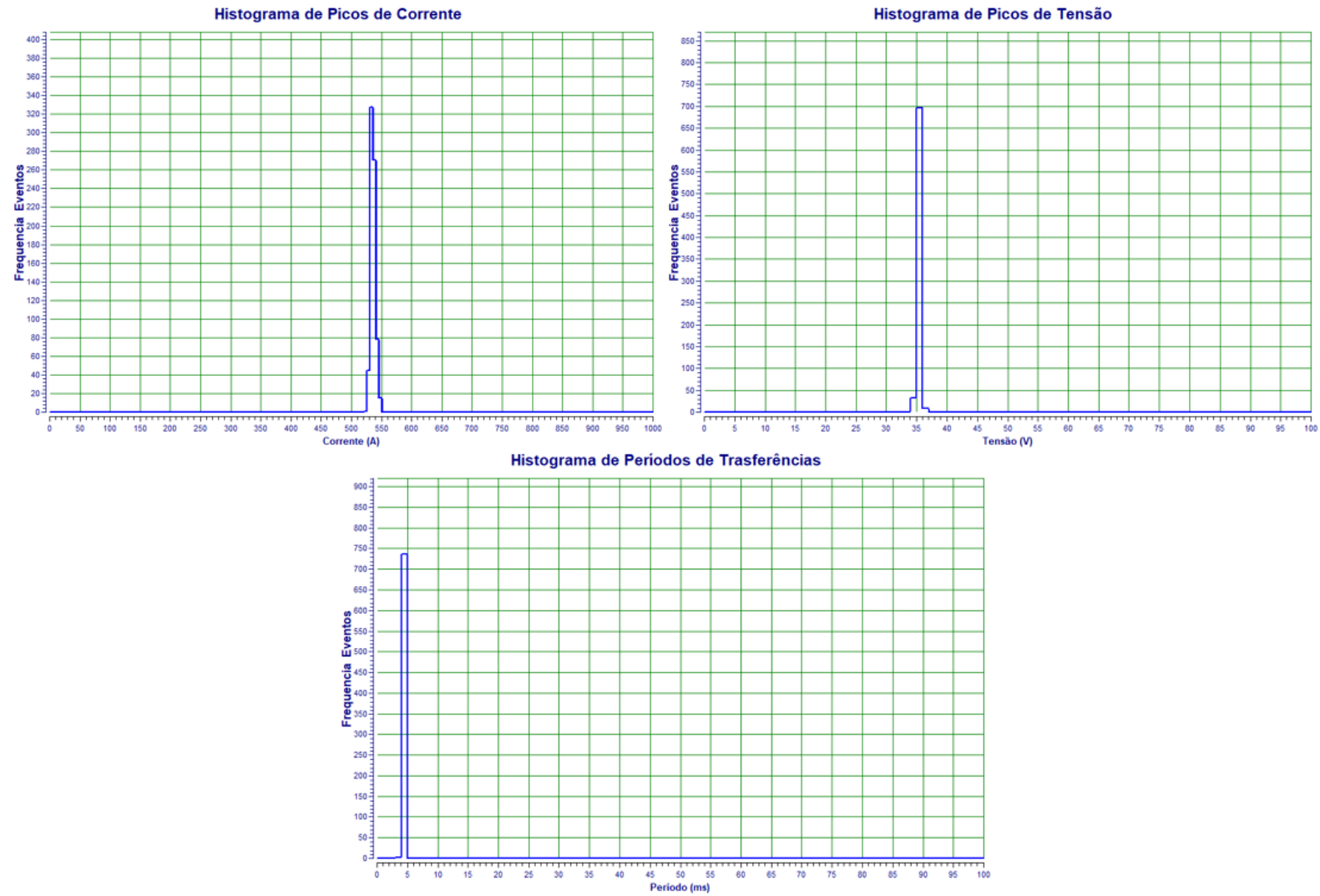


Figura 164 – Oscilograma de I e U, com duração de 100 ms, na variante PMC, com VA de 14,5 m/min e VS de 105 cm/min.

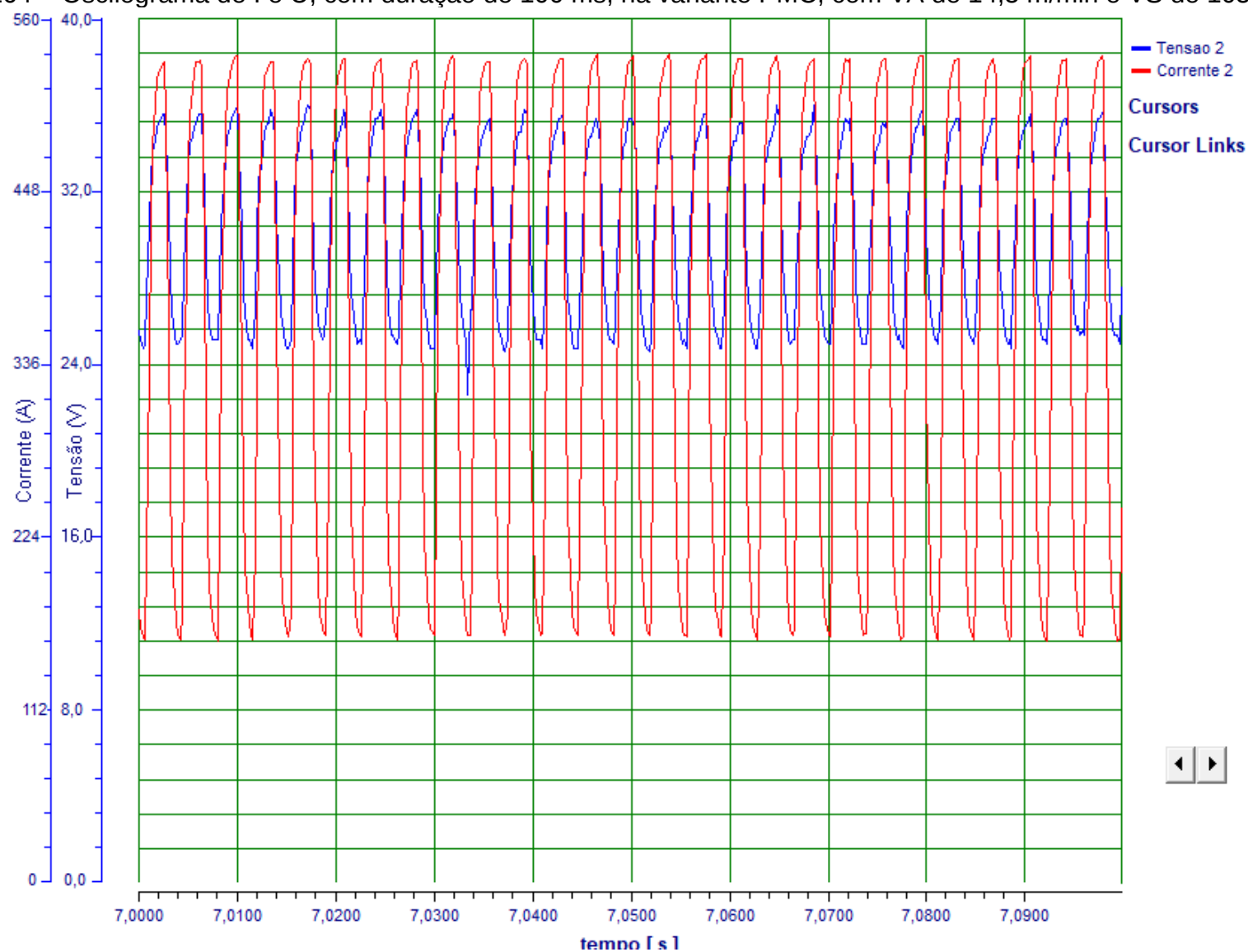


Figura 165 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, referente à variante PMC, com VA de 14,5 m/min, VS de 105 cm/min e duração total de 1 s.

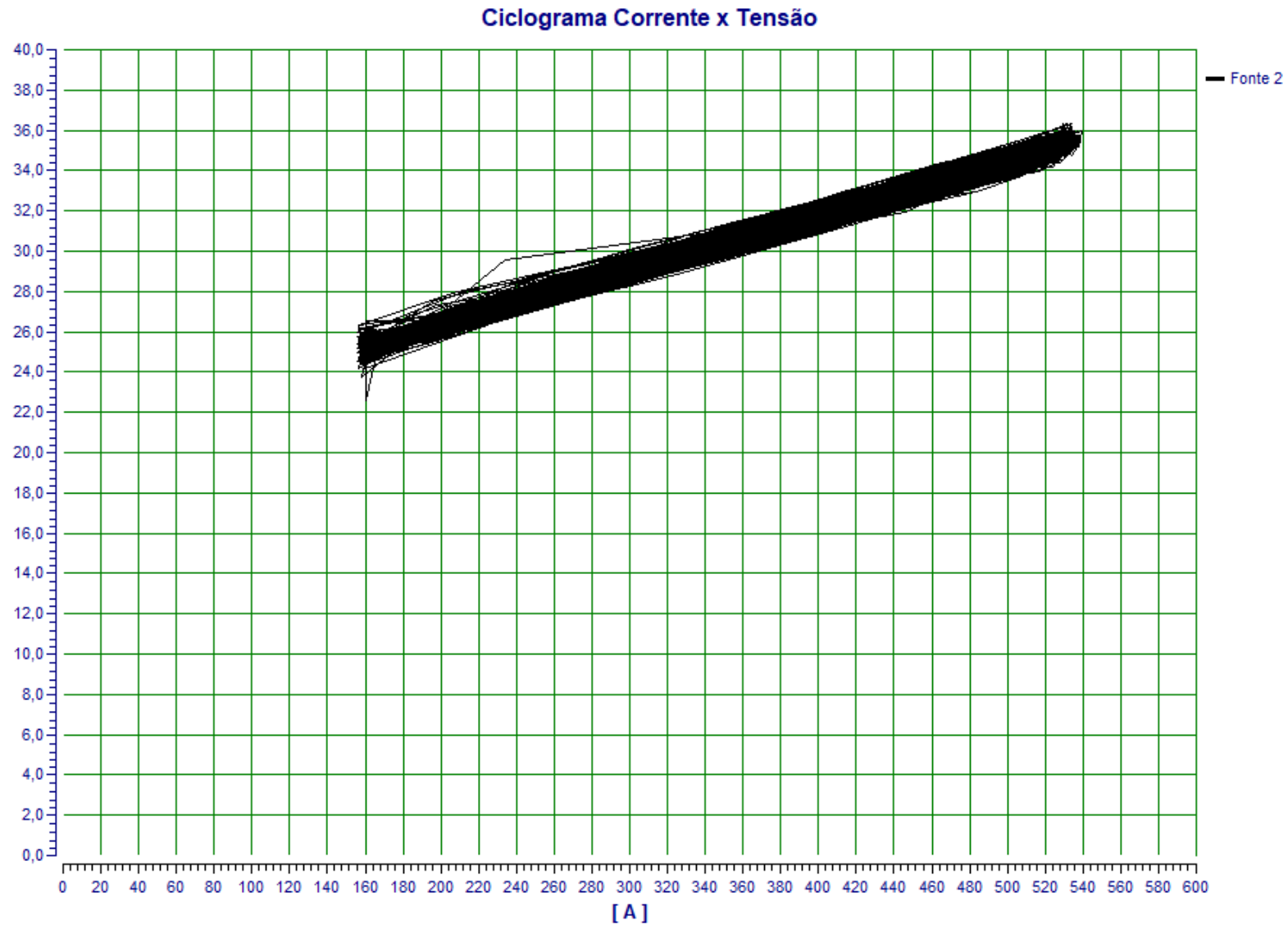
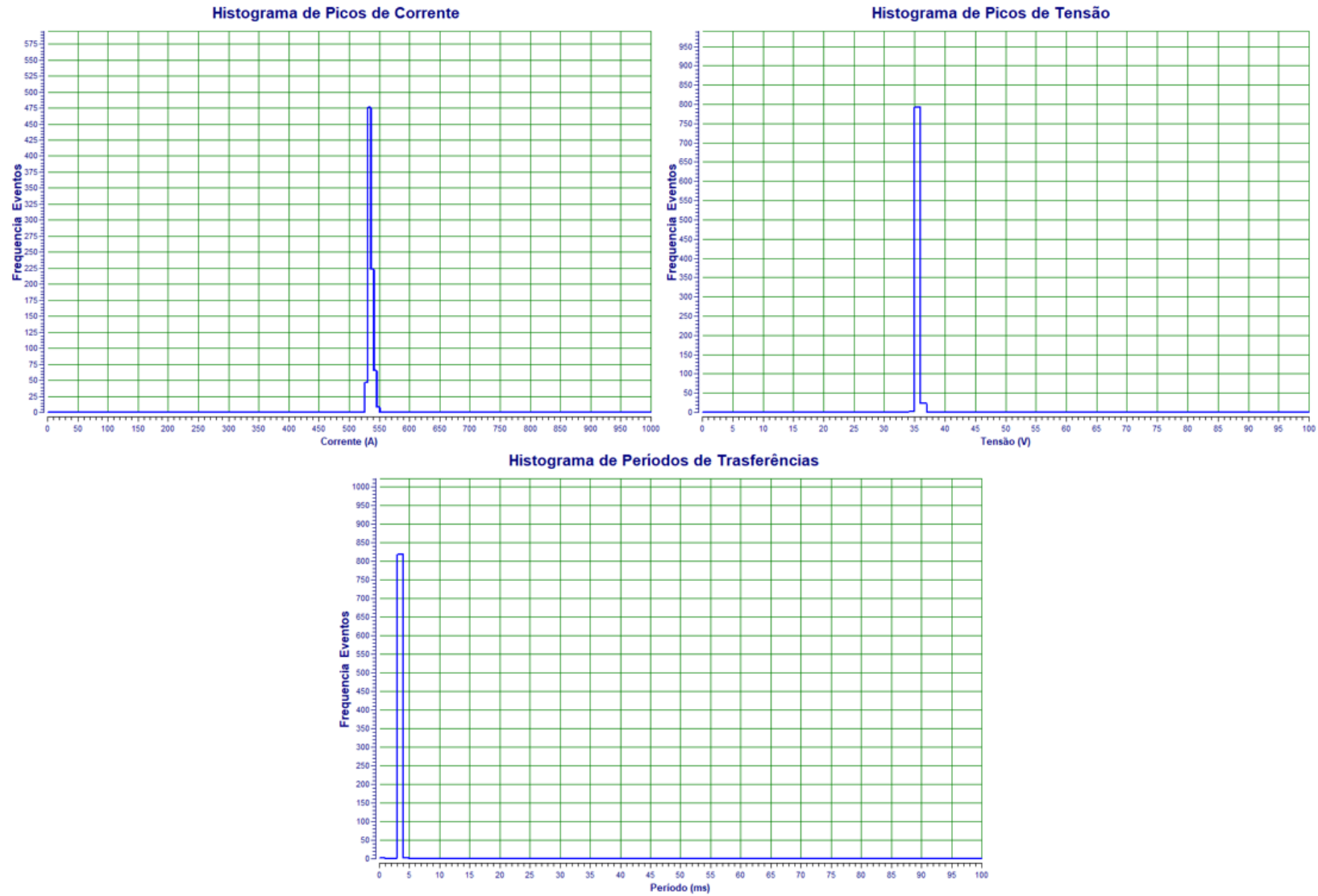


Figura 166 - Histogramas referentes à variante PMC, com VA de 14,5 m/min, VS de 105 cm/min e duração total de 3 s. O eixo horizontal representa a variável analisada, enquanto o eixo vertical indica o número de ocorrências.



APÊNDICE B – DADOS VARIANDO DBCP

A Tabela 23 apresenta os principais dados relacionados às diferentes variantes de soldagem na VA ajustada na fonte de 4,1 m/min (valor que pode variar a depender do controle da fonte) e VS de 30 cm/min (valor fixo em todos os casos) variando a DBCP. Os valores de corrente, tensão e VA foram aquisitados e organizados por meio do Sistema de Aquisição Portátil (SAP). Os dados foram analisados em intervalos de tempo correspondentes às passagens pelas DBCP de 12 mm, 15 mm, 18 mm, 21 mm, 24 mm, 27 mm e 30 mm na condição de cordões sobre chapa com comprimento de 20 cm. Onde o dado que não se aplica a determinada condição foi colocada a sigla “N/A”.

Os dados do PMC e PMC CP apresentados na Tabela 23 foram selecionados considerando pequenos intervalos nos quais não ocorreram curtos-circuitos acidentais, com o objetivo de compreender melhor como a fonte de soldagem busca impor a forma de onda de corrente. Em decorrência dessa seleção, os desvios padrão do PMC apresentados na tabela são inferiores aos desvios padrão reais do processo.

Para uma análise mais abrangente da estabilidade e dispersão do processo PMC e PMC CP, recomenda-se consultar os dados entre a Figura 212 e Figura 228, nas quais os ciclogramas e histogramas foram construídos com base em um intervalo de 1 s de aquisição de dados.

Vale ressaltar que a separação das fases de pulso e base foi realizada por meio do monitoramento da tensão, conforme descrito no item 3.3.3 deste documento.

As figuras entre a Figura 167 e Figura 235 fornecem os oscilogramas, ciclogramas e histogramas correspondentes às diferentes variantes de soldagem em diferentes DBCP, possibilitando uma análise detalhada do processo.

Tanto a tabela quanto as figuras deste apêndice são de autoria do próprio autor.

Tabela 23 - Dados processados e obtidos por meio do SAP das variantes avançadas em diferentes DBCP.

Modo	DBCP (mm)	Corrente de base (A)	VA média (m/min)	IM (A)	U média (V)	IE (A)	P (kW)	Vm (mm³)	Dm (mm)	Picos de corrente				Período				Picos de tensão			
										total de picos	média (A)	DP (A)	DPR (%)	Total	média (ms)	DP (ms)	DPR (%)	Total	média (V)	DP (V)	DPR (%)
PMC CP	12	38	4	122,6	21,4	198,3	3,4	0,73	1,12	8	529,9	2,8	0,5	7	9,7	0,1	1	8	33,4	0,3	0,8
PMC CP	15	38	4,2	117	21,5	190	3,2	0,76	1,13	13	513,4	2,1	0,4	13	9,6	0,1	0,9	13	34,2	0,2	0,7
PMC CP	18	38	4,6	117,4	21,7	190	3,3	0,84	1,17	16	513	2	0,4	15	9,7	0,1	0,9	16	35,6	0,3	0,7
PMC CP	21	38	5	117	22	187,6	3,4	0,91	1,2	4	514,1	3,8	0,7	3	9,7	0,1	1,2	4	36,6	0,3	0,9
PMC CP	24	38	5,3	117,6	22	189,7	3,5	0,91	1,2	6	509,4	4	0,8	5	9,7	0,1	1,1	6	37,8	0,4	1,1
PMC CP	27	38	5,6	116,5	22,7	187,5	3,6	1,02	1,25	4	511,6	1,9	0,4	3	9,7	0,1	1,2	4	39,8	0,4	0,9
PMC CP	30	38	6	116,9	23	187,5	3,6	1,09	1,28	5	510,7	1,5	0,3	5	9,6	0,1	0,9	5	40,6	0,3	0,8
CMT	12	N/A	4,5	159,3	16,2	178,5	3,3	0,56	1,02	150	257,5	0,8	0,3	150	6,6	0,5	8	150	25,2	1	3,9
CMT	15	N/A	4,7	155,7	16,5	174,4	3,2	0,59	1,04	150	257,1	1	0,4	149	6,6	0,5	7,1	150	25,6	1	3,8
CMT	18	N/A	4,8	151,5	16,8	169,7	3,2	0,6	1,05	150	256,3	1,5	0,6	149	6,6	0,4	5,8	150	26	0,9	3,5
CMT	21	N/A	5	149,4	17	167,2	3,2	0,63	1,06	149	256,5	1,1	0,4	149	6,7	0,3	4,9	149	26,4	0,6	2,2
CMT	24	N/A	5,2	147	17	164,4	3,2	0,66	1,08	147	256,7	1,4	0,5	147	6,8	0,3	3,8	147	26,9	0,2	0,7
CMT	27	N/A	5,3	142,8	17,4	160	3,1	0,68	1,09	147	255,5	2,2	0,9	145	6,8	0,3	4,1	146	27,5	0,6	2,3
CMT	30	N/A	5,5	141,4	17,5	158,2	3,1	0,71	1,11	146	255,9	1,6	0,6	146	6,8	0,3	4,4	146	27,9	0,5	1,8
Convencional	12	N/A	4,1	168,4	16,5	180,4	2,8	0,97	1,23	39	287,2	27,8	9,7	38	12,6	3,5	27,5	37	24,9	2	8,2
Convencional	15	N/A	4,1	159,3	16,6	171,5	2,6	0,97	1,23	38	274,3	36,3	13,2	38	12,6	4,5	35,8	36	24,7	2,1	8,4
Convencional	18	N/A	4,1	152,3	16,6	163,6	2,5	0,94	1,22	41	263,9	19,7	7,5	40	12,2	3,9	32,1	40	24,3	1,3	5,2
Convencional	21	N/A	4,1	143,4	16,8	157,9	2,4	1	1,24	38	264,5	31,7	12	37	13	5,1	39	36	25,2	1,4	5,5
Convencional	24	N/A	4,1	134,5	16,8	146,7	2,2	1,05	1,26	36	250,4	23	9,2	36	13,6	4,2	31	37	25,1	1,7	6,7
Convencional	27	N/A	4,1	129,1	16,9	142,4	2,2	1,13	1,29	34	250,6	26,5	10,6	33	14,6	4,1	28,1	33	25,4	1,1	4,4
Convencional	30	N/A	4,1	124,4	16,8	136,6	2,1	1,04	1,26	36	239,6	19,8	8,3	35	13,4	4,1	30,3	36	25,3	0,9	3,4
LSC	12	N/A	4,1	169,1	17	177,6	2,8	0,91	1,2	N/A	N/A	N/A	N/A	41	11,8	5,3	45,3	32	24,8	2,8	11,3
LSC	15	N/A	4,1	161,5	17,5	171,3	2,8	0,88	1,19	N/A	N/A	N/A	N/A	43	11,4	5,6	48,9	29	24,5	2,6	10,5
LSC	18	N/A	4,1	147,2	17,9	159,3	2,6	0,98	1,23	N/A	N/A	N/A	N/A	38	12,6	6,6	52,5	26	26	2,6	10
LSC	21	N/A	4,1	136,5	18,1	150,2	2,5	1,22	1,33	N/A	N/A	N/A	N/A	31	15,8	7,1	44,8	25	25,7	2,9	11,4
LSC	24	N/A	4,1	133,1	18,2	148,3	2,4	1,22	1,32	N/A	N/A	N/A	N/A	31	15,7	7,6	48	25	27,6	3,2	11,5
LSC	27	N/A	4,1	125,8	18,3	141	2,3	1,38	1,38	N/A	N/A	N/A	N/A	27	17,8	6,3	35,3	24	25,8	1,7	6,4
LSC	30	N/A	4,1	120,9	18,4	136,7	2,2	1,44	1,4	N/A	N/A	N/A	N/A	26	18,6	7,7	41,3	23	26,6	2,3	8,6

Modo	DBCP (mm)	Corrente de base (A)	VA média (m/min)	IM (A)	U média (V)	IE (A)	P (kW)	Vm (mm³)	Dm (mm)	Picos de corrente				Período				Picos de tensão			
										total de picos	média (A)	DP (A)	DPR (%)	Total	média (ms)	DP (ms)	DPR (%)	Total	média (V)	DP (V)	DPR (%)
LSC CP	12	N/A	3,6	152,3	17,4	164,4	2,6	1,01	1,25	N/A	N/A	N/A	N/A	33	14,9	7,7	51,8	27	24,4	2,4	10
LSC CP	15	N/A	3,8	150,9	17,7	162,6	2,7	1	1,24	N/A	N/A	N/A	N/A	34	13,9	6,9	49,7	26	25	2,4	9,4
LSC CP	18	N/A	3,9	147,7	17,7	160,7	2,6	1,02	1,25	N/A	N/A	N/A	N/A	34	13,9	7,2	51,7	27	25	2,1	8,3
LSC CP	21	N/A	4,1	146,5	18,1	158,5	2,6	1,05	1,26	N/A	N/A	N/A	N/A	35	13,6	6,7	49	26	25,6	2,5	9,7
LSC CP	24	N/A	4,2	139,7	18	153,6	2,5	1,17	1,31	N/A	N/A	N/A	N/A	33	14,8	7,1	48,4	28	25,7	2	7,6
LSC CP	27	N/A	4,4	141,2	18,3	154,2	2,6	1,27	1,34	N/A	N/A	N/A	N/A	31	15,4	7	45,8	26	26,7	3	11,2
LSC CP	30	N/A	4,4	133,9	18,5	147,4	2,5	1,23	1,33	N/A	N/A	N/A	N/A	32	14,9	6,5	43,9	26	26,4	2,3	8,7
PMC	12	38	4,1	125,4	21,3	203,3	3,4	0,72	1,11	15	537,5	4,2	0,8	14	9,3	0,1	1,4	15	32,9	0,4	1,1
PMC	15	38	4,1	117,8	21,3	191,3	3,2	0,75	1,13	38	513,3	3,5	0,7	37	9,7	0,1	1	38	33,5	0,3	0,8
PMC	18	38	4,1	110,5	21,4	180,9	3,1	0,79	1,15	48	501,5	2,3	0,5	48	10,3	0,1	1,3	49	34,8	0,3	0,9
PMC	21	38	4,1	104,2	21,9	171,3	3	0,85	1,18	45	488,4	2,2	0,4	45	11	0,1	0,9	45	36,1	0,2	0,7
PMC	24	38	4,1	98,8	21,9	163,3	2,8	0,88	1,19	45	460,3	90,4	19,6	42	11,4	0,1	0,7	43	37	0,3	0,9
PMC	27	38	4,1	94,8	22	156,8	2,8	0,92	1,21	41	470,8	2,7	0,6	40	12	0,1	1	41	38	0,3	0,8
PMC	30	38	4,1	91,4	22	150,9	2,7	0,96	1,22	40	461,9	2,1	0,5	39	12,4	0,1	0,9	40	39	0,4	1
Standard	12	N/A	4,1	169	16	177,4	2,7	0,82	1,16	N/A	N/A	N/A	N/A	47	10,6	4,6	43,5	39	23,7	2,1	8,8
Standard	15	N/A	4,1	161,3	17,1	168	2,8	0,92	1,21	N/A	N/A	N/A	N/A	40	11,9	5,3	44,4	33	24,4	2,4	9,7
Standard	18	N/A	4,1	152,3	17,3	160,2	2,6	1	1,24	N/A	N/A	N/A	N/A	37	12,9	5,3	41,1	31	24,5	1,9	7,6
Standard	21	N/A	4,1	146,7	17,7	154,5	2,6	1,12	1,29	N/A	N/A	N/A	N/A	33	14,5	6,9	47,9	31	24,5	1,8	7,5
Standard	24	N/A	4,1	144,3	17,8	152	2,5	1,18	1,31	N/A	N/A	N/A	N/A	31	15,2	5,4	35,2	29	24,9	1,3	5,4
Standard	27	N/A	4,1	136,7	18,4	144,4	2,5	1,29	1,35	N/A	N/A	N/A	N/A	29	16,7	5,4	32,3	28	25,6	1,8	7,1
Standard	30	N/A	4,1	130,6	18,6	138,5	2,4	1,39	1,38	N/A	N/A	N/A	N/A	27	18	4,2	23,4	26	26,2	1,7	6,3

Modo	DBCP (mm)	Arco / Pulso								Curto-circuito / Base								Frequência			Energia de soldagem (kJ/cm)
		Total	média (ms)	DP (ms)	DPR (%)	U média (V)	IM (A)	IE (A)	P (W)	Total	média (ms)	DP (ms)	DPR (%)	U média (V)	IM (A)	IE (A)	P (W)	média (Hz)	DP (Hz)	DPR (%)	
PMC CP	12	7	2,8	0,4	13,6	29,2	354,4	383,7	10,8	7	7,2	0,1	1,9	18,8	43,7	47	0,8	103,1	1,1	1	6,8
PMC CP	15	12	3,7	0,4	12,1	27,1	266,1	318,2	8	13	6,3	0,4	5,6	18,6	38,4	38,6	0,7	104,2	1,1	0,9	6,4
PMC CP	18	15	2,7	0,2	7,4	29,9	332,2	364,6	10,6	15	7,2	0,1	1,2	18,8	42,4	45,6	0,8	103,1	1,1	0,9	6,6
PMC CP	21	3	1,7	0,6	33,6	35,7	474,1	464,5	16,5	3	8,4	0	0	20	65	91,2	1,5	103,1	1,1	1,2	6,8
PMC CP	24	5	3	0,5	18,3	31,1	329,1	359,4	10,9	5	7,2	0,1	1,2	18,7	41,2	43,2	0,8	103,1	1,1	1,1	7
PMC CP	27	3	4,9	1,5	31,4	28,8	242,2	297,7	8,1	3	6	0,4	6,7	18,9	38,5	38,2	0,7	103,1	1,1	1,2	7,2
PMC CP	30	4	1,9	0,5	25,1	37,3	437,8	435,1	16,2	5	8,1	0,1	1,3	20,2	55,1	68,7	1,2	104,2	1,1	0,9	7,2
CMT	12	149	4,6	0,4	8	22,8	198,9	209,9	4,7	150	2,1	0,2	10,7	2,1	73,6	74	0,2	151,5	11	8	6,6
CMT	15	149	4,6	0,3	7,3	23	193,5	204,6	4,6	150	2,1	0,2	10,7	2,2	72,8	73,1	0,2	151,5	11	7,1	6,4
CMT	18	149	4,6	0,3	5,5	23,4	187,8	198,8	4,6	150	2,1	0,2	8,9	2,4	71,5	71,6	0,2	151,5	9,2	5,8	6,4
CMT	21	148	4,6	0,3	5,4	23,6	184,3	195,5	4,6	149	2,1	0,1	6,9	2,5	72,1	72,1	0,2	149,3	6,7	4,9	6,4
CMT	24	146	4,6	0,2	4,1	23,7	181,7	192,7	4,5	148	2,1	0,1	6,2	2,6	72,3	72,3	0,2	147,1	6,5	3,8	6,4
CMT	27	145	4,7	0,2	4,9	24	175,1	186,6	4,4	146	2,1	0,1	7,1	2,8	71,6	71,6	0,2	147,1	6,5	4,1	6,2
CMT	30	145	4,7	0,2	4,5	24,2	173,2	184,7	4,4	146	2,1	0,2	8,3	2,9	71,7	71,7	0,2	147,1	6,5	4,4	6,2
Convencional	12	37	10	3	29,8	20,4	161,2	173,4	3,4	39	2,9	0,6	19,9	2,9	193,5	202,6	0,6	79,4	22	27,5	5,6
Convencional	15	37	10,1	4,2	41,9	20,2	151,3	163,6	3,2	39	2,7	0,7	25,3	3,3	189	159	0,6	79,4	28	35,8	5,2
Convencional	18	39	9,8	3,9	40,1	20,2	145,2	156,8	3	41	2,7	0,3	11,4	3,6	177,6	185,4	0,7	82,0	26	32,1	5
Convencional	21	36	10,4	4,9	47	20,4	133,1	147,7	2,8	38	2,9	0,6	20,9	4,1	189,7	0,8		76,9	30	39	4,8
Convencional	24	36	11	4	36,6	20,1	125,8	137,7	2,6	36	2,8	0,5	18,3	4,3	168,4	176,9	0,8	73,5	23	31	4,4
Convencional	27	32	12	3,8	31,9	20	119,4	132,2	2,5	34	2,9	0,6	20,4	4,6	167,7	177,1	0,8	68,5	19	28,1	4,4
Convencional	30	35	11	3,9	35,7	20	114,9	126,9	2,4	36	2,8	0,4	14,7	4,9	160,4	168,4	0,8	74,6	23	30,3	4,2
LSC	12	41	9,4	4,8	50,4	21	162,9	171,8	3,5	42	2,6	1,3	48,8	3,1	190,9	196,3	0,6	84,7	38	45,3	5,6
LSC	15	42	9,3	4,6	49,4	21	153,9	163,9	3,3	43	2,3	1,4	63,1	3,4	192	198,3	0,7	87,7	43	48,9	5,6
LSC	18	26	10,6	5,6	53,1	21	21,2	151,7	3,1	39	2,3	1,3	57,6	4	4,2	189,5	0,7	79,4	42	52,5	5,2
LSC	21	30	13,6	6,3	45,9	20,7	127,5	141,2	2,8	31	2,6	1,1	43	4,2	183,3	190,3	0,8	63,3	28	44,8	5
LSC	24	30	13,6	6,8	49,9	20,9	122,8	137,8	2,7	32	2,6	1,1	42,7	4,7	185,1	192,4	0,9	63,7	31	48	4,8
LSC	27	26	15,7	5,6	35,5	20,8	115,6	130,1	2,6	28	2,8	0,9	31,7	4,9	182,3	190,1	0,9	56,2	20	35,3	4,6
LSC	30	25	16,5	7,2	43,4	20,6	109,8	124,3	2,4	27	2,8	0,9	33,7	5,5	183,8	192	1	53,8	22	41,3	4,4

Modo	DBCP (mm)	Arco / Pulso								Curto-circuito / Base								Frequência			Energia de soldagem (kJ/cm)
		Total	média (ms)	DP (ms)	DPR (%)	U média (V)	IM (A)	IE (A)	P (W)	Total	média (ms)	DP (ms)	DPR (%)	U média (V)	IM (A)	IE (A)	P (W)	média (Hz)	DP (Hz)	DPR (%)	
LSC CP	12	32	12,7	7	54,9	20,4	143,8	155,8	3	33	2,6	1,3	50,5	3,1	193,5	200,6	0,6	67,1	35	51,8	5,2
LSC CP	15	34	11,6	6,1	53	20,9	143	155	3,1	35	2,6	1,2	45,9	3,5	185,8	192,3	0,6	71,9	36	49,7	5,4
LSC CP	18	33	11,6	6,6	56,7	20,8	138,2	151,7	3	35	2,7	1,1	41,1	3,9	188,9	195,1	0,7	71,9	37	51,7	5,2
LSC CP	21	34	11,5	5,9	51,4	21,1	138,1	150,1	3	36	2,5	1,2	47,9	4,2	185,3	192,6	0,8	73,5	36	49	5,2
LSC CP	24	32	12,6	6,4	51,3	20,8	128,9	142,5	2,8	34	2,6	1,2	45,8	4,7	189,4	196,8	0,9	67,6	32	48,4	5
LSC CP	27	30	13	6,5	49,6	21,2	131,3	144,2	2,9	32	2,8	1	37,3	5	187,3	194,2	1	64,9	30	45,8	5,2
LSC CP	30	31	12,7	5,7	45	21,2	124,1	137,1	2,8	33	2,6	1,1	42,3	5,3	182	189,5	1	67,1	29	43,9	5
PMC	12	14	2,6	0,2	7,7	28,5	354,2	386,3	10,6	14	6,9	0,1	2,1	18,7	42,6	45,7	0,8	107,5	1,2	1,4	6,8
PMC	15	37	2,6	0,1	5,4	28,7	331,3	364,9	10,1	38	7,1	0,1	1,8	18,7	41,2	43,1	0,8	103,1	1,1	1	6,4
PMC	18	48	2,6	0,1	4,4	29,3	317,7	352,3	10	48	7,7	0,1	1,7	18,8	40,5	42,3	0,8	97,1	0,9	1,3	6,2
PMC	21	45	2,8	0,2	5,5	29,7	292,7	331,3	9,4	45	8,2	0,2	2	19,1	39,3	40,2	0,8	90,9	0,8	0,9	6
PMC	24	42	11,4	0,1	6,4	34,9	429,4	431,4	15,1	43	10,1	0,1	1,1	20,1	54,6	72,5	1,2	87,7	0,8	0,7	5,6
PMC	27	40	3	0,2	5,2	30,3	271,8	311,4	9,1	41	9,1	0,2	1,7	19,3	38,4	38,8	0,7	83,3	0,7	1	5,6
PMC	30	39	3	0,2	6,1	30,6	261,5	301,6	8,9	39	9,5	0,2	1	19,3	38,5	38,8	0,7	80,6	0,7	0,9	5,4
Standard	12	46	8	3,7	45,9	20,6	165,1	174,4	3,5	47	2,8	1,6	55,7	3	180	185,4	0,5	94,3	41	43,5	5,4
Standard	15	39	9,4	4,2	45,3	21,1	157,9	164,8	3,4	41	2,8	1,4	51,6	3,3	173,2	178,4	0,6	84,0	37	44,4	5,6
Standard	18	36	10,3	4,5	44	21,3	147	155,2	3,2	38	2,9	1,3	45,6	3,7	171	176,4	0,6	77,5	32	41,1	5,2
Standard	21	33	12	6,3	52,4	21,2	140,5	148,1	3	33	3	1,2	39,3	4	170,5	176,7	0,7	69,0	33	47,9	5,2
Standard	24	31	12,4	4,8	38,5	21,5	137,9	145,5	3	32	3,3	1,2	36,4	4,3	167,7	173,4	0,7	65,8	23	35,2	5
Standard	27	28	14	5	35,6	21,5	130,3	137,5	2,9	29	3,2	0,9	27,2	4,7	164,4	170,7	0,8	59,9	19	32,3	5
Standard	30	26	15,3	3,4	22	21,6	123,6	130,8	2,7	28	3,2	0,8	24,1	5	162,7	169,5	0,8	55,6	13	23,4	4,8

Curto-circuito convencional:

Figura 167 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Convencional e DBCP de 12 mm.

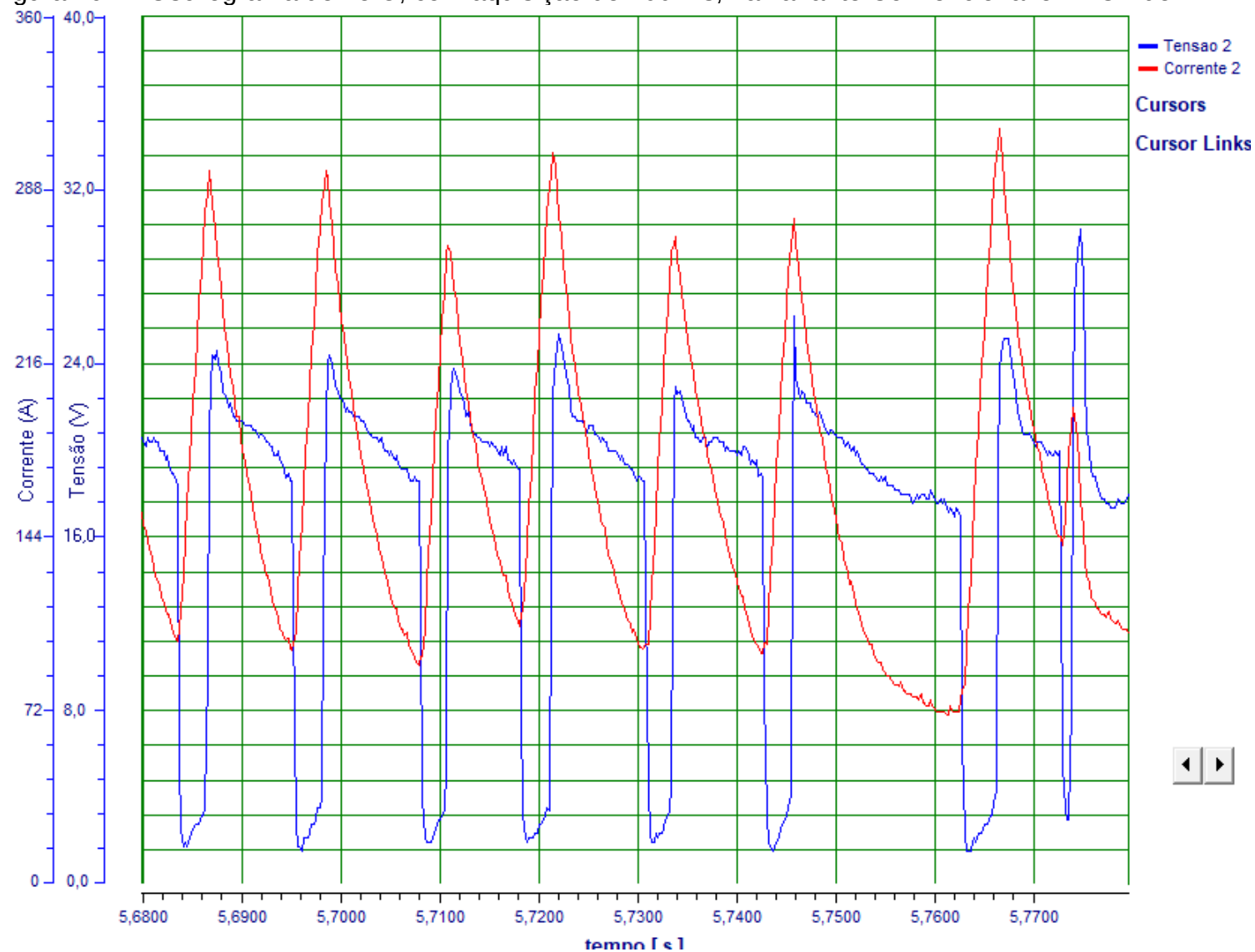


Figura 168 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 12 mm.

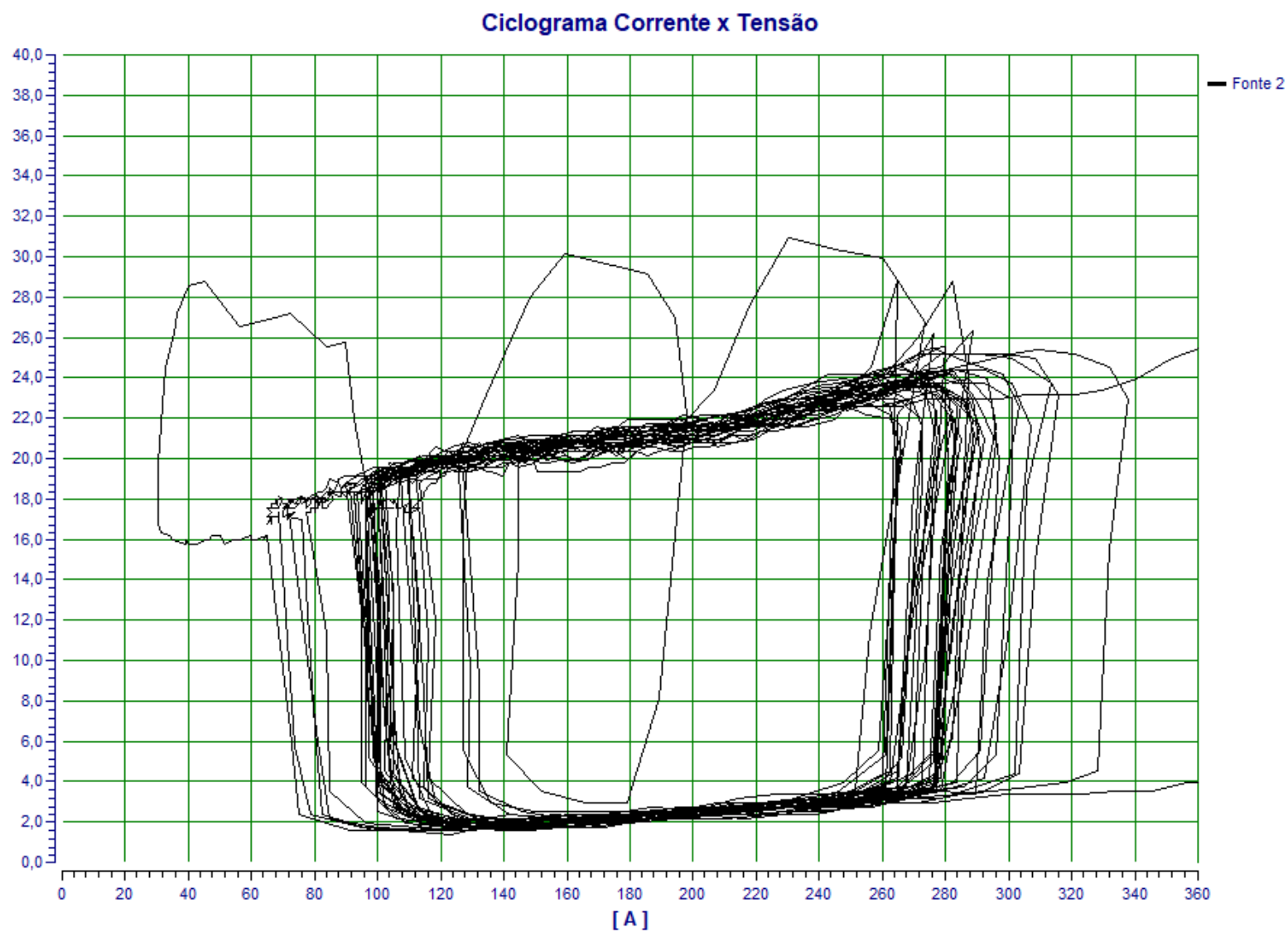


Figura 169 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 12 mm.

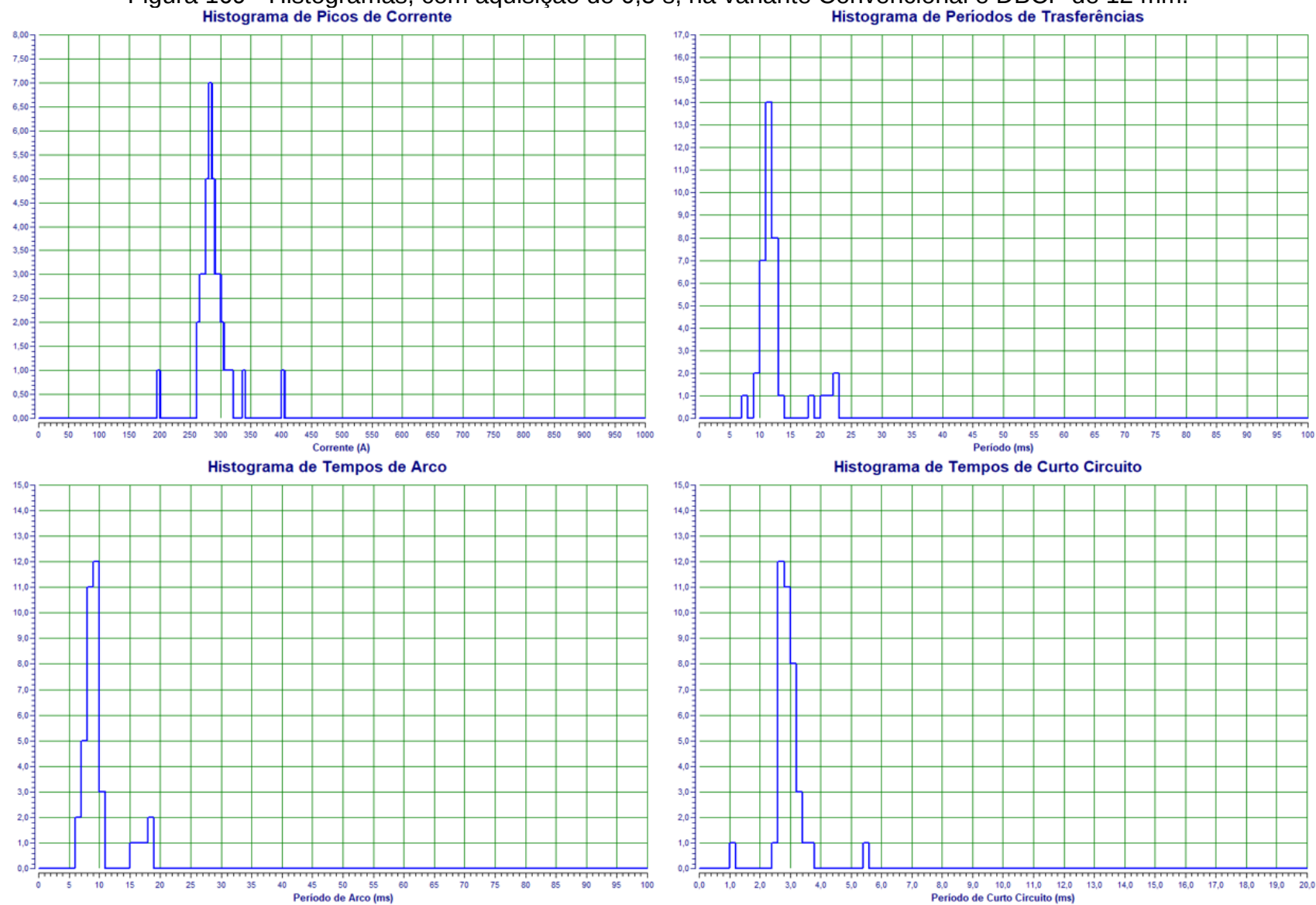


Figura 170 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Convencional e DBCP de 21 mm.

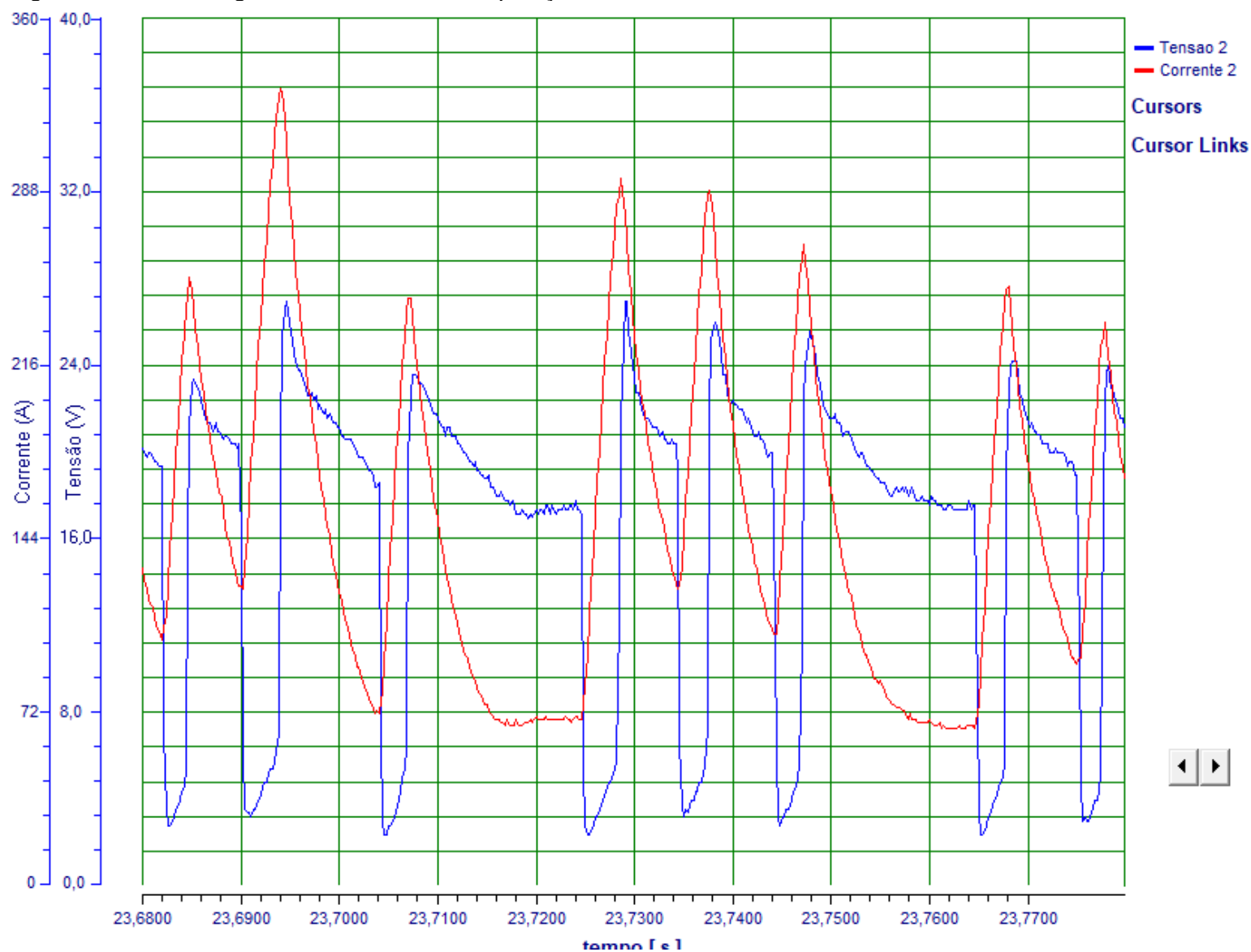


Figura 171 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 21 mm.

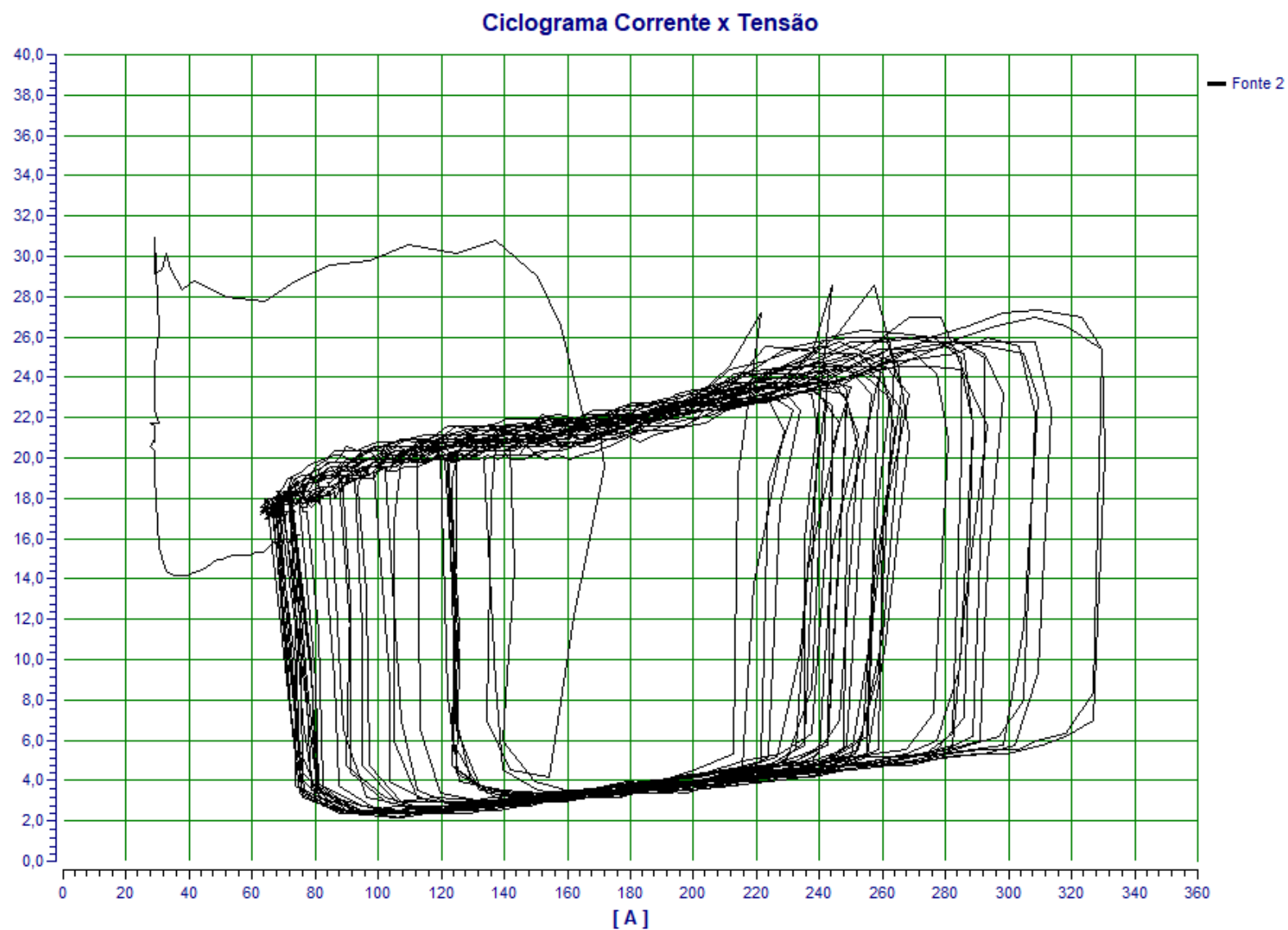


Figura 172 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 21 mm.

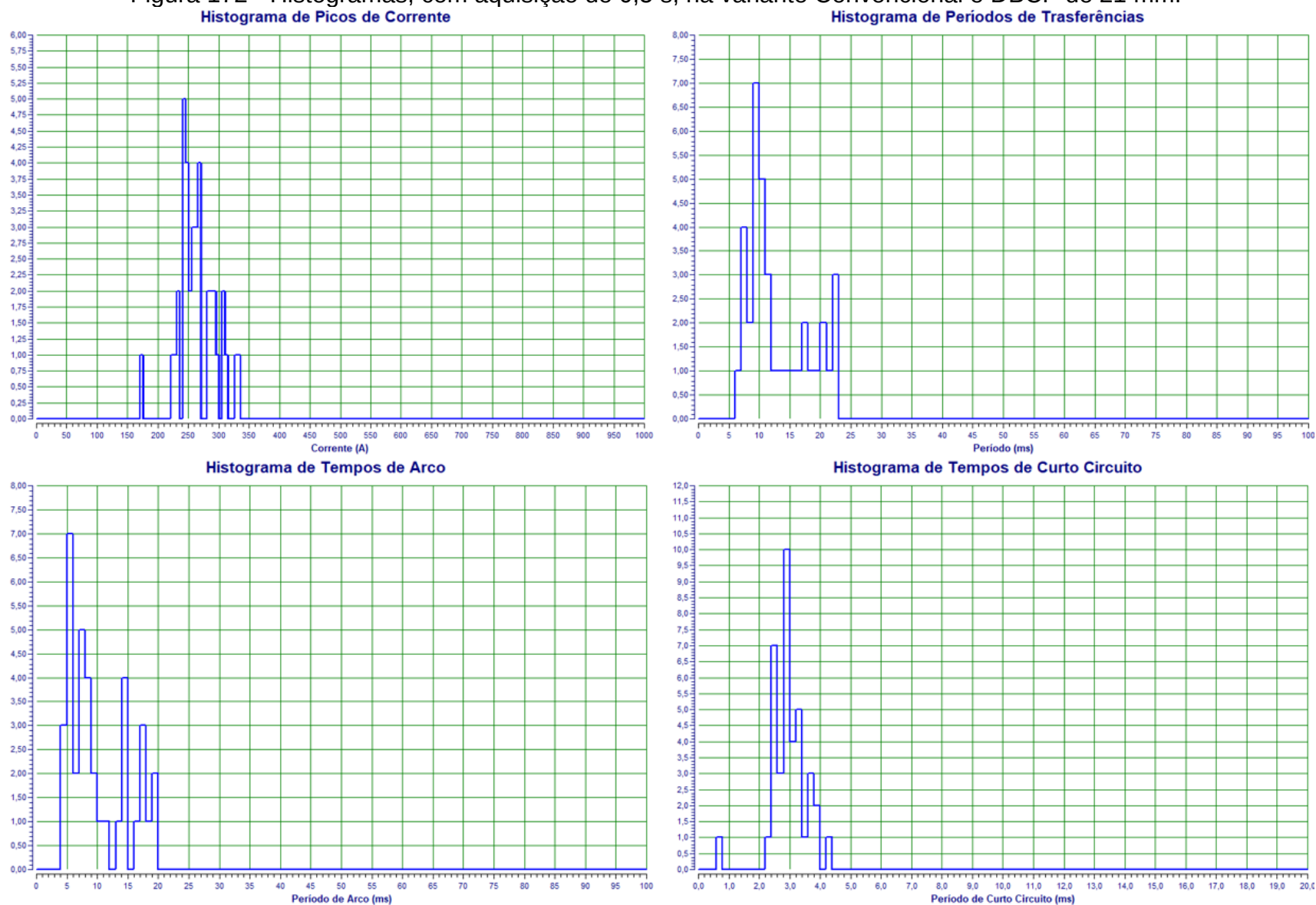


Figura 173 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Convencional e DBCP de 30 mm.

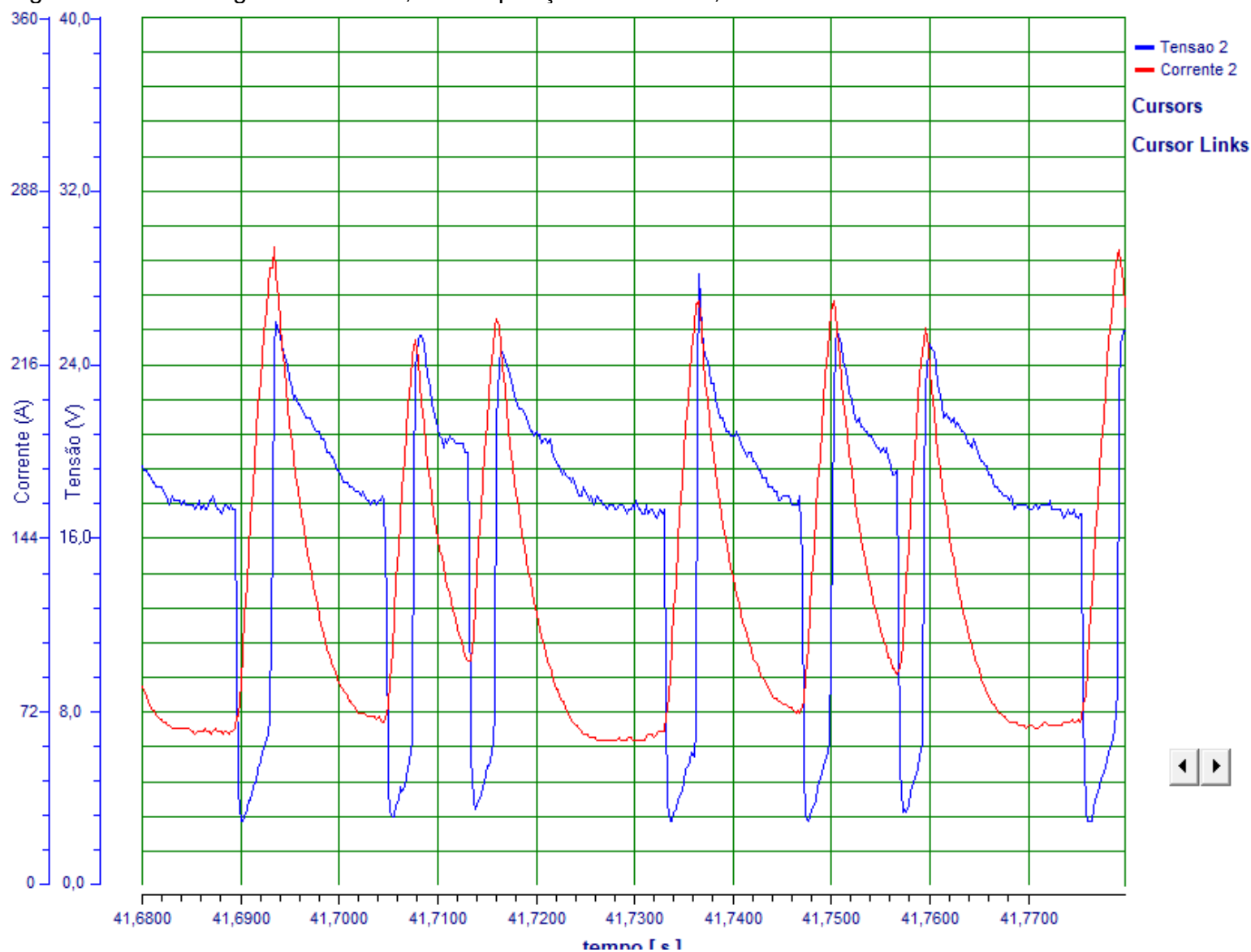


Figura 174 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 30 mm.

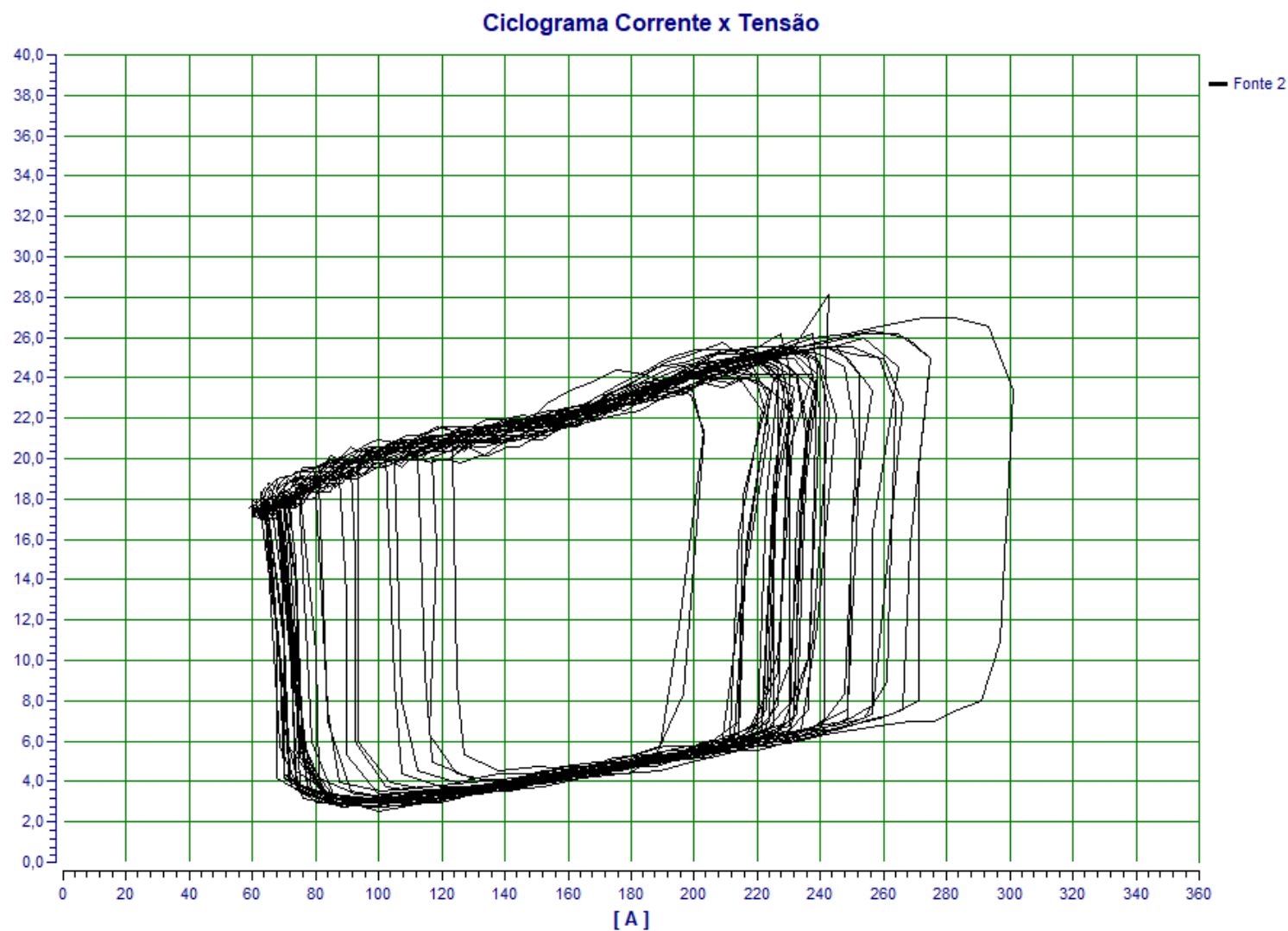
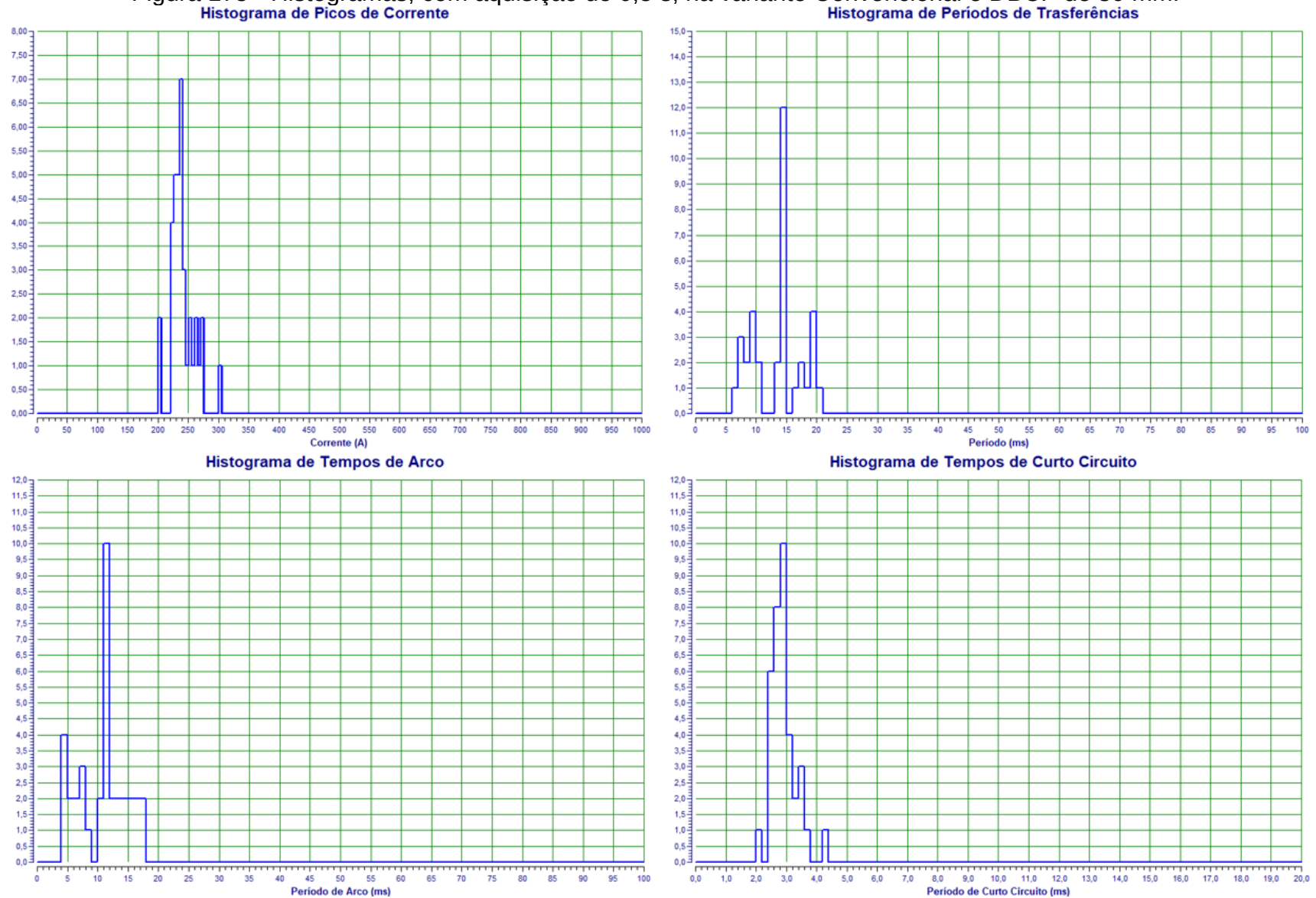


Figura 175 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Convencional e DBCP de 30 mm.



Standard:

Figura 176 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Standard e DBCP de 12 mm.

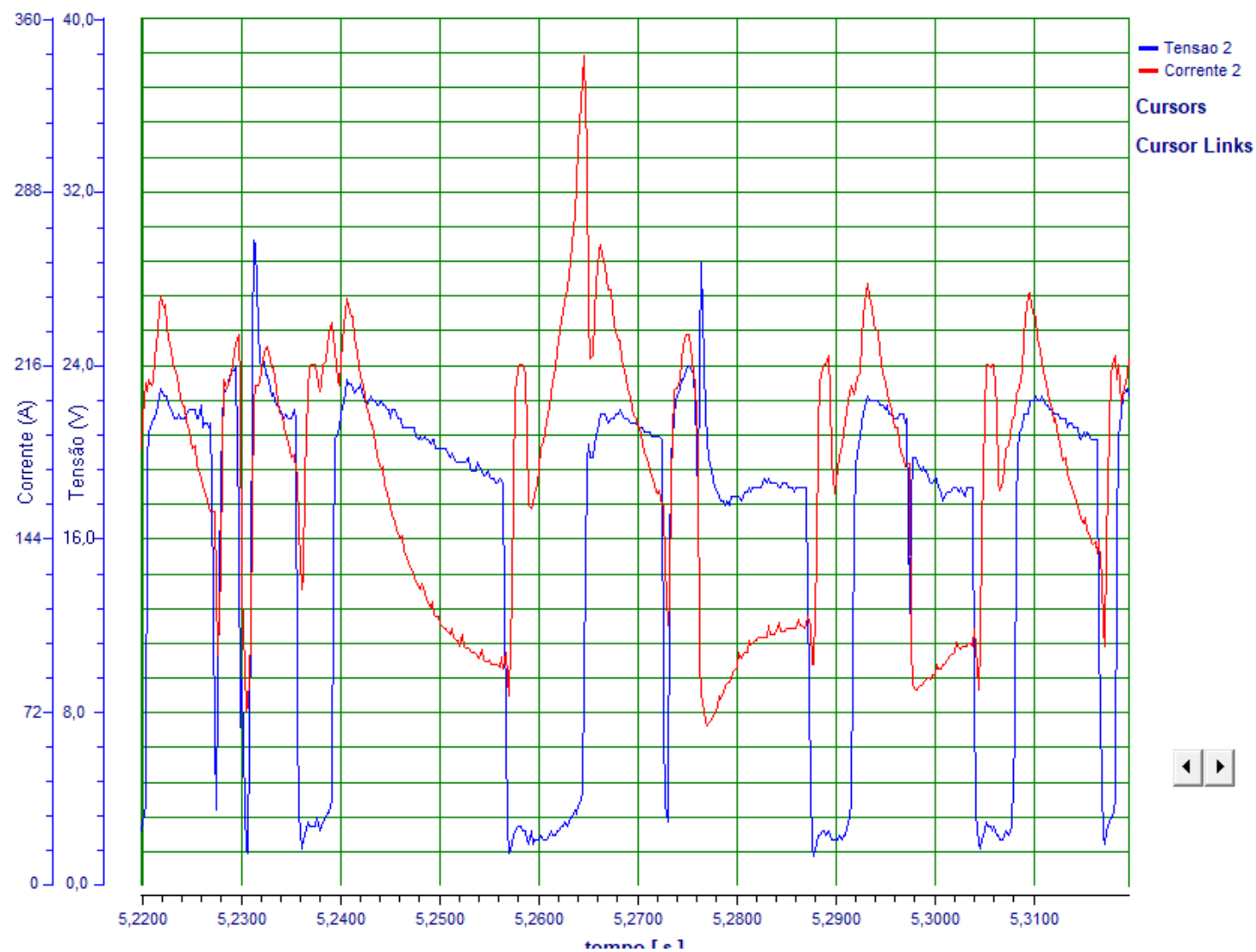


Figura 177 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 12 mm.

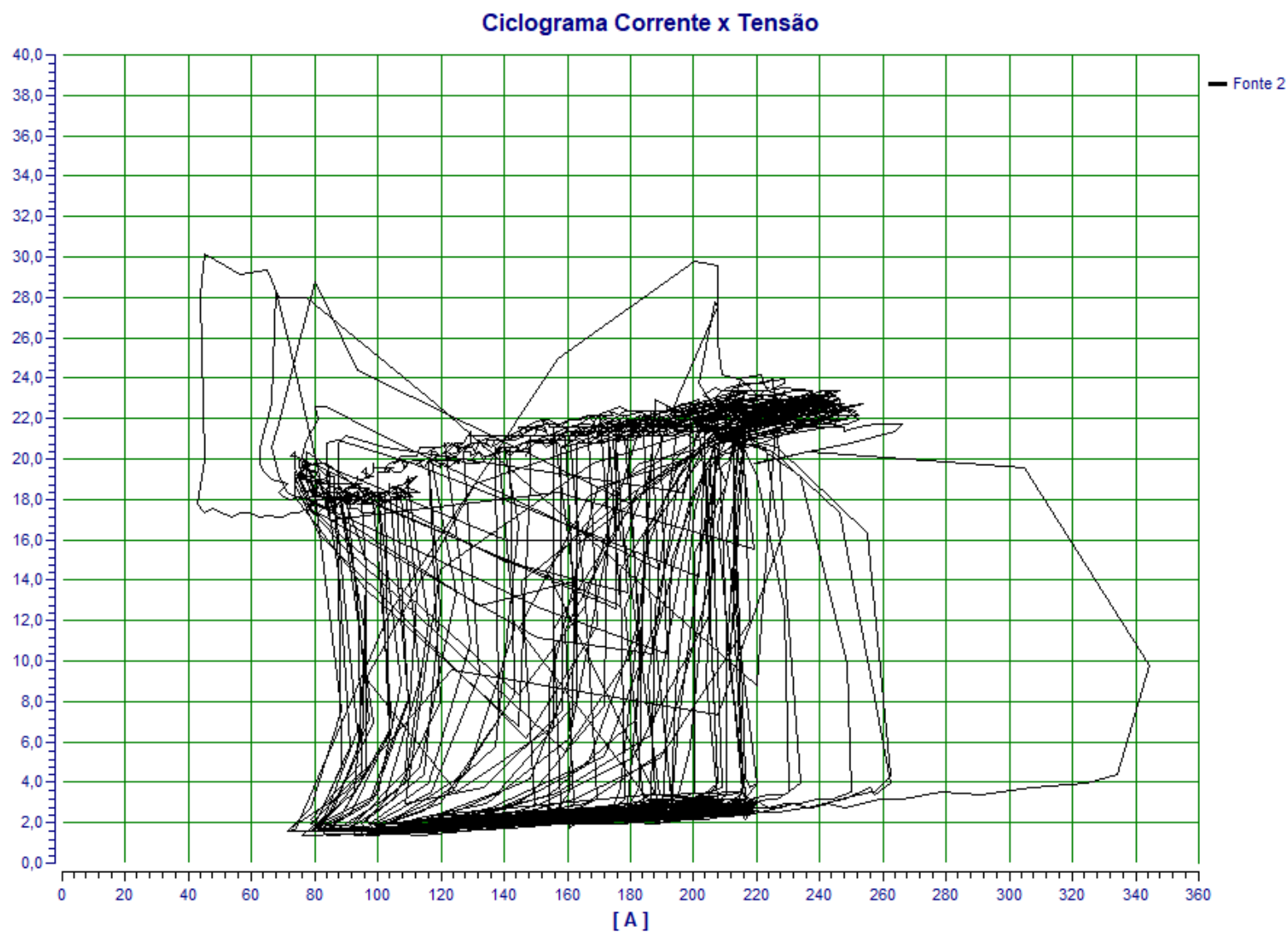


Figura 178 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 12 mm.

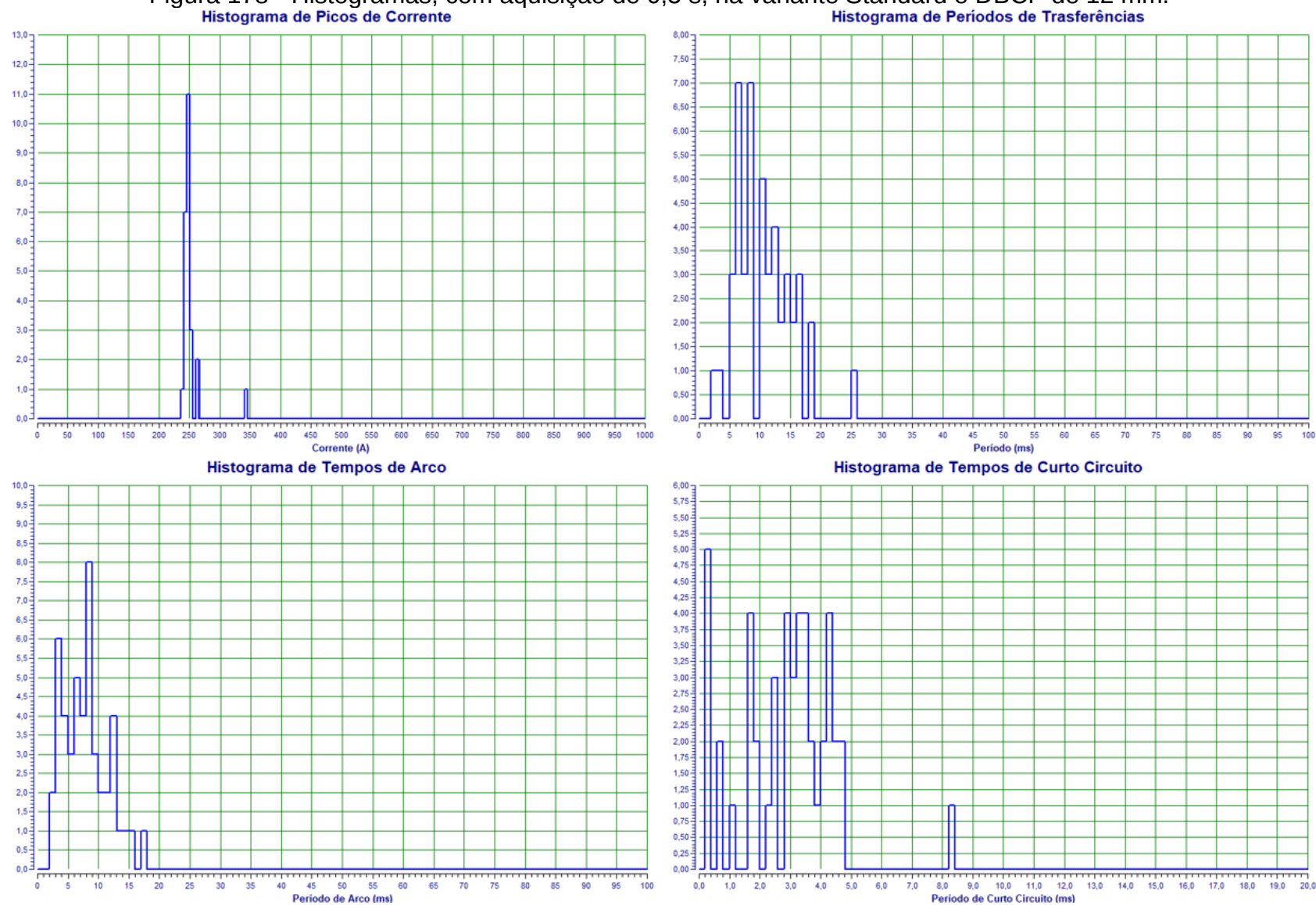


Figura 179 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Standard e DBCP de 21 mm.

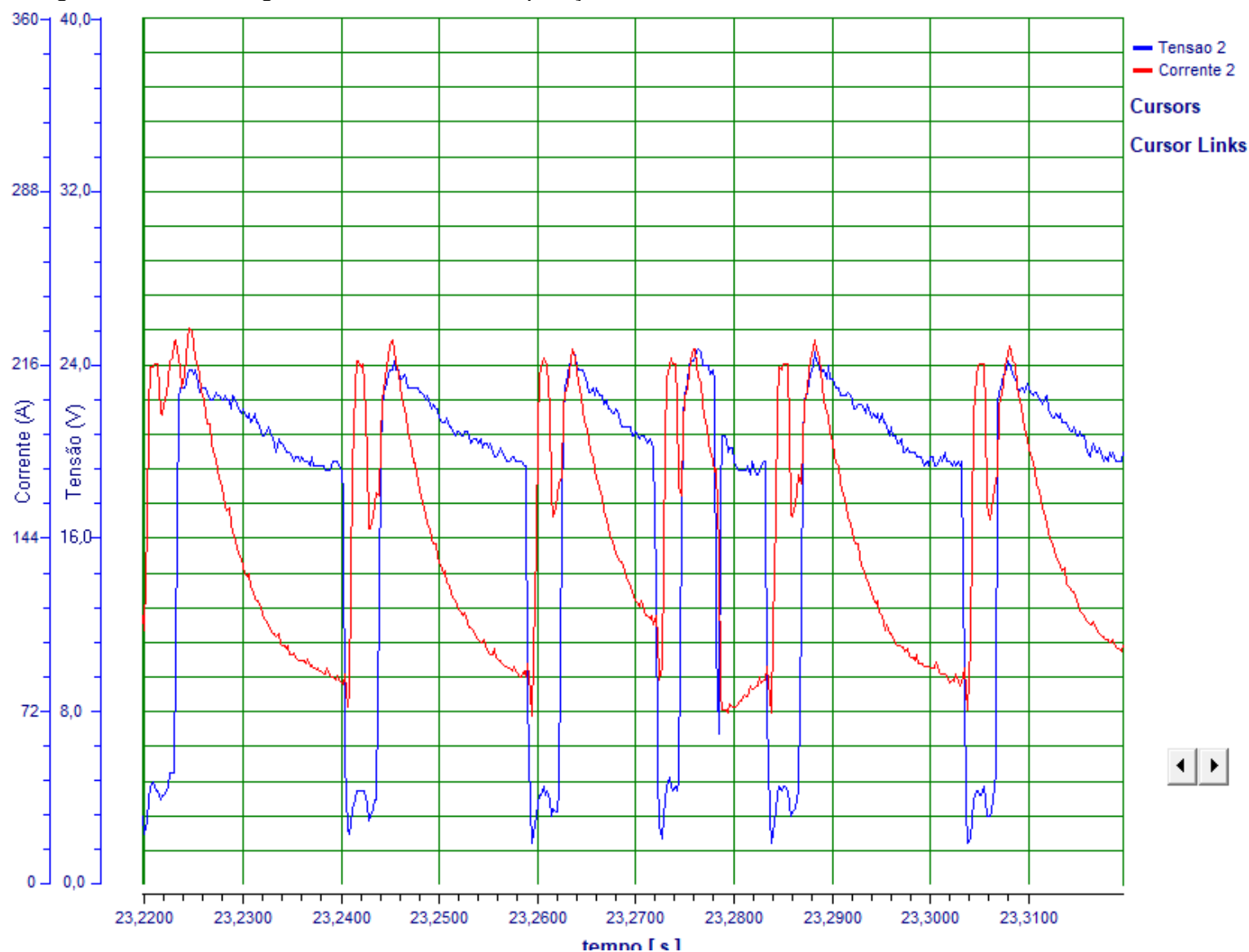


Figura 180 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 21 mm.

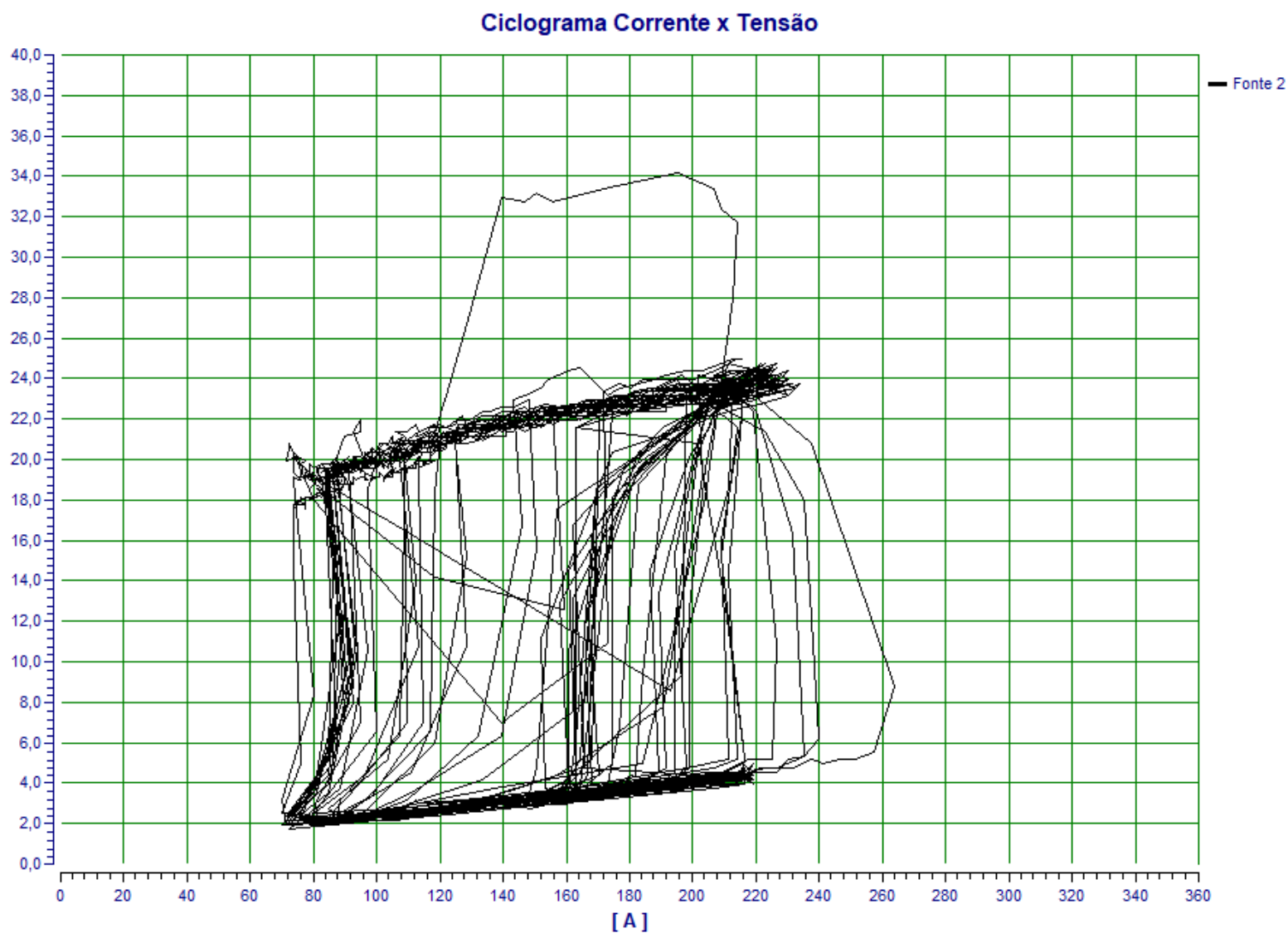


Figura 181 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 21 mm.

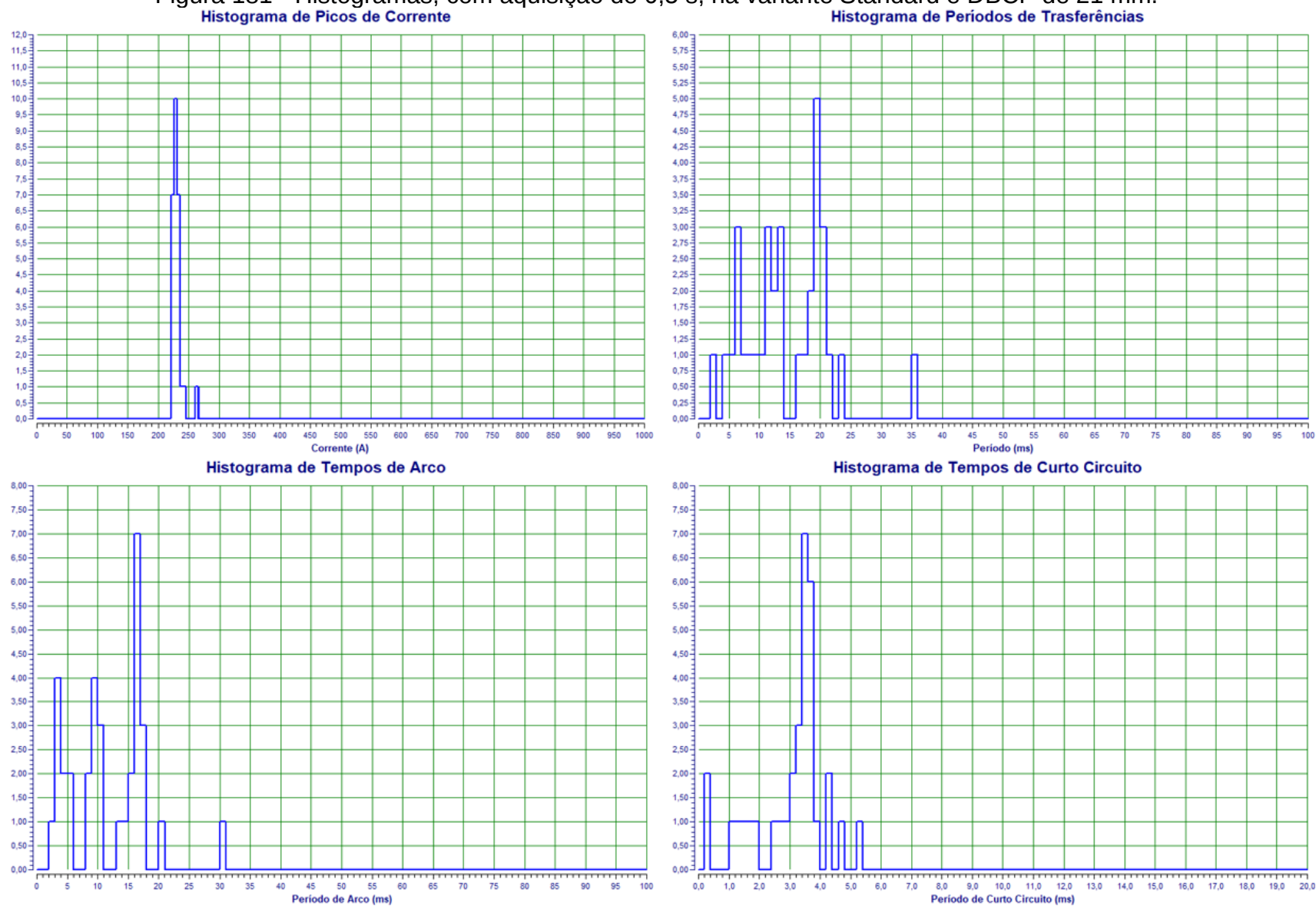


Figura 182 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Standard e DBCP de 30 mm.

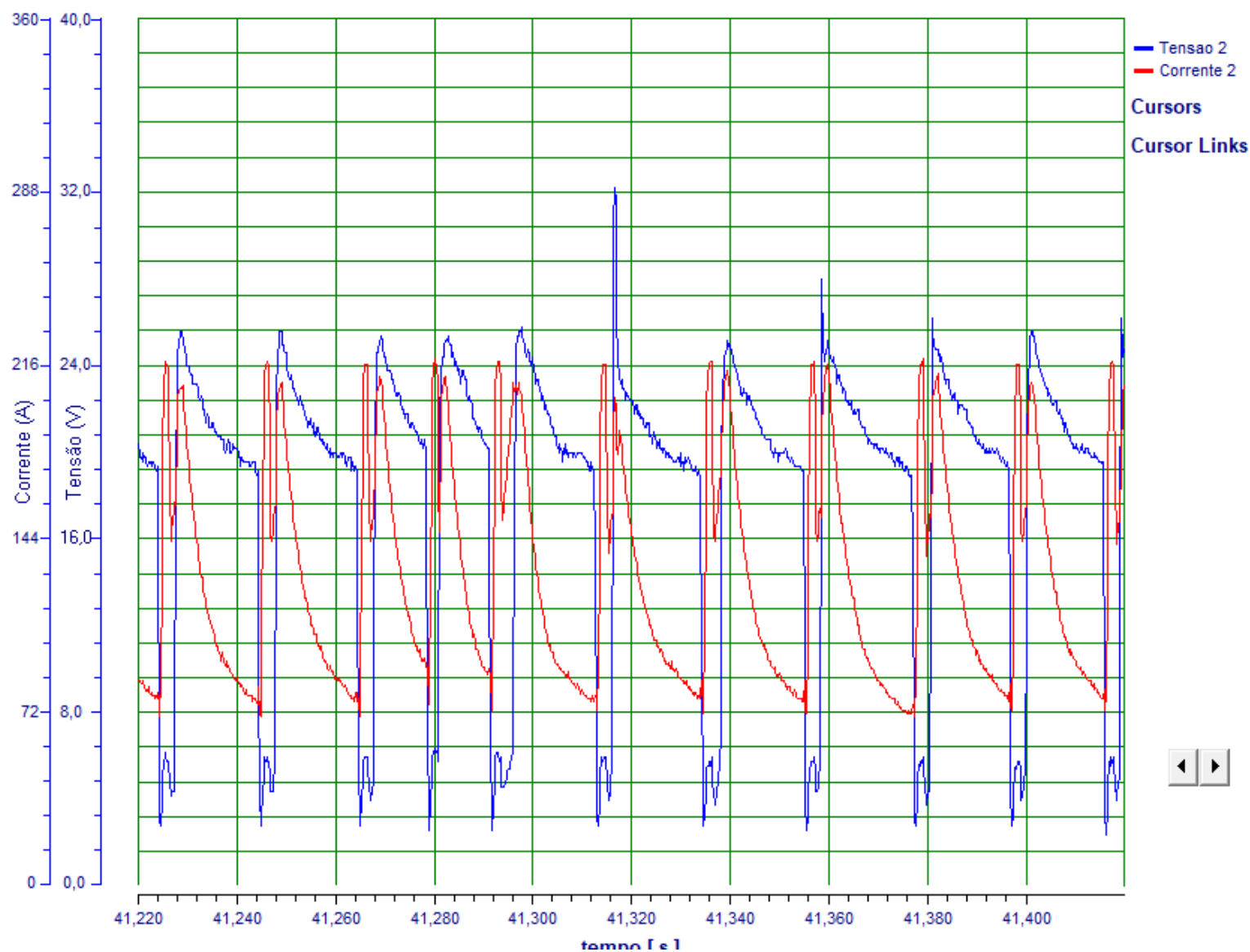


Figura 183 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 30 mm.

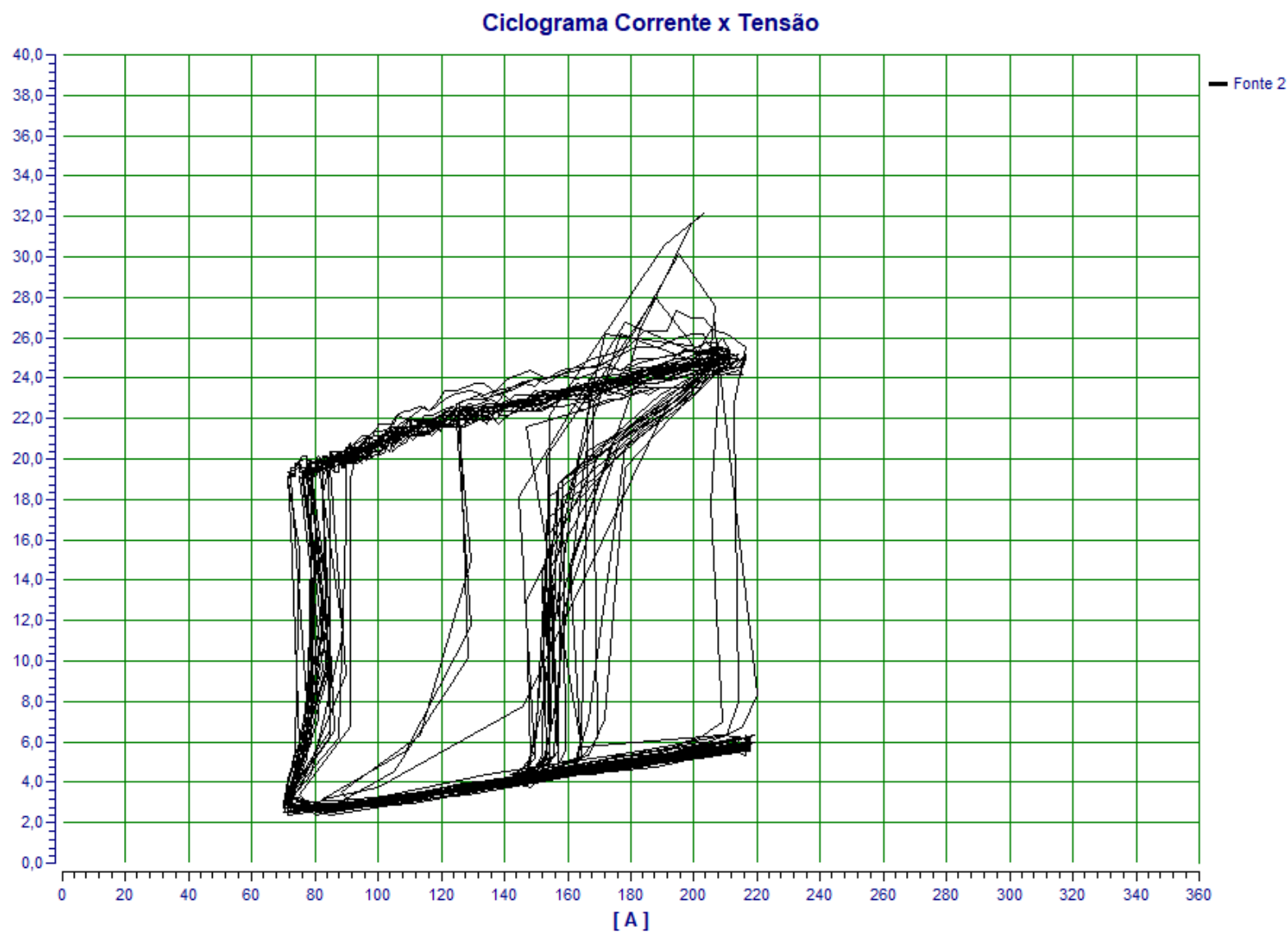
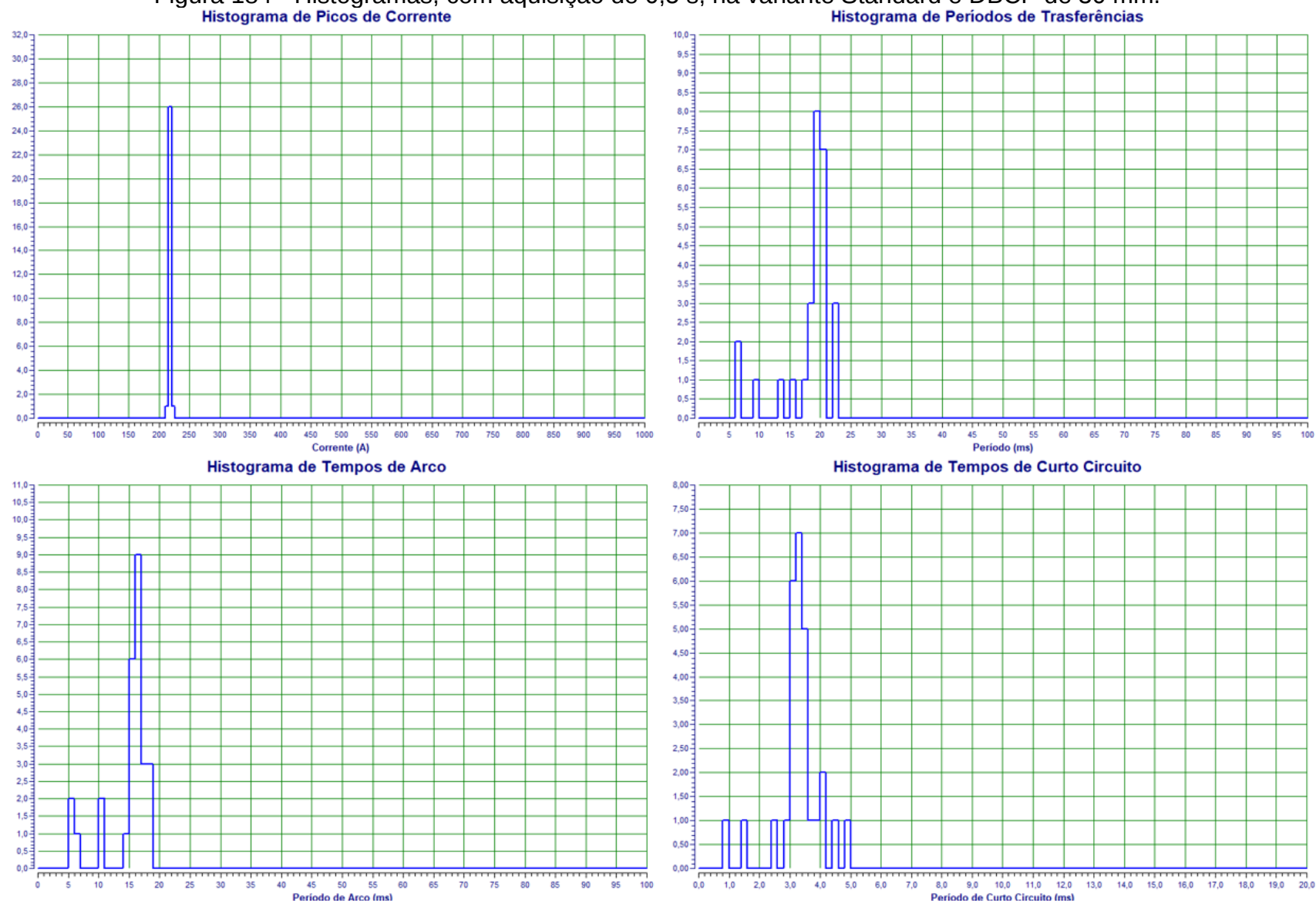


Figura 184 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante Standard e DBCP de 30 mm.



LSC:

Figura 185 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC e DBCP de 12 mm.

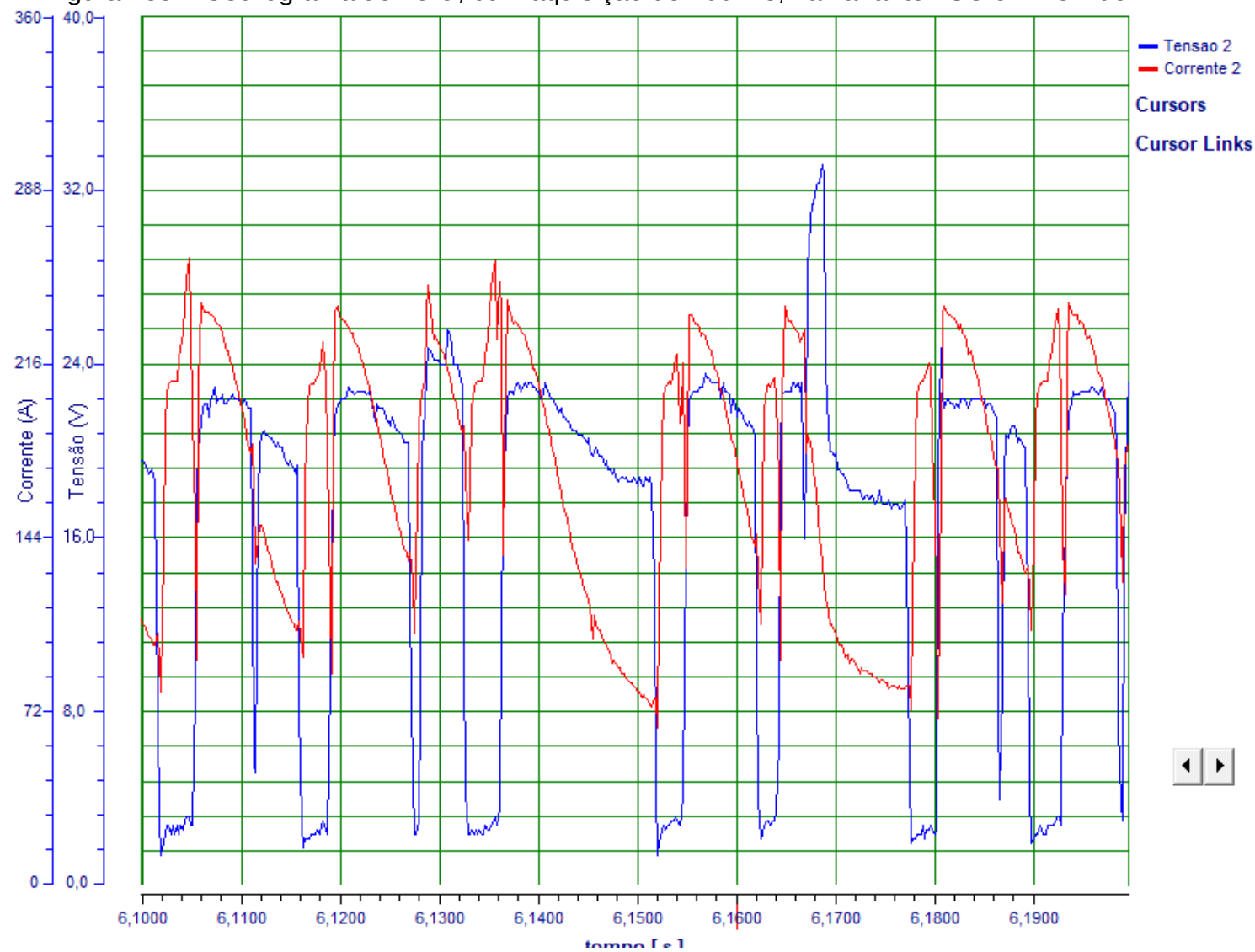


Figura 186 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 12 mm.

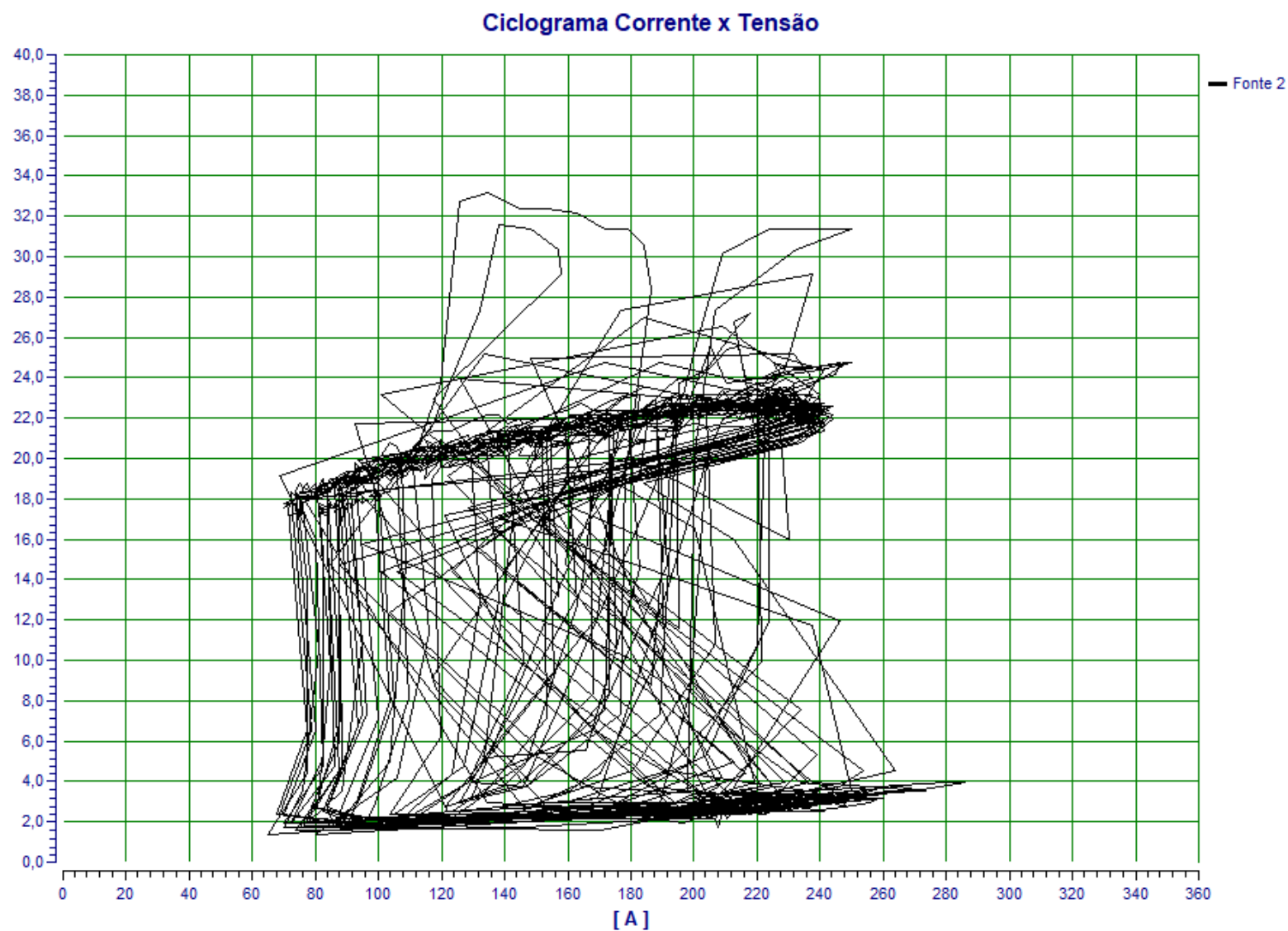


Figura 187 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 12 mm.

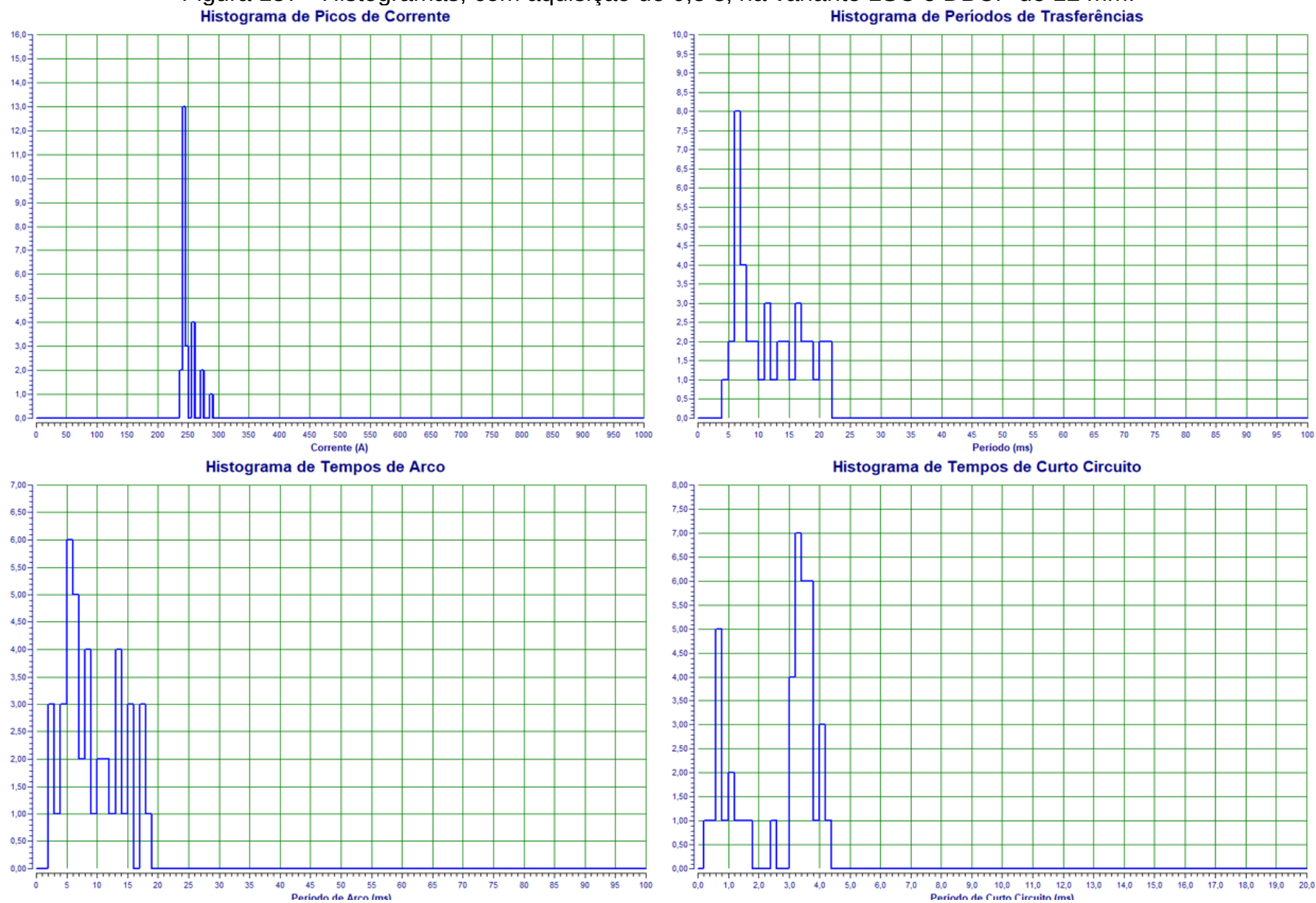


Figura 188 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC e DBCP de 21 mm.

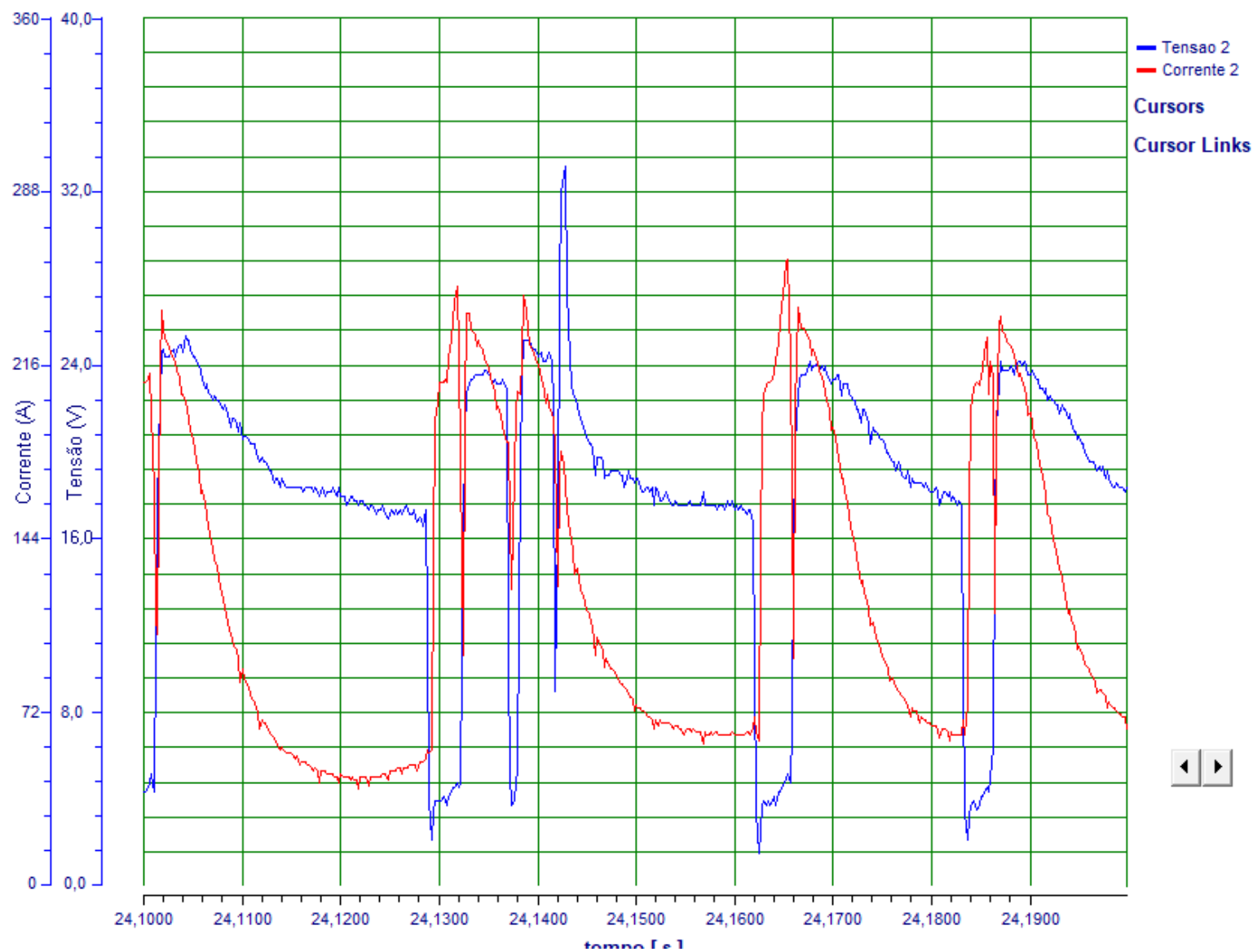


Figura 189 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 21 mm.

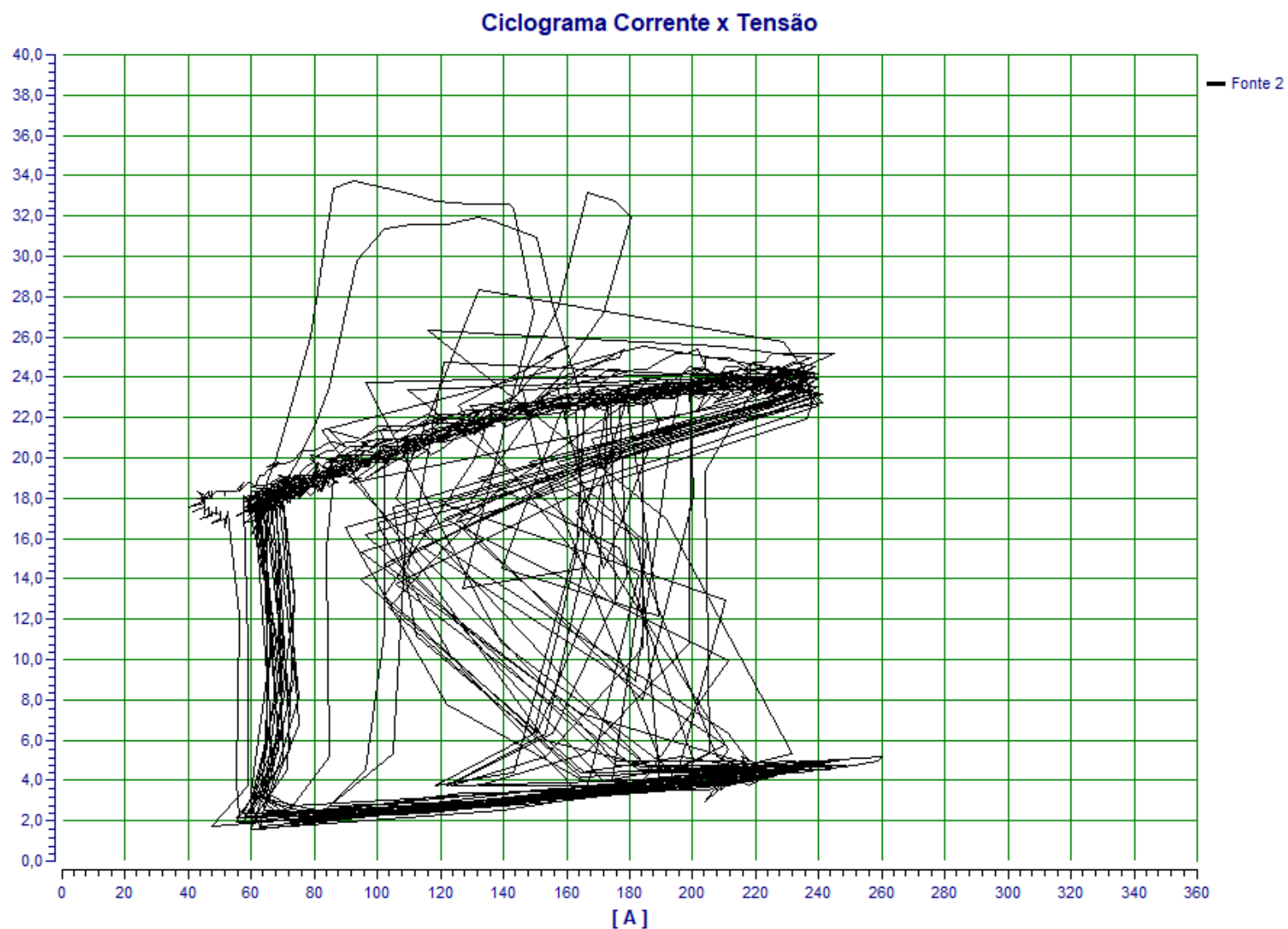


Figura 190 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 21 mm.

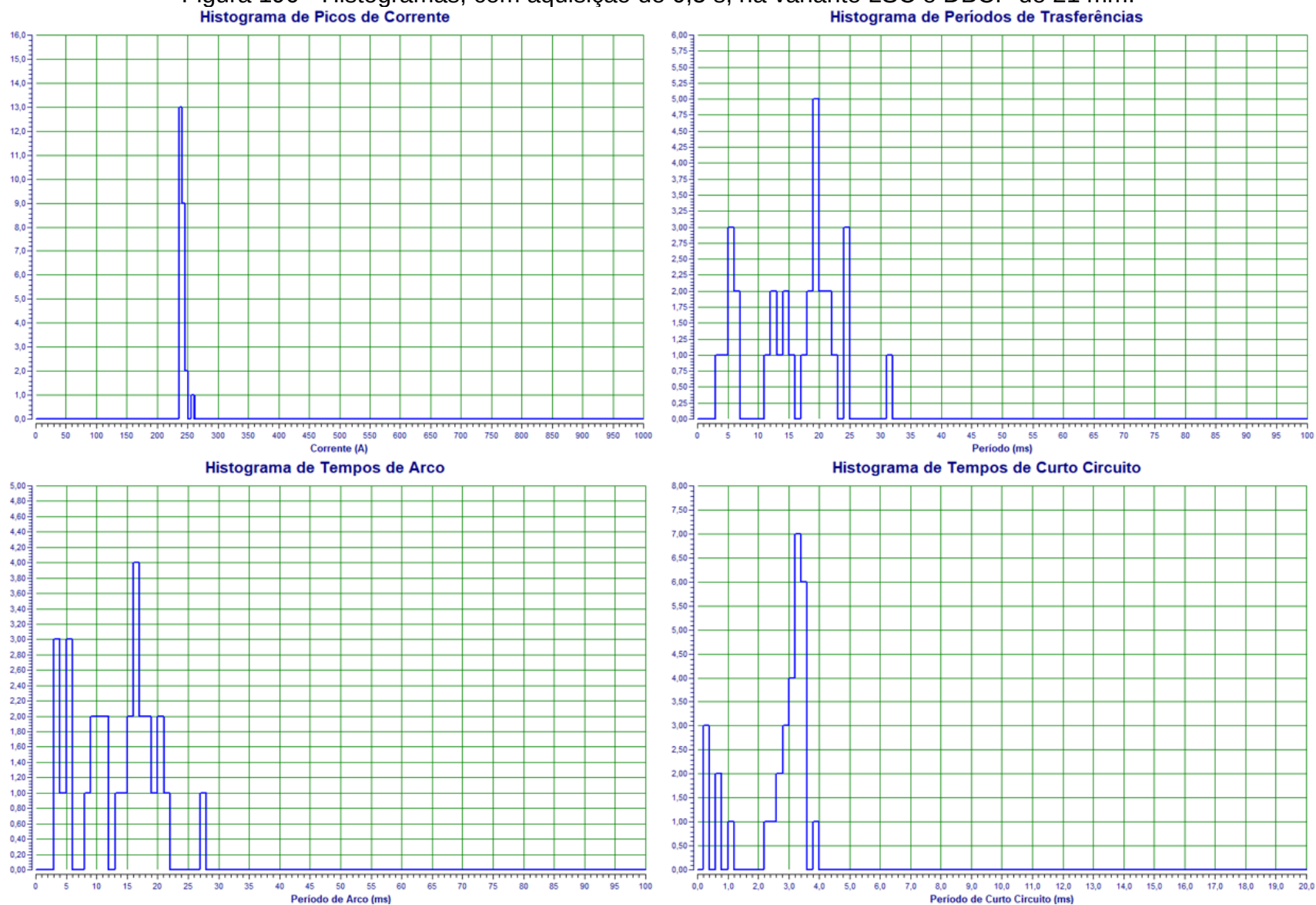


Figura 191 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC e DBCP de 30 mm.

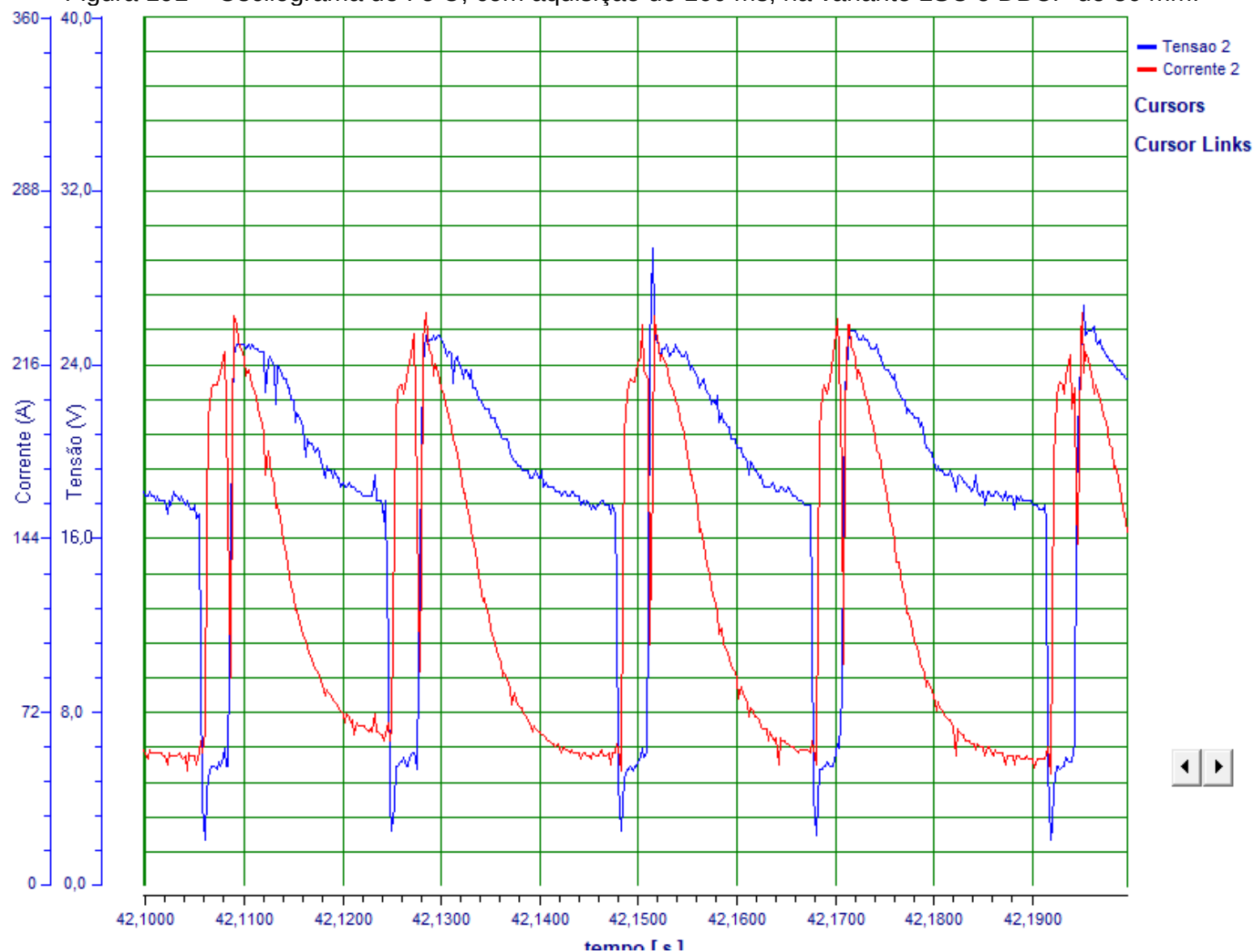


Figura 192 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 30 mm.

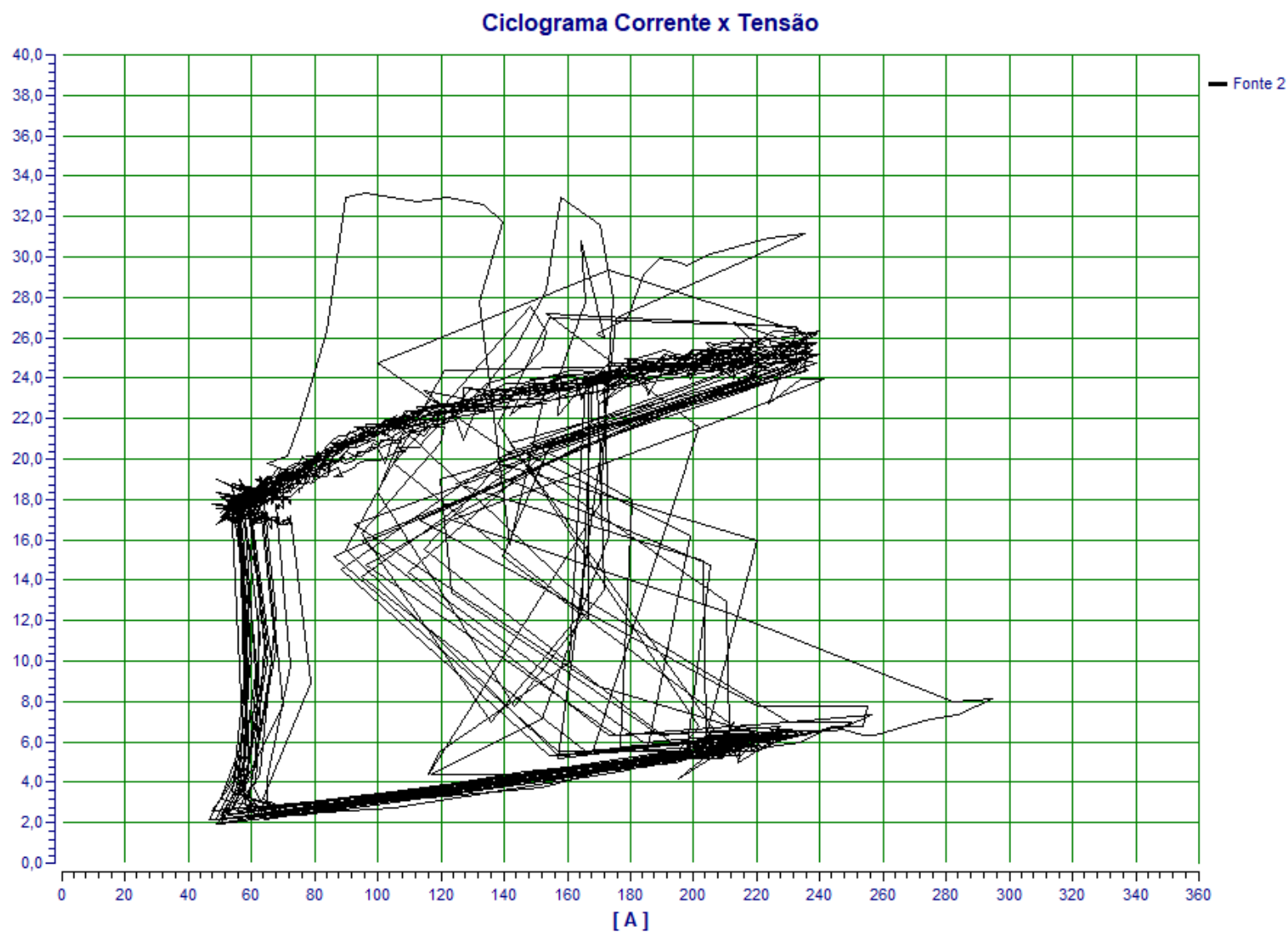
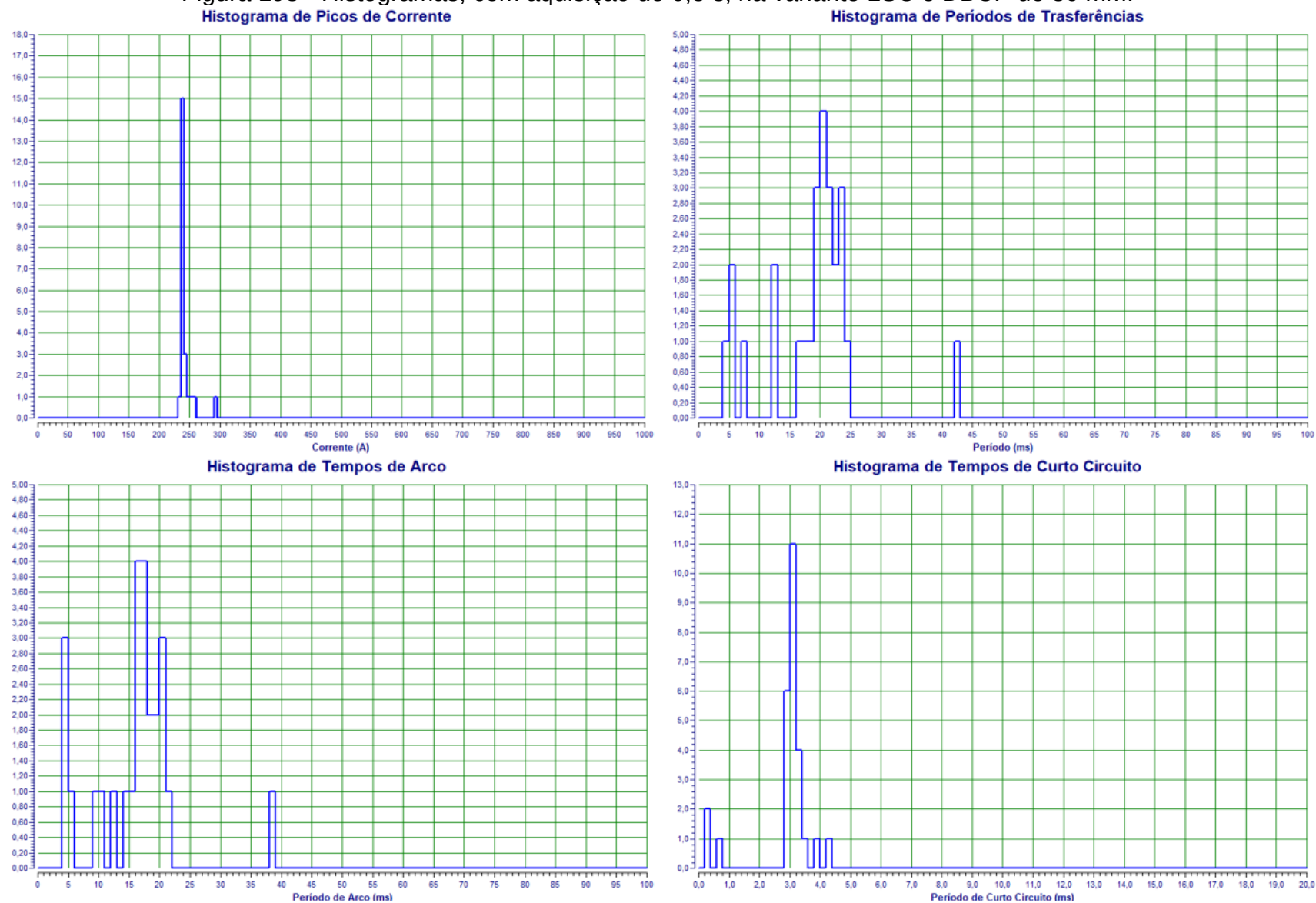


Figura 193 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC e DBCP de 30 mm.



LSC CP:

Figura 194 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC CP e DBCP de 12 mm.

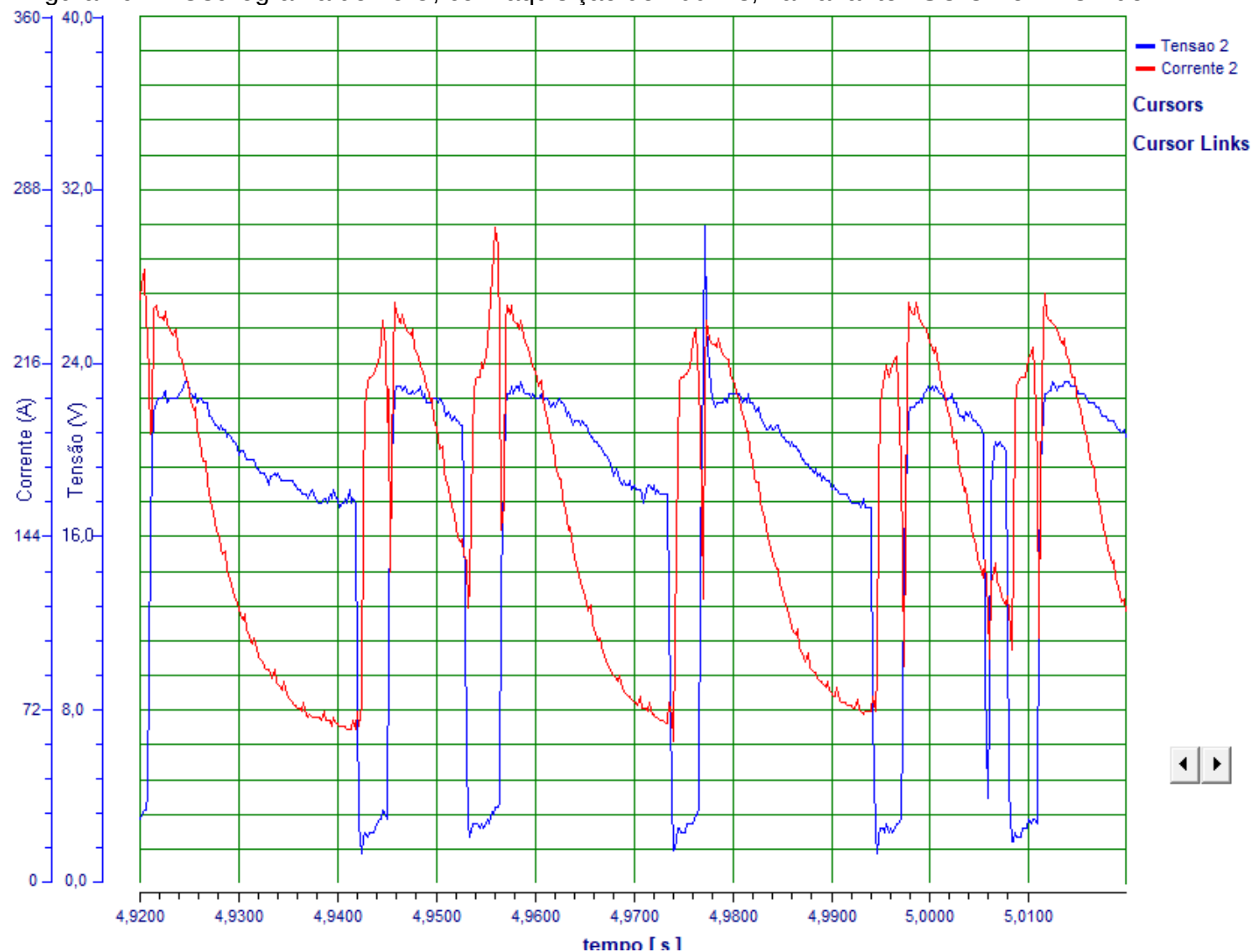


Figura 195 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC
CP e DBCP de 12 mm.

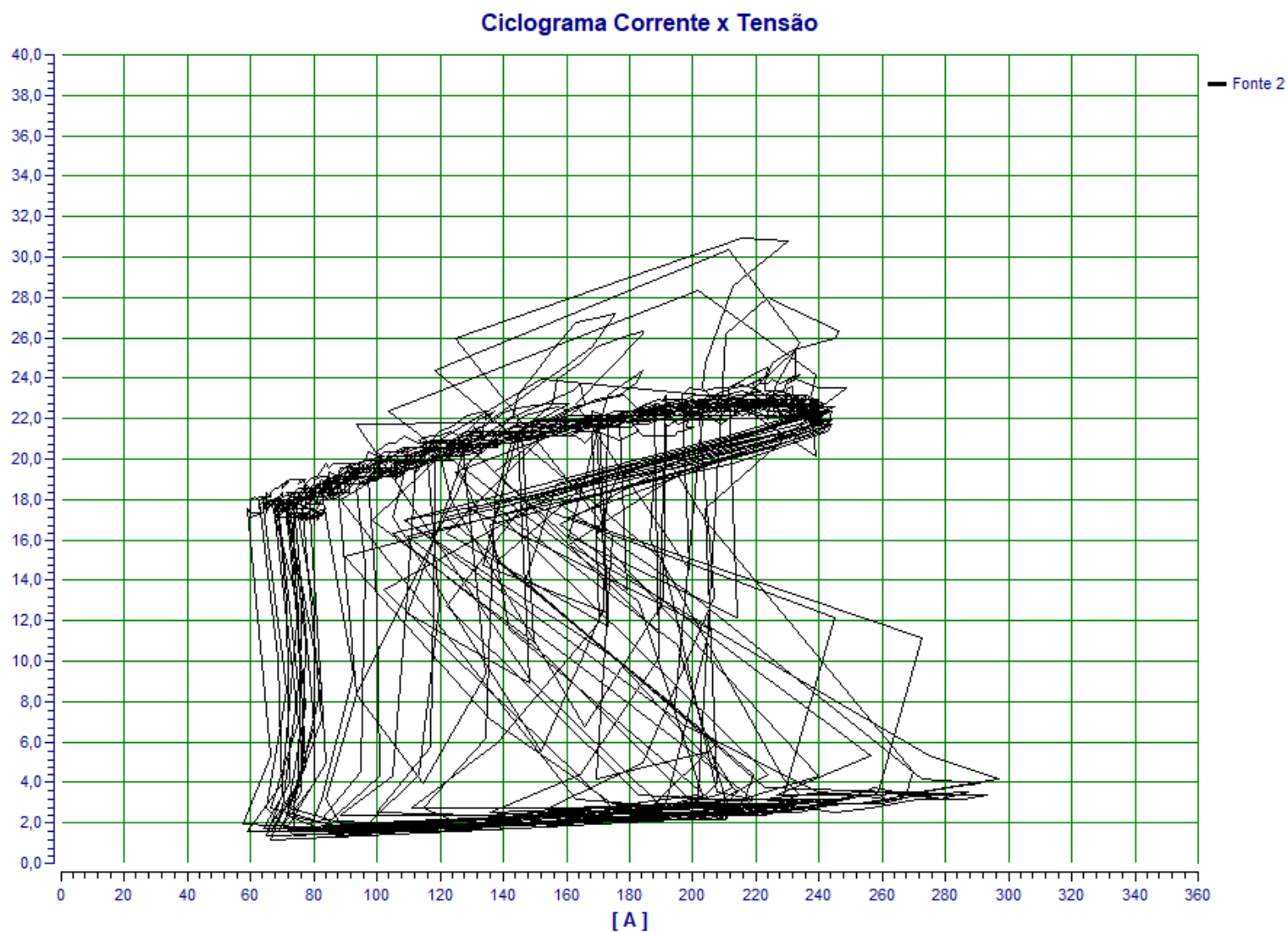


Figura 196 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 12 mm.

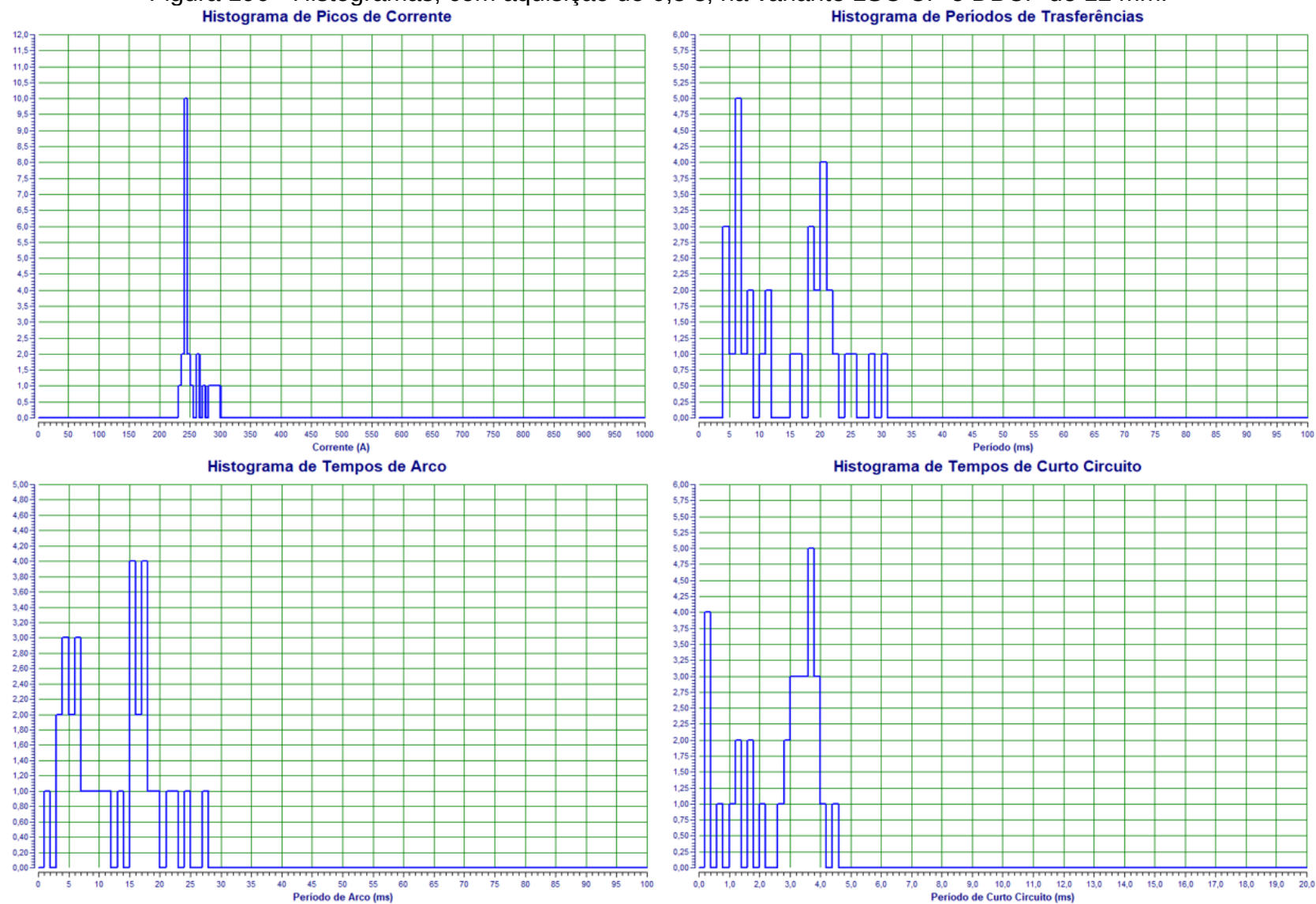


Figura 197 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC CP e DBCP de 21 mm.

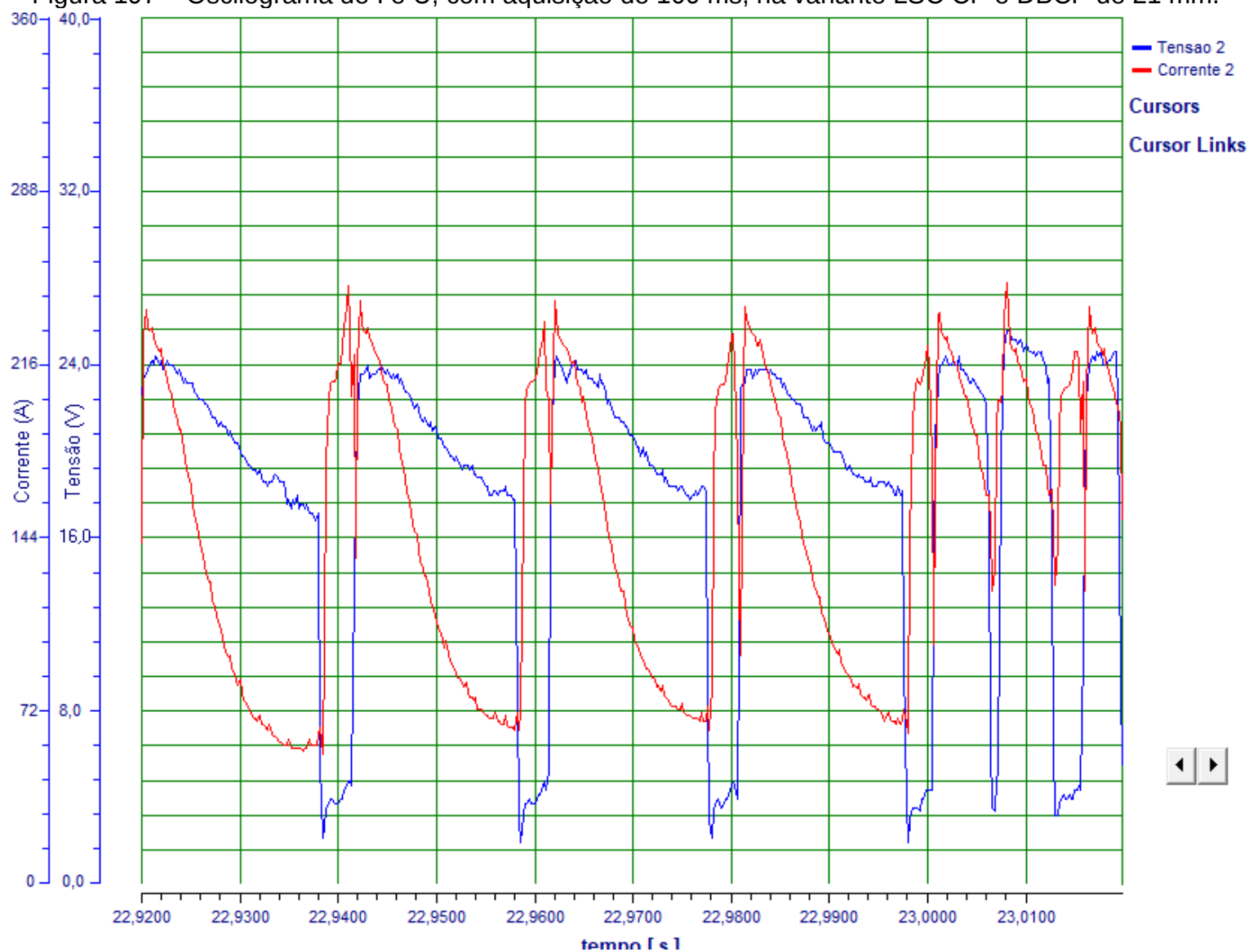


Figura 198 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 21 mm.

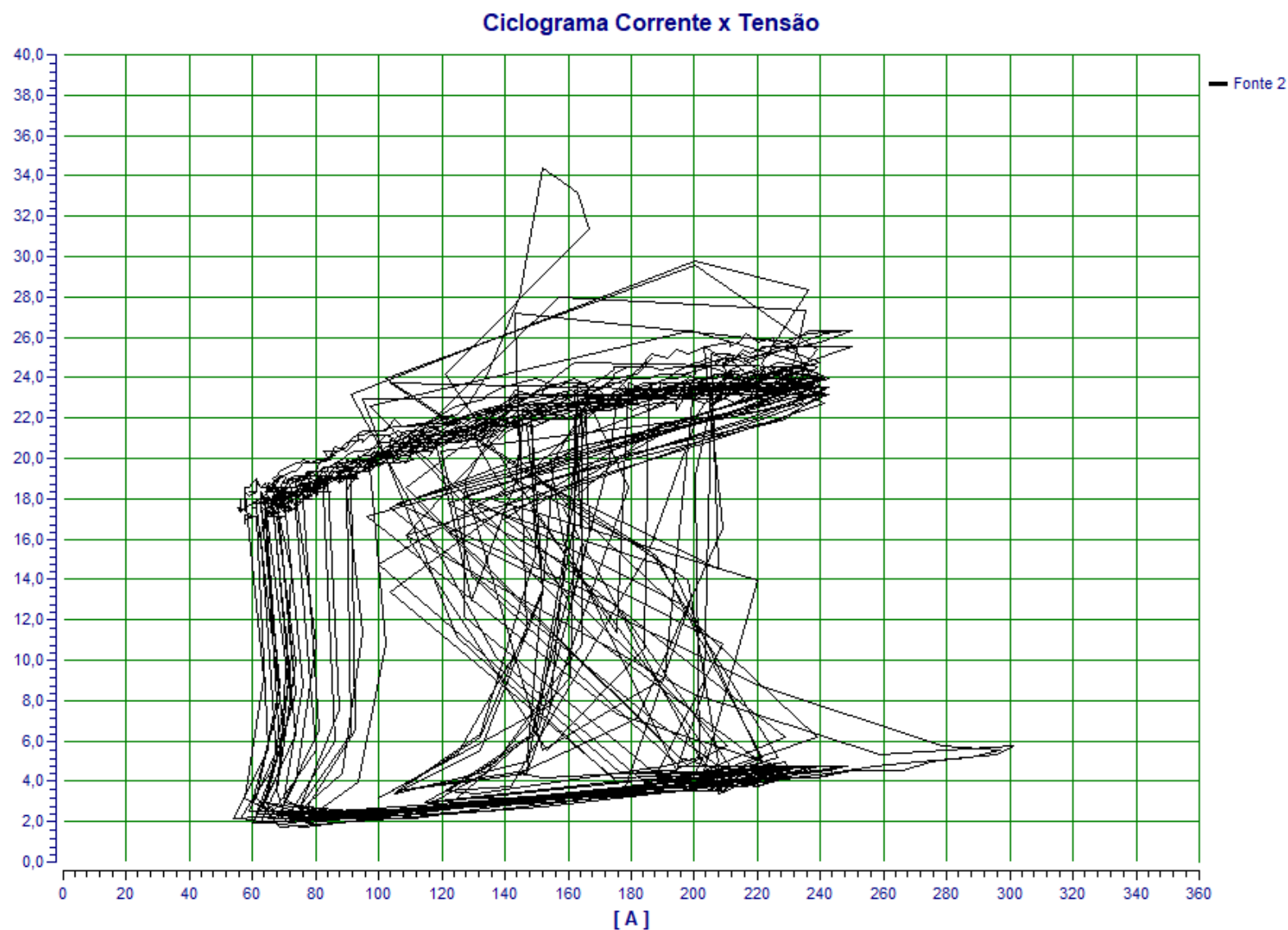


Figura 199 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 21 mm.

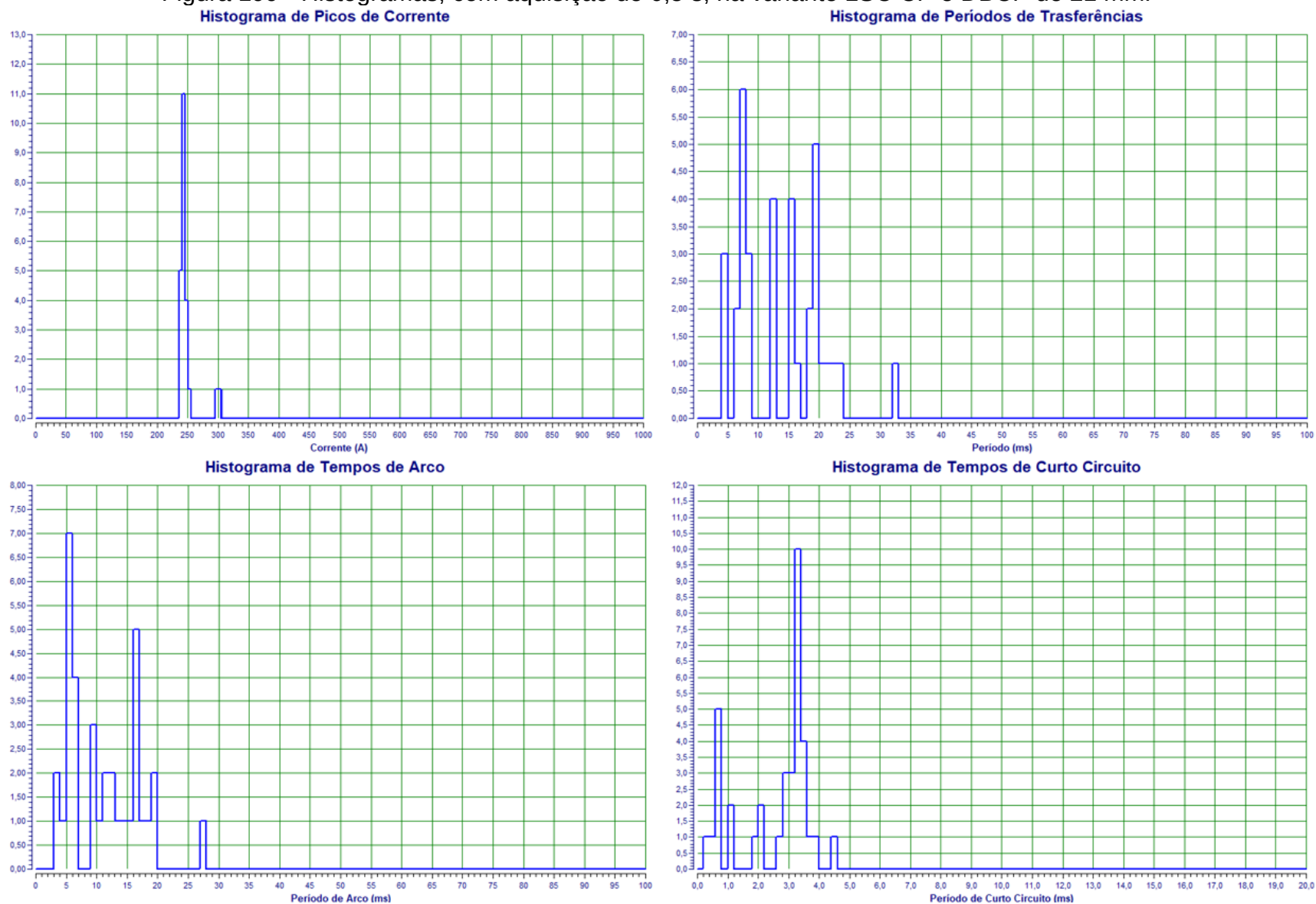


Figura 200 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante LSC CP e DBCP de 30 mm.

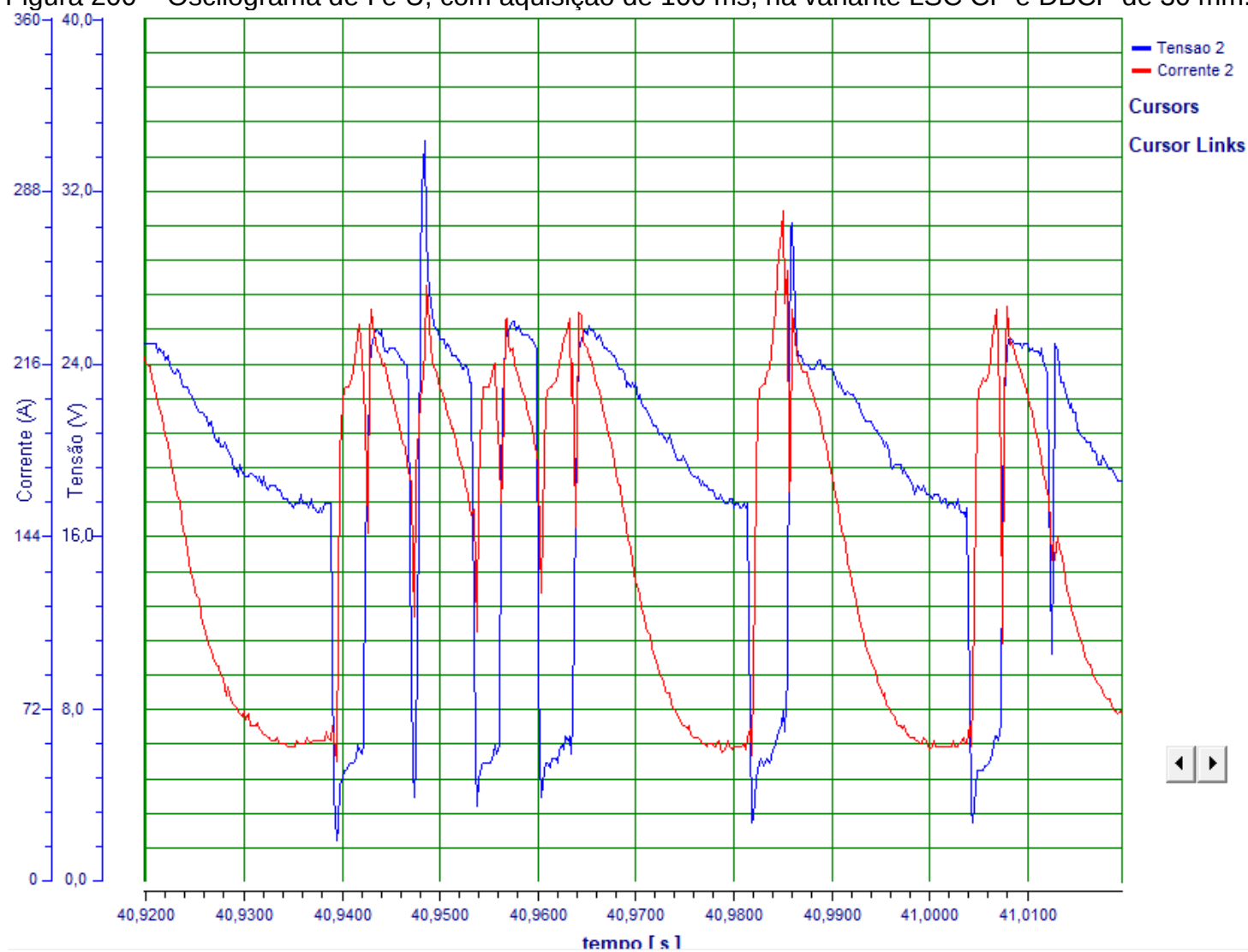


Figura 201 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 30 mm.

Ciclograma Corrente x Tensão

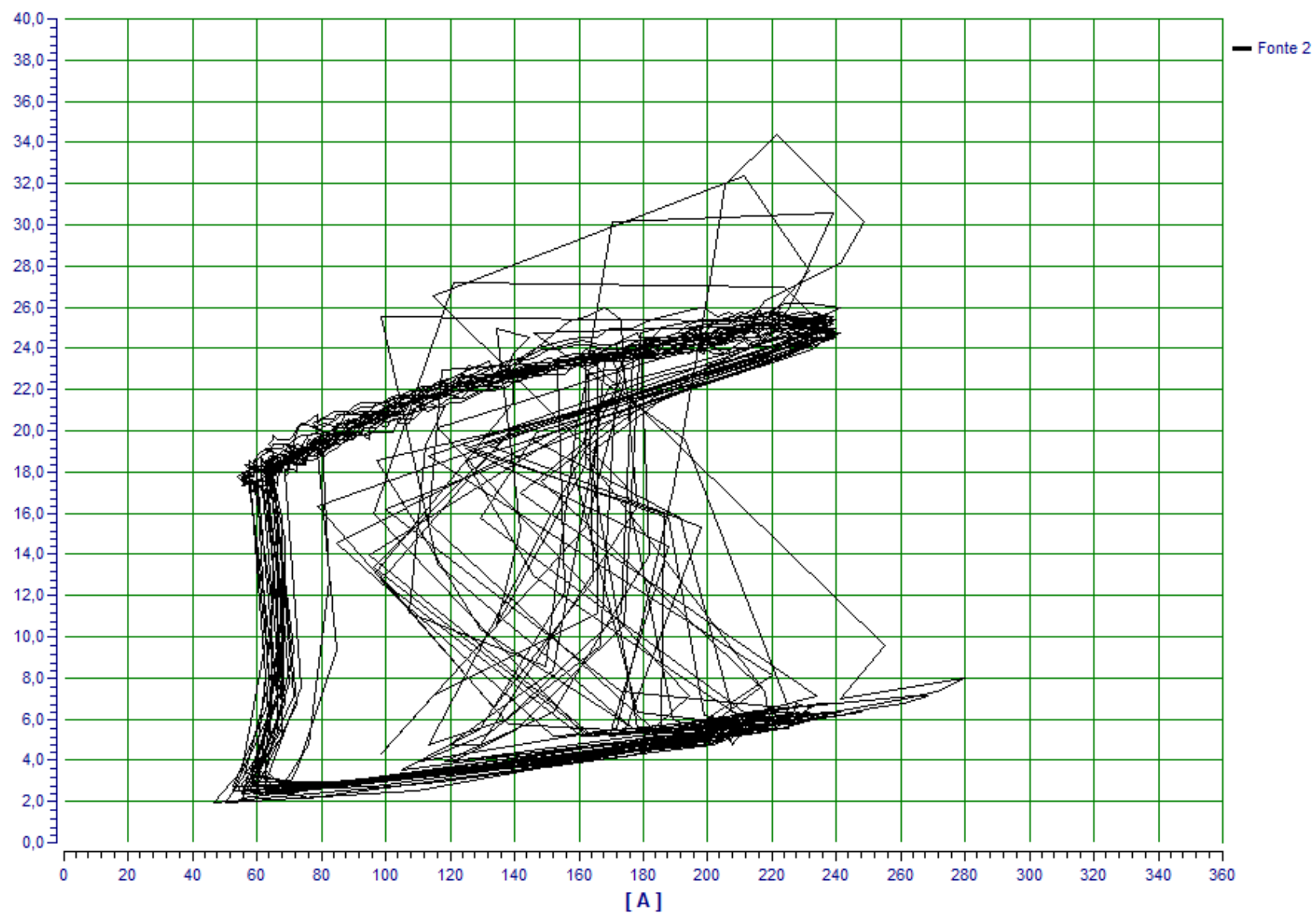
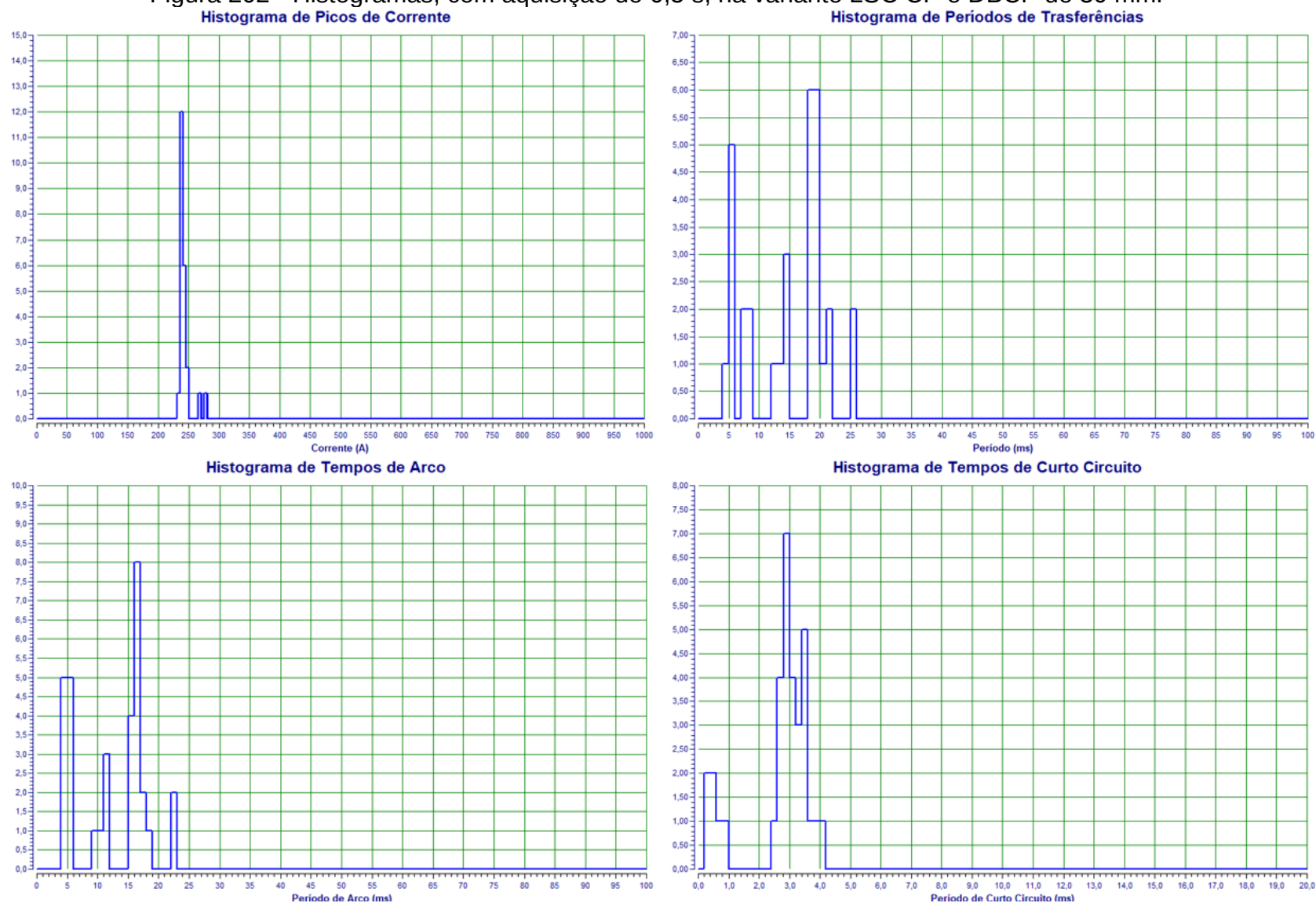


Figura 202 - Histogramas, com aquisição de 0,5 s, na variante LSC CP e DBCP de 30 mm.



CMT:

Figura 203 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante CMT e DBCP de 12 mm.

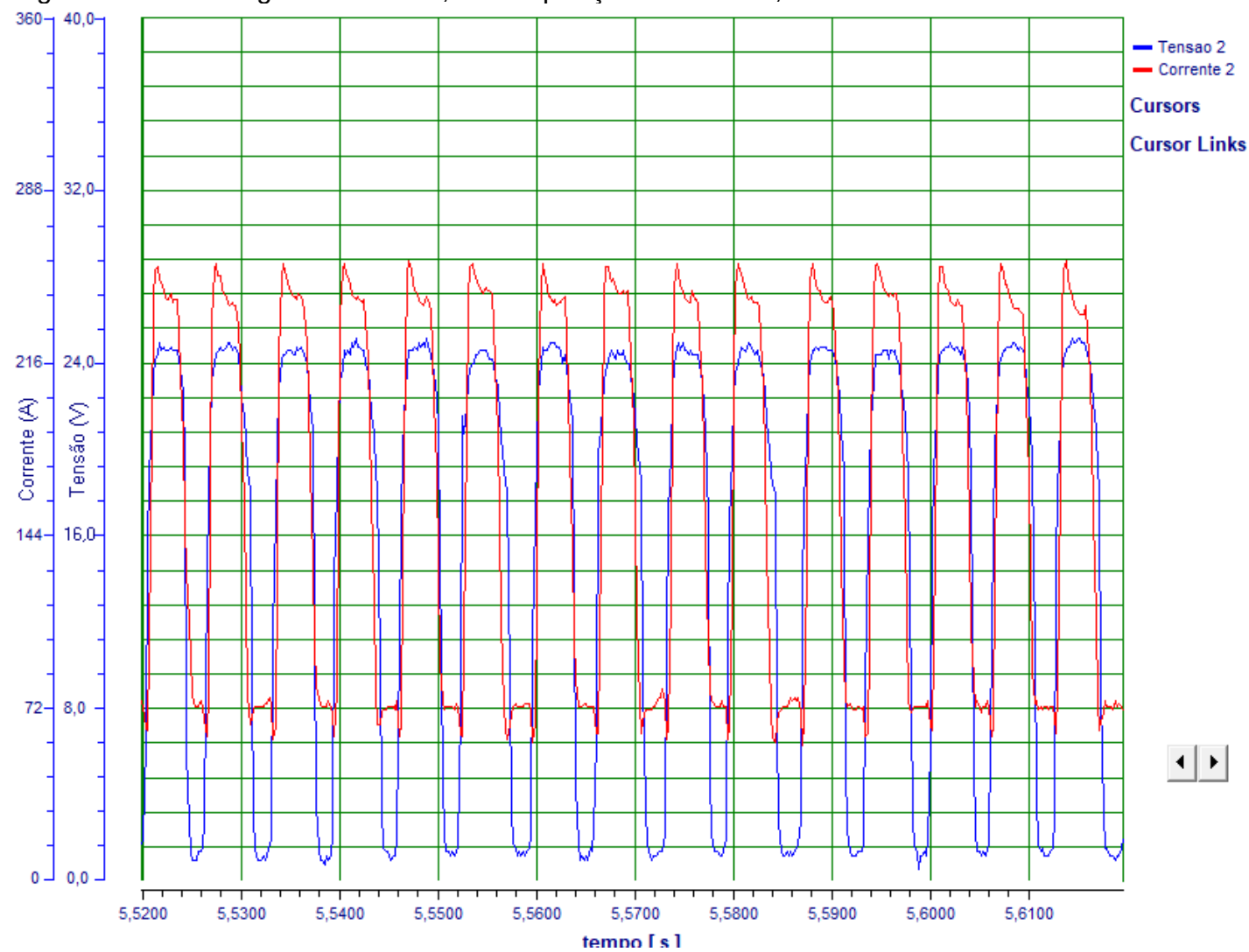


Figura 204 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 12 mm.

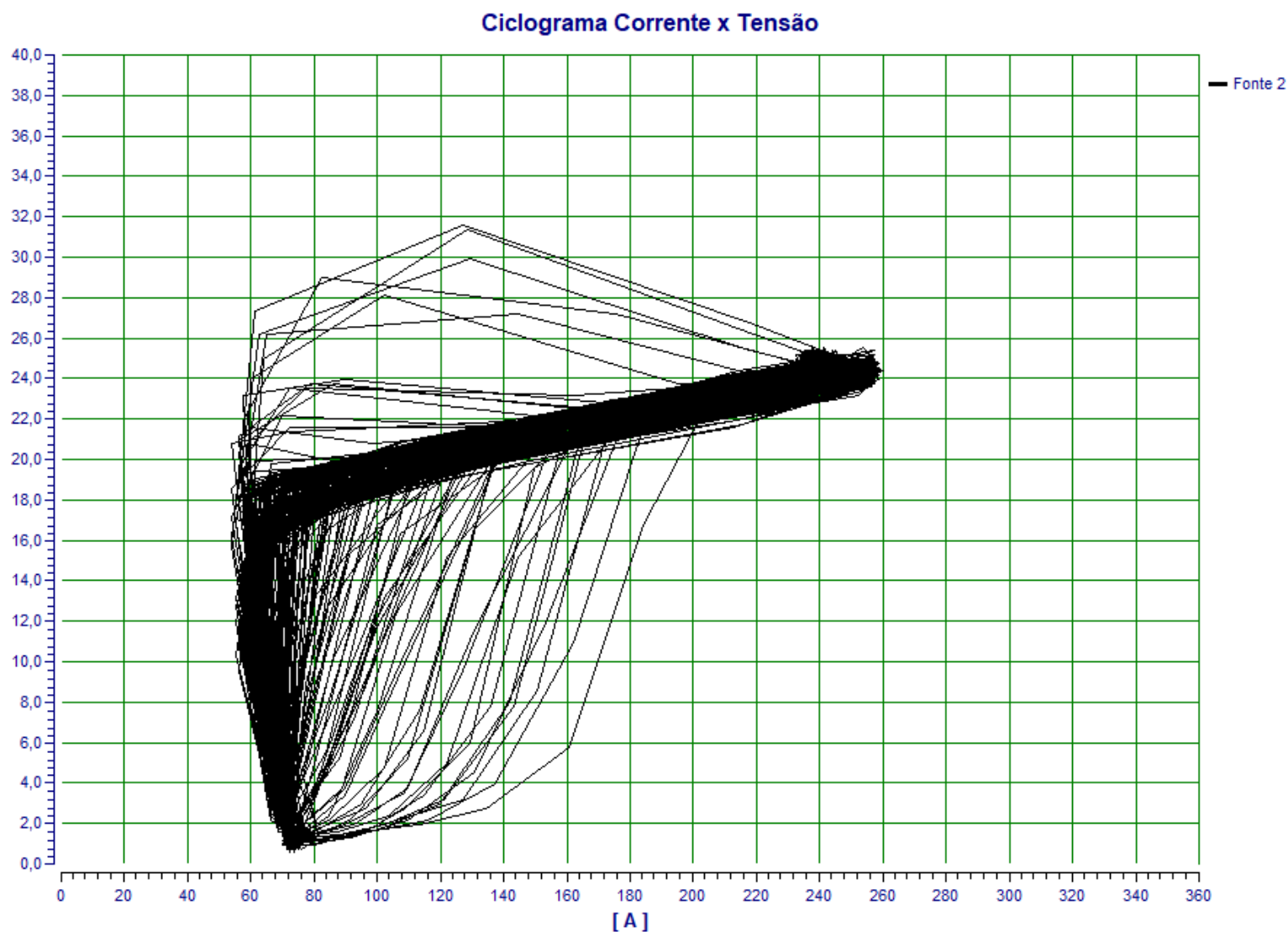


Figura 205 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 12 mm.

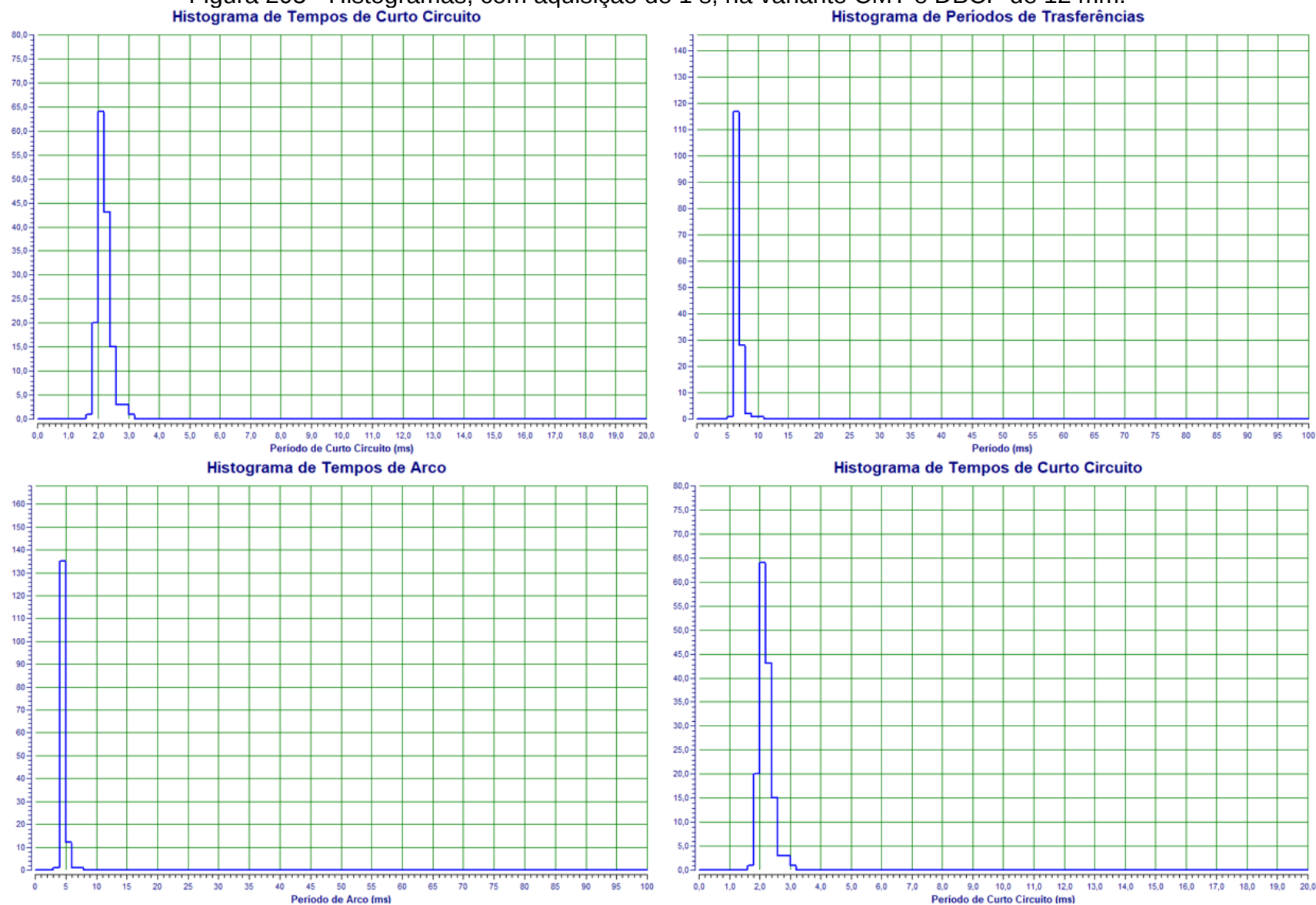


Figura 206 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante CMT e DBCP de 21 mm.

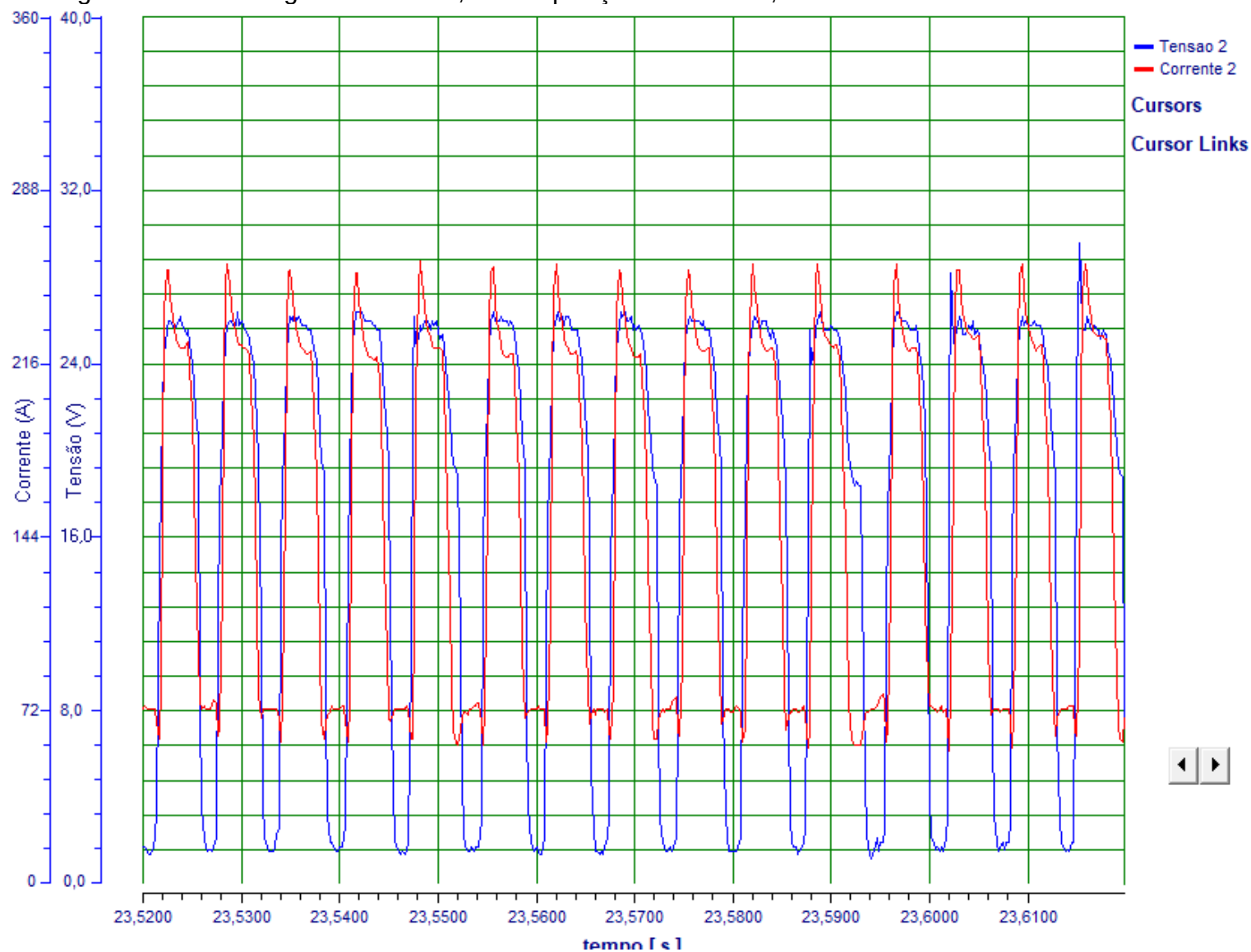


Figura 207 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 21 mm.

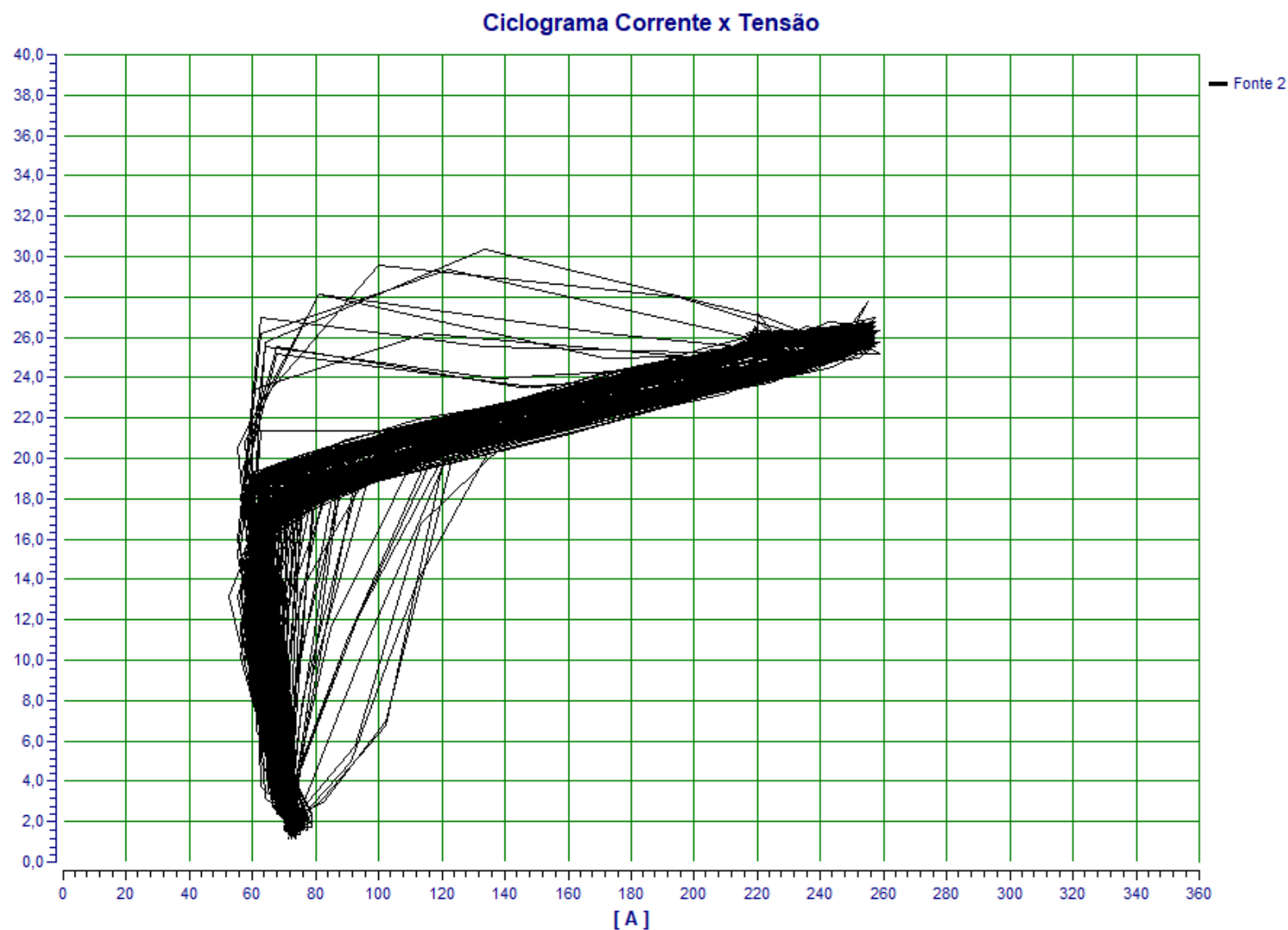


Figura 208 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 21 mm.

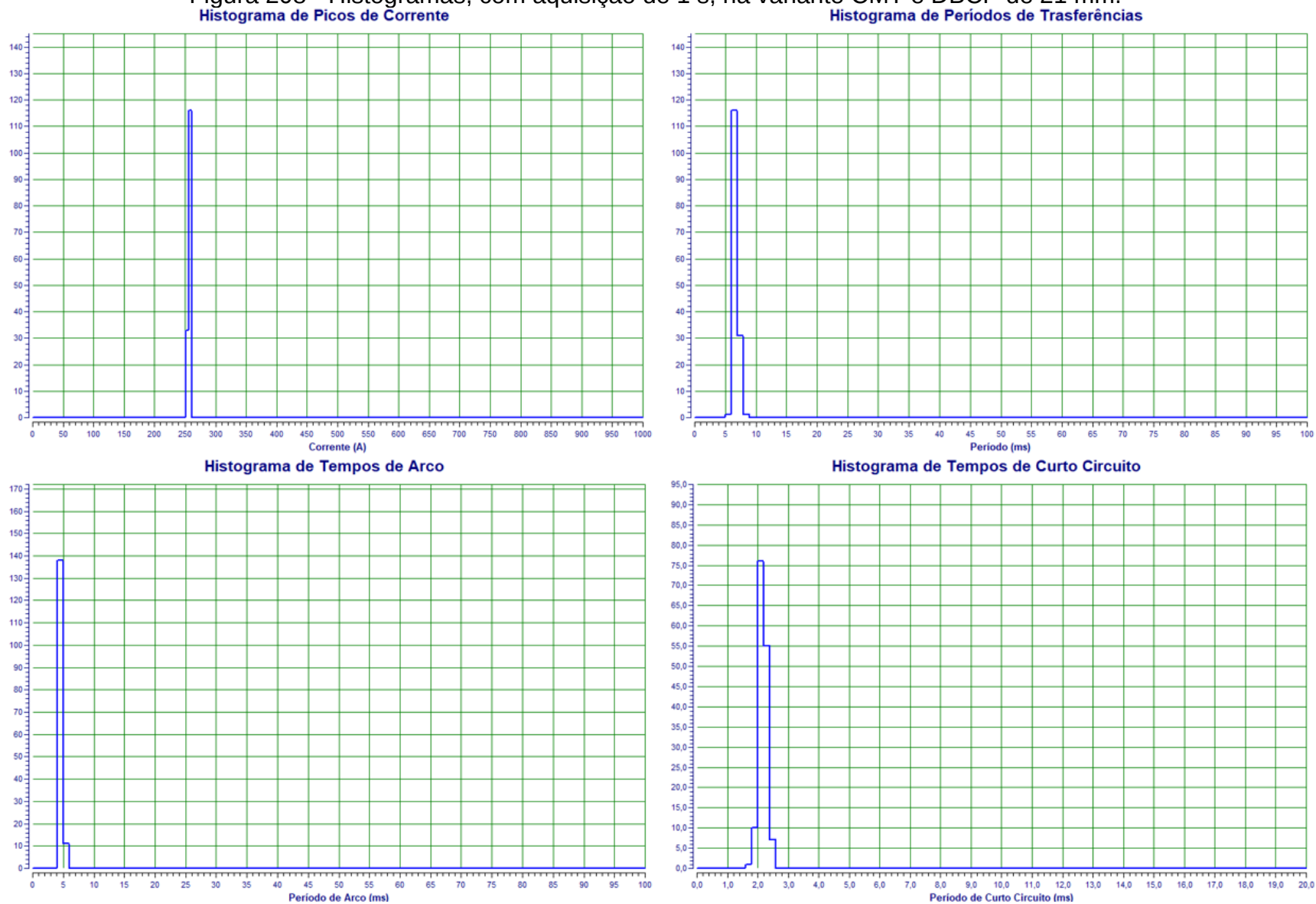


Figura 209 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante CMT e DBCP de 30 mm.

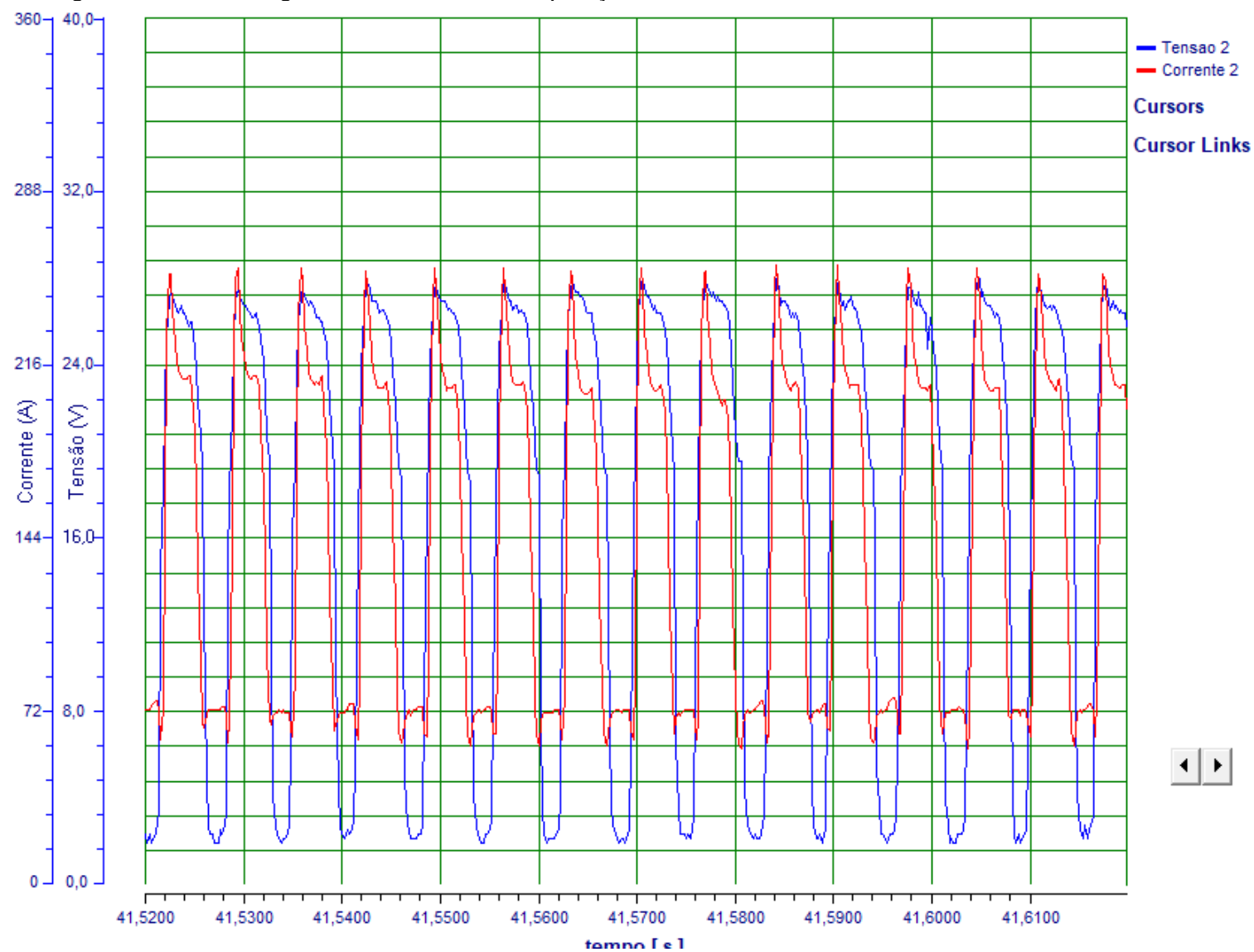


Figura 210 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 30 mm.

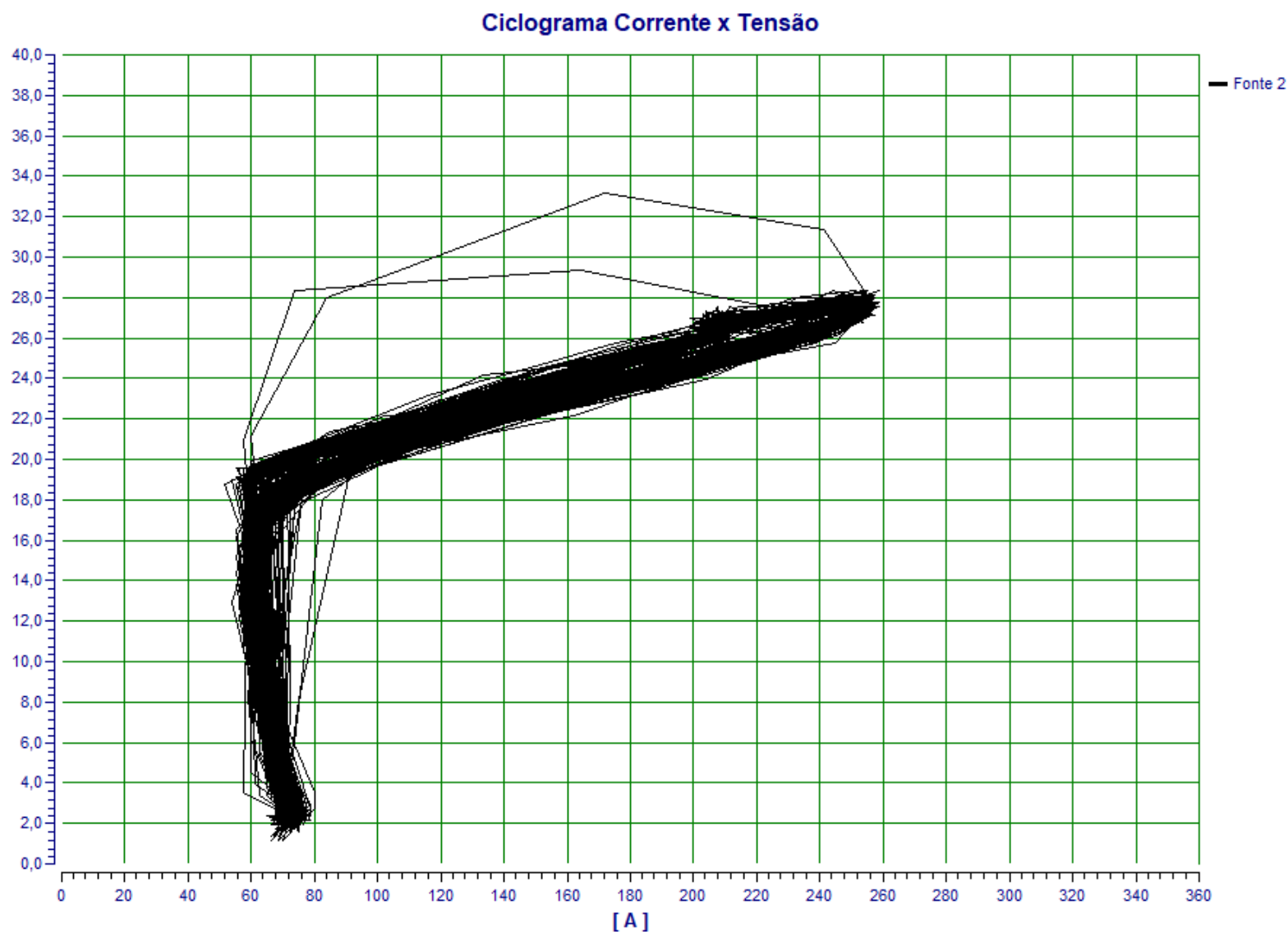
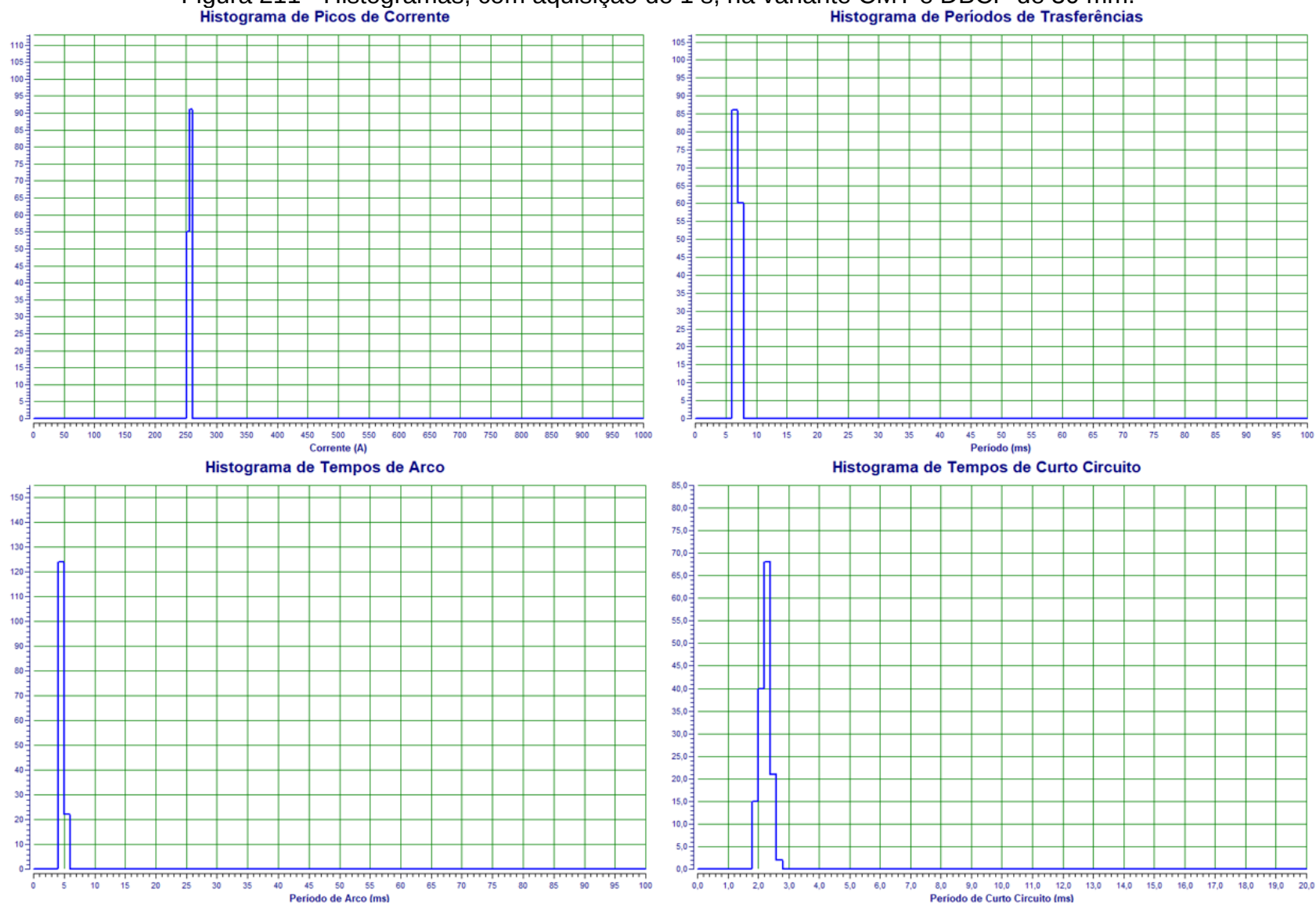


Figura 211 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante CMT e DBCP de 30 mm.



PMC utilizando limiar de tensão 28V e corrente 300A:

Figura 212 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC e DBCP de 12 mm.

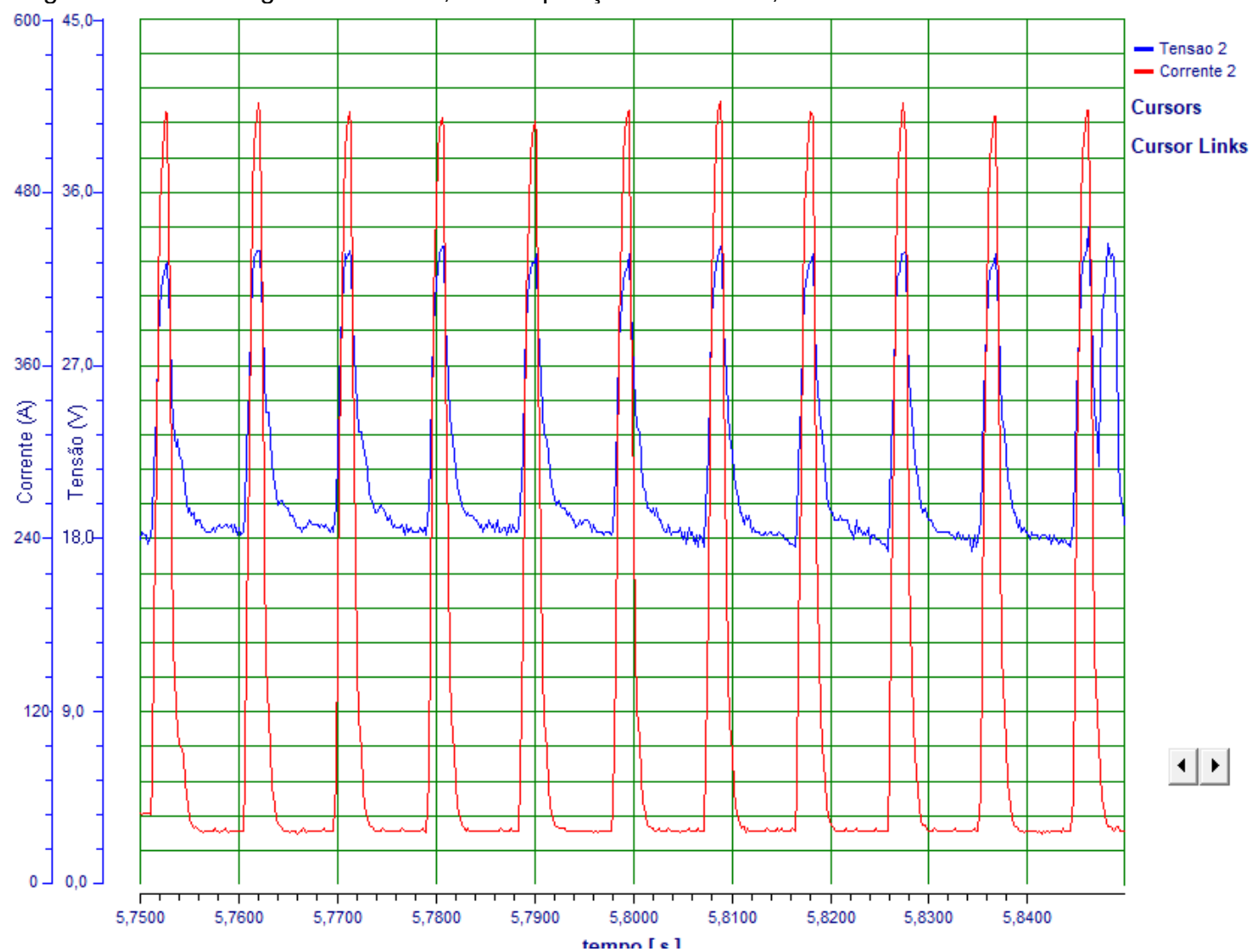


Figura 213 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s (4,75 a 5,75 s), na variante PMC e DBCP de 12 mm.

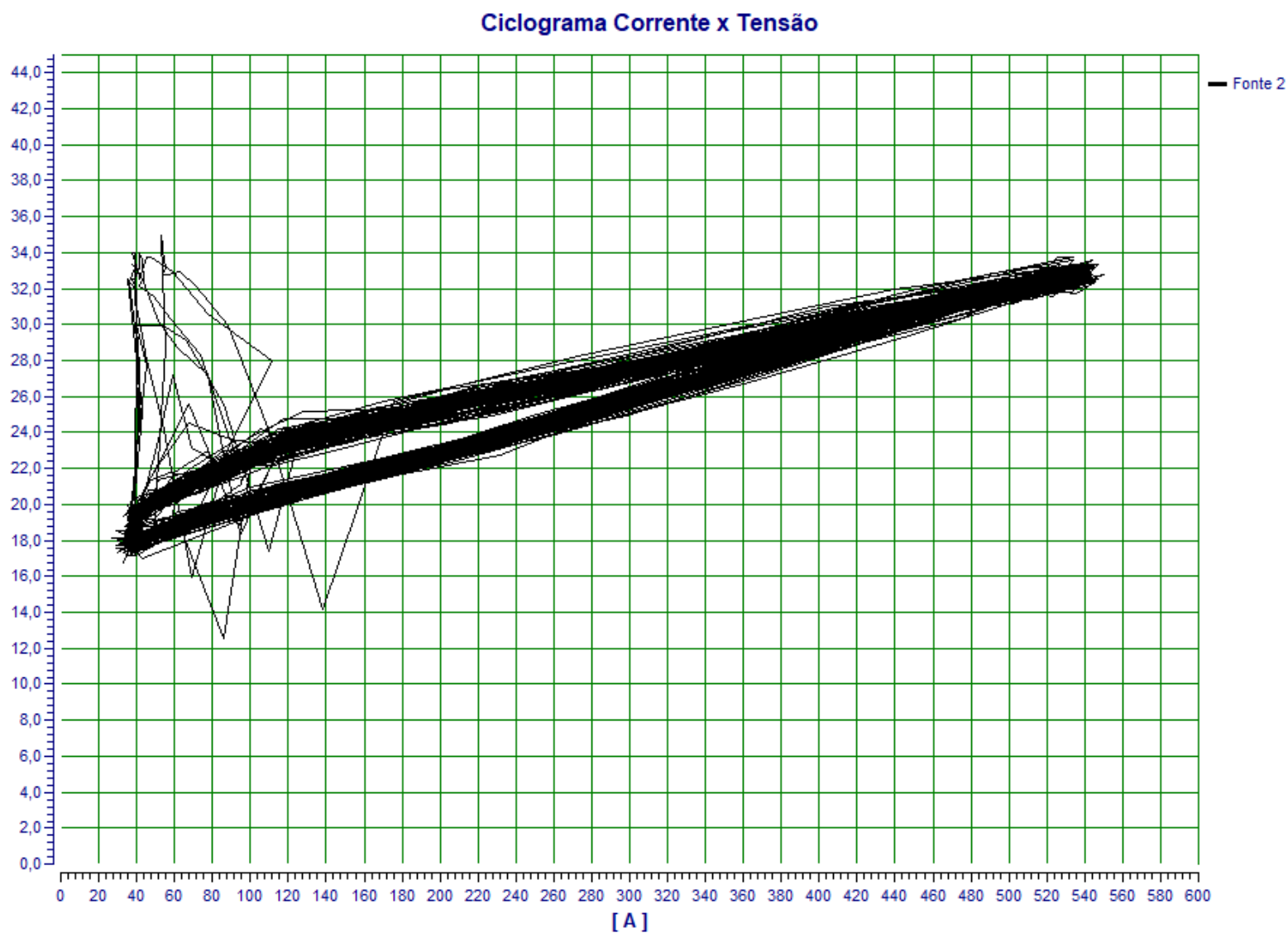


Figura 214 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 12 mm.

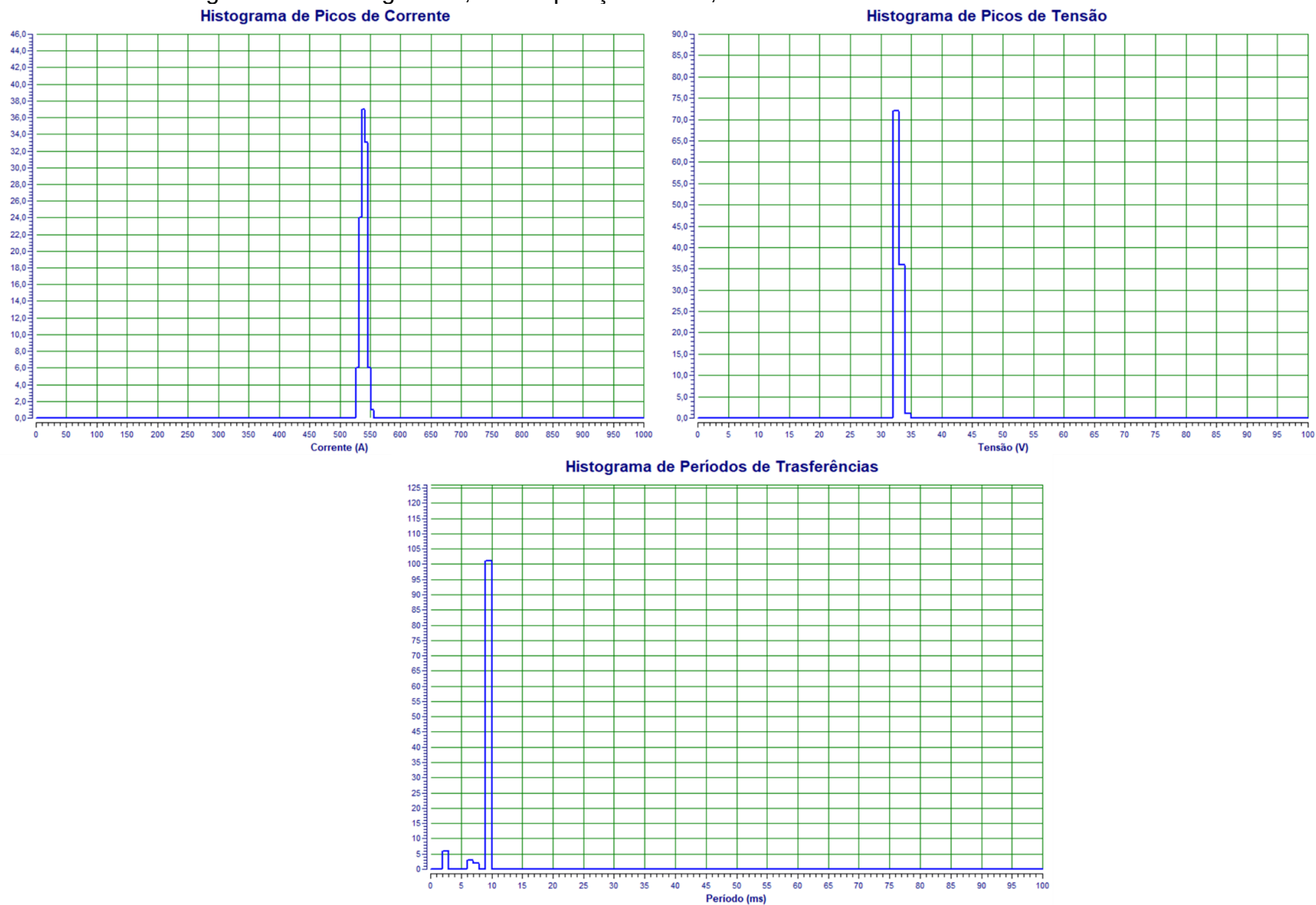


Figura 215 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC e DBCP de 21 mm.

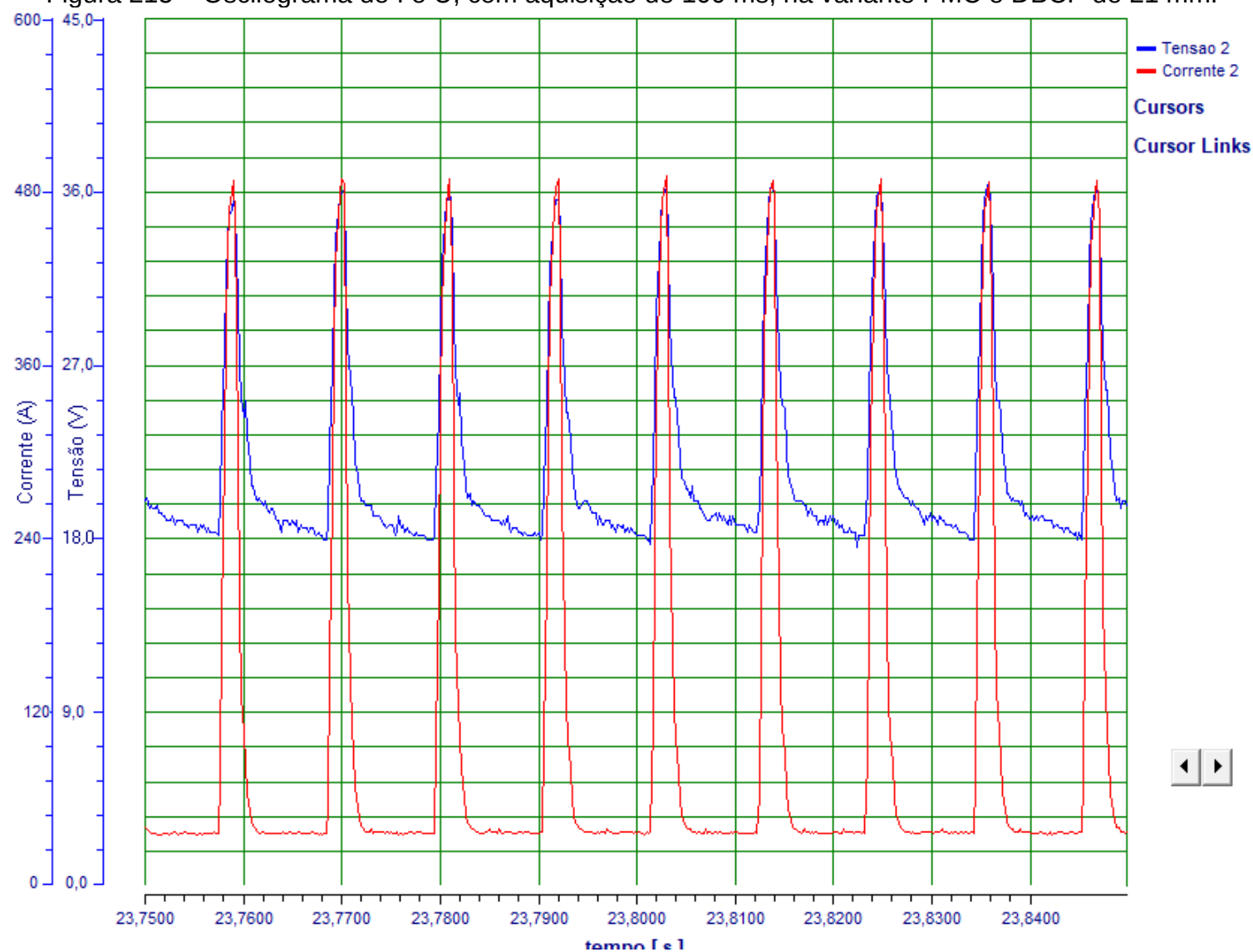


Figura 216 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 21 mm.

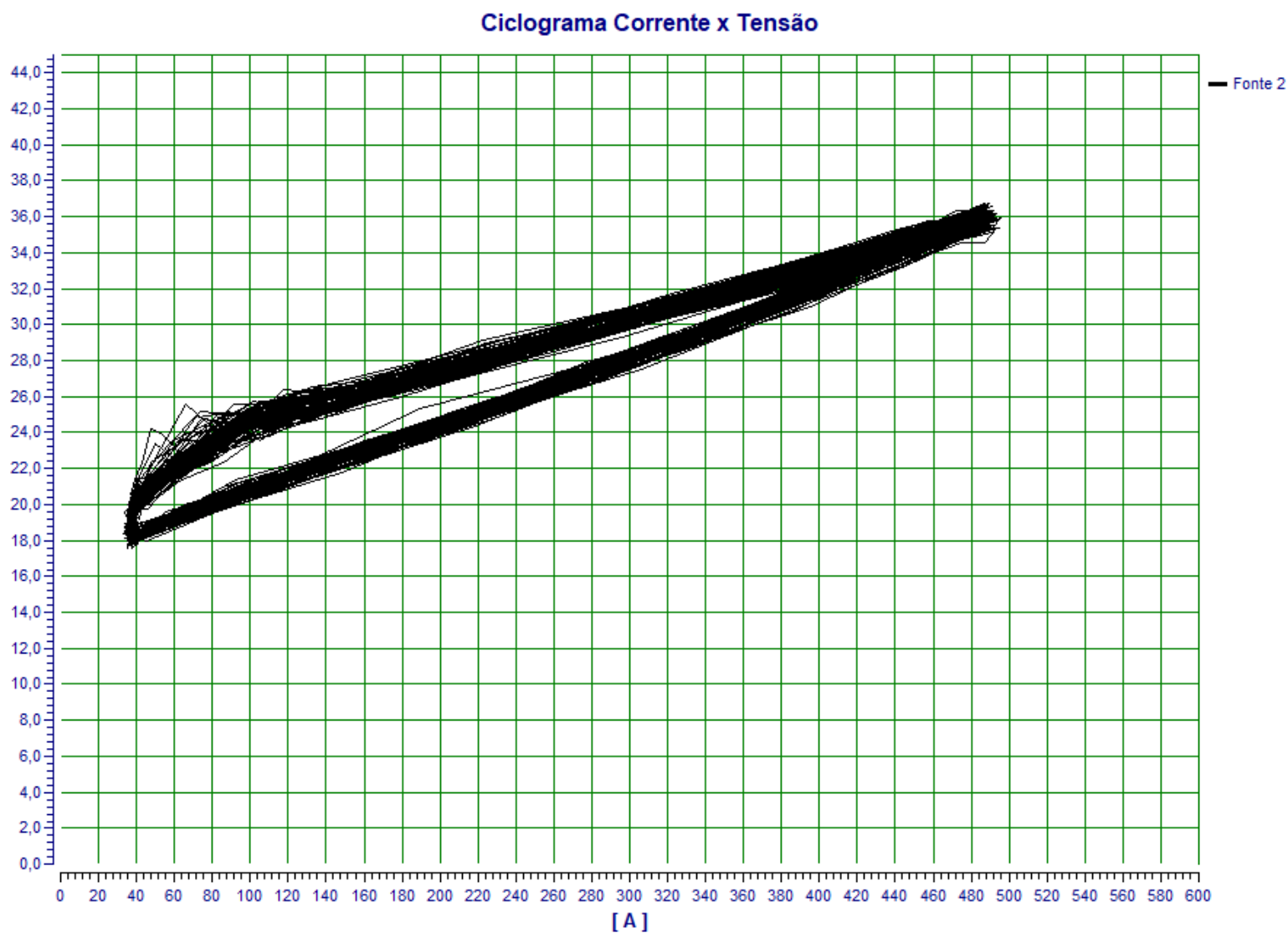


Figura 217 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 21 mm.

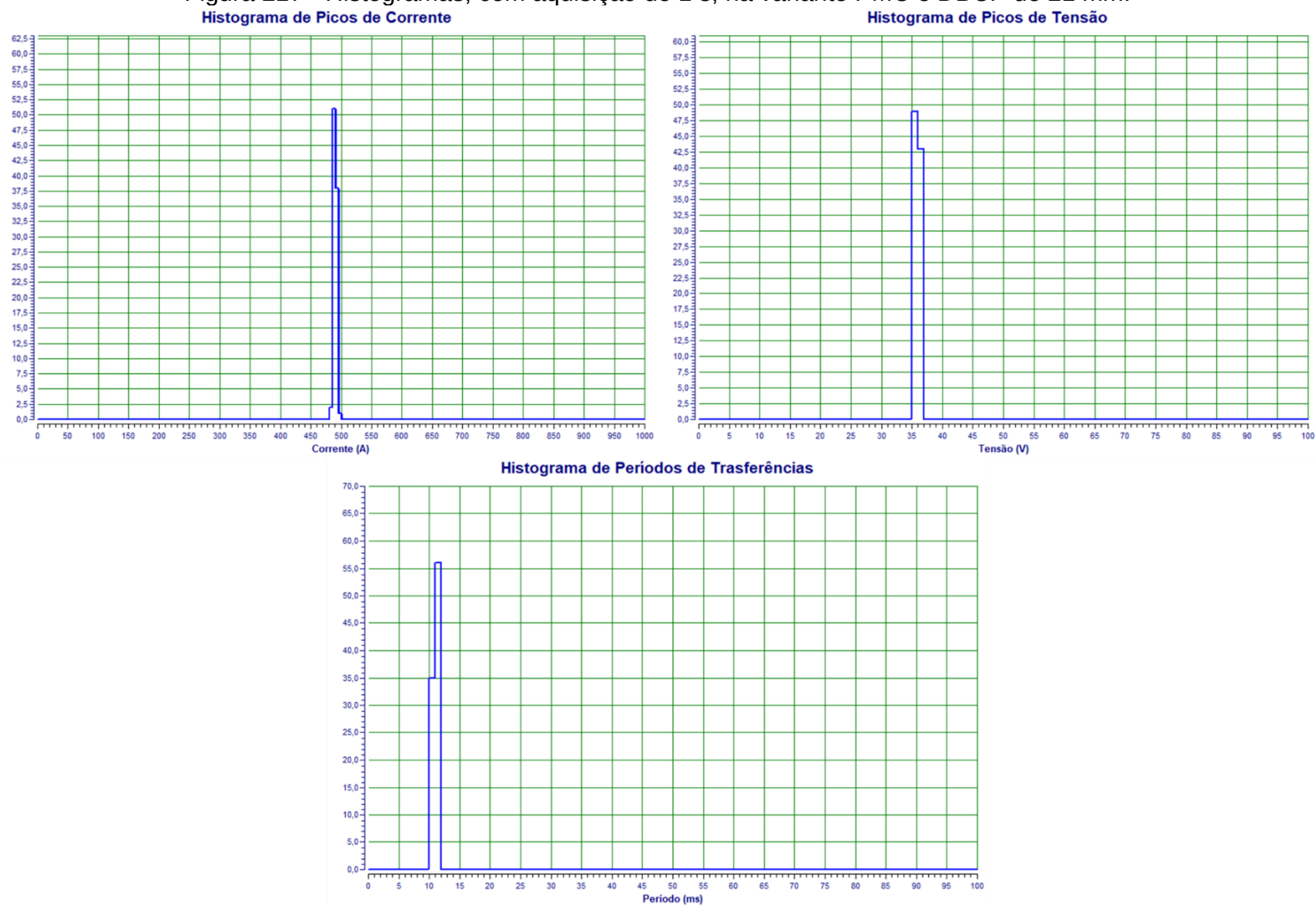


Figura 218 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC e DBCP de 30 mm.

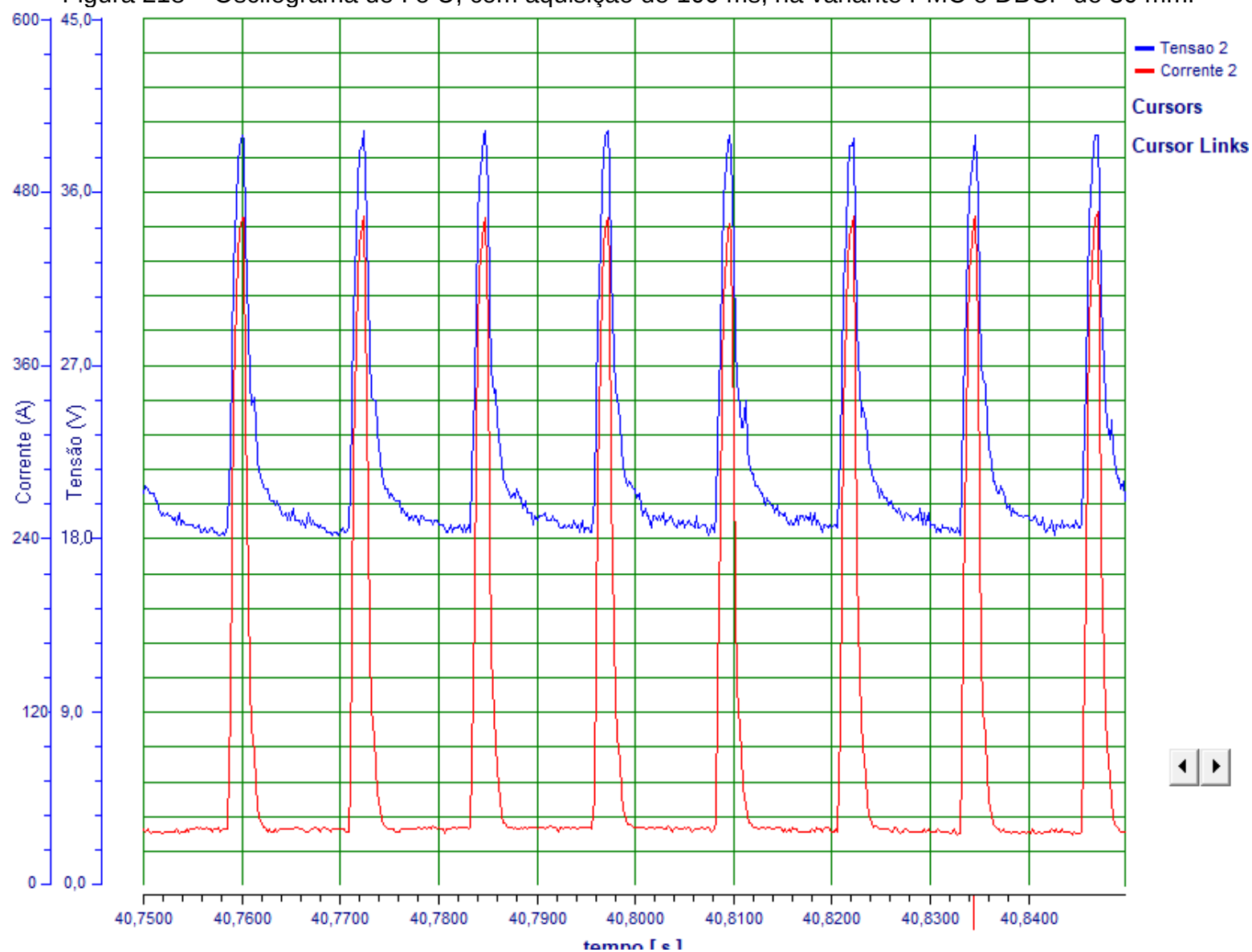


Figura 219 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 30 mm.

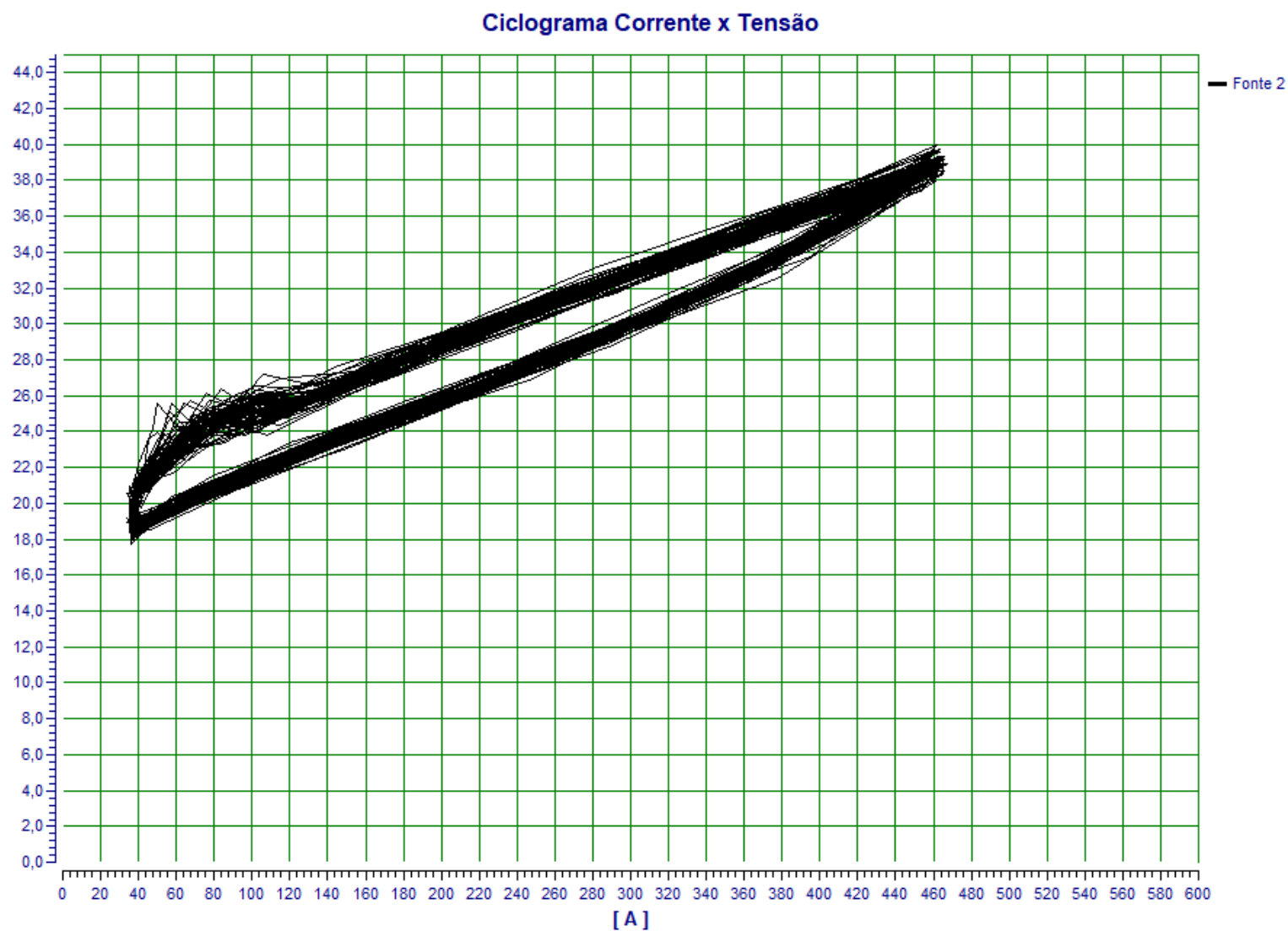
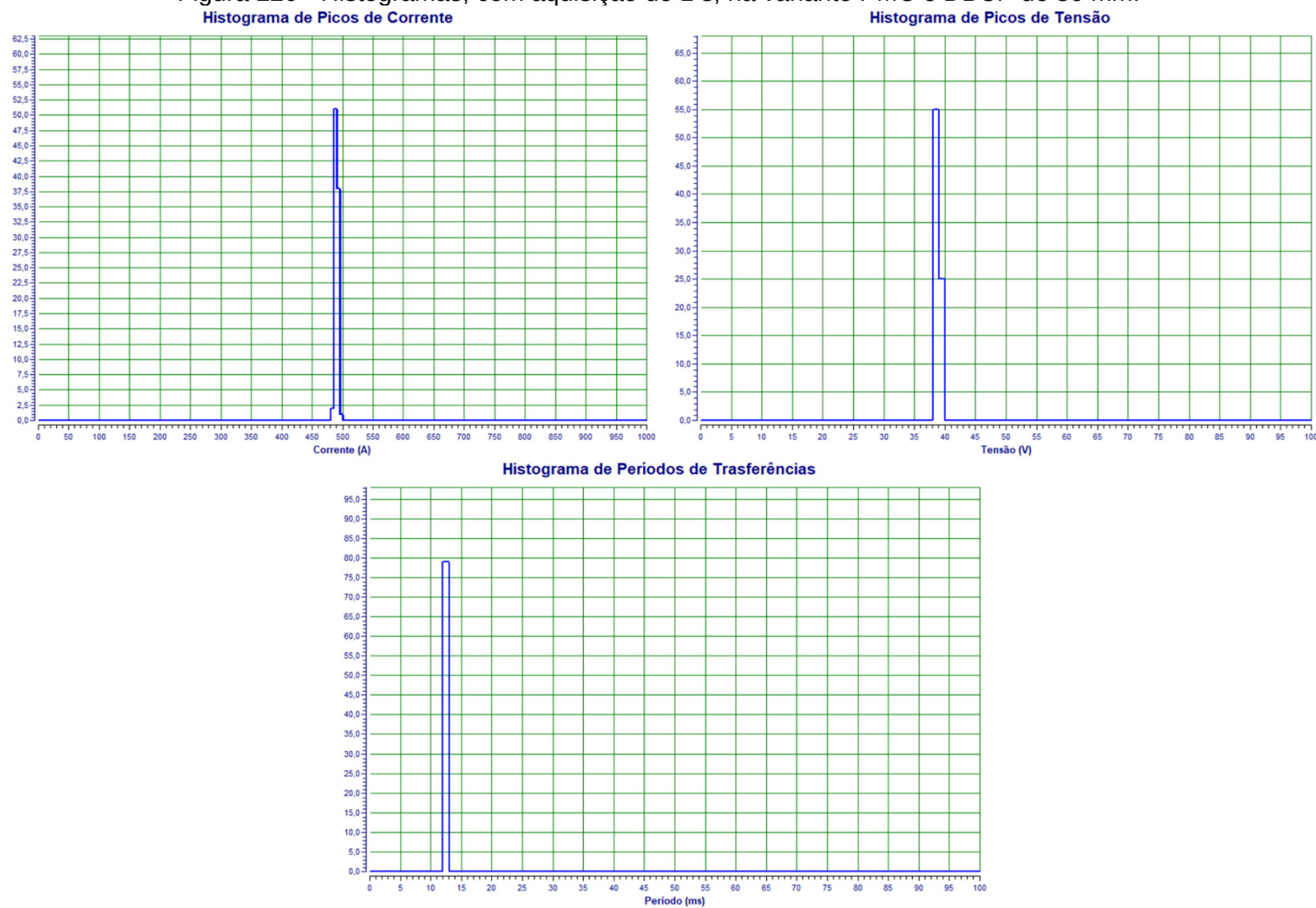


Figura 220 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC e DBCP de 30 mm.



PMC CP:

Figura 221 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC CP e DBCP de 12 mm.

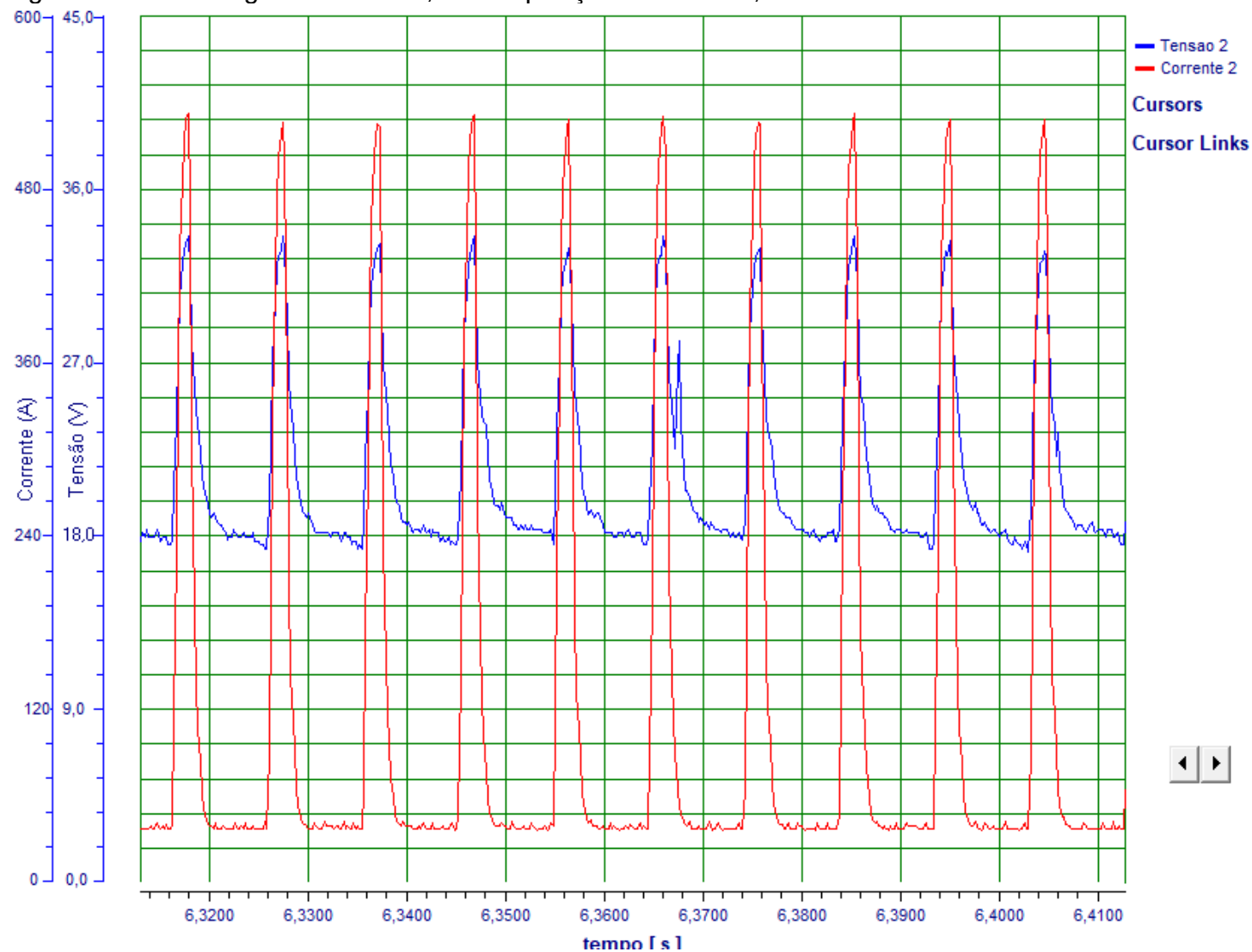


Figura 222 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 12 mm.

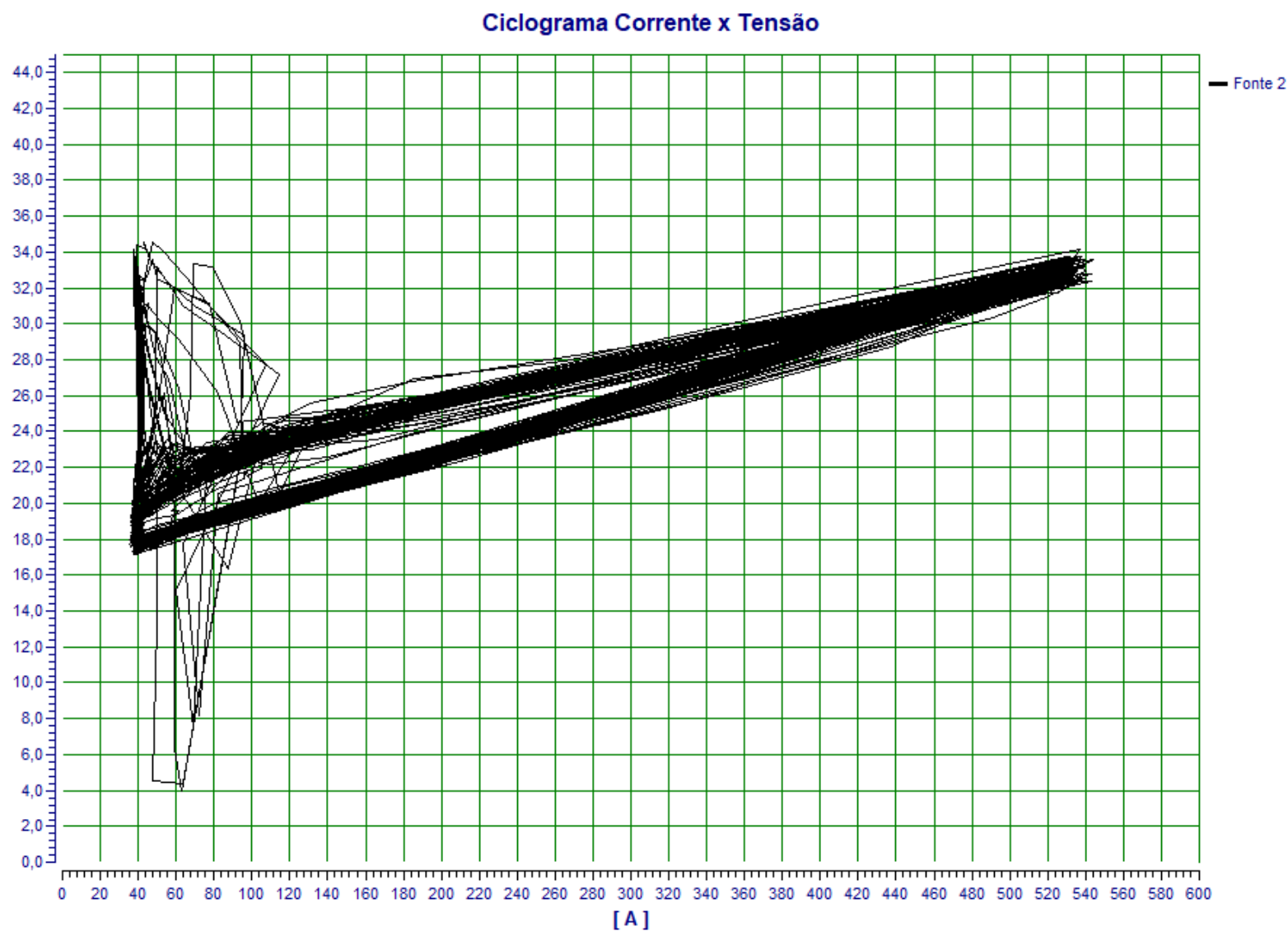


Figura 223 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 12 mm.

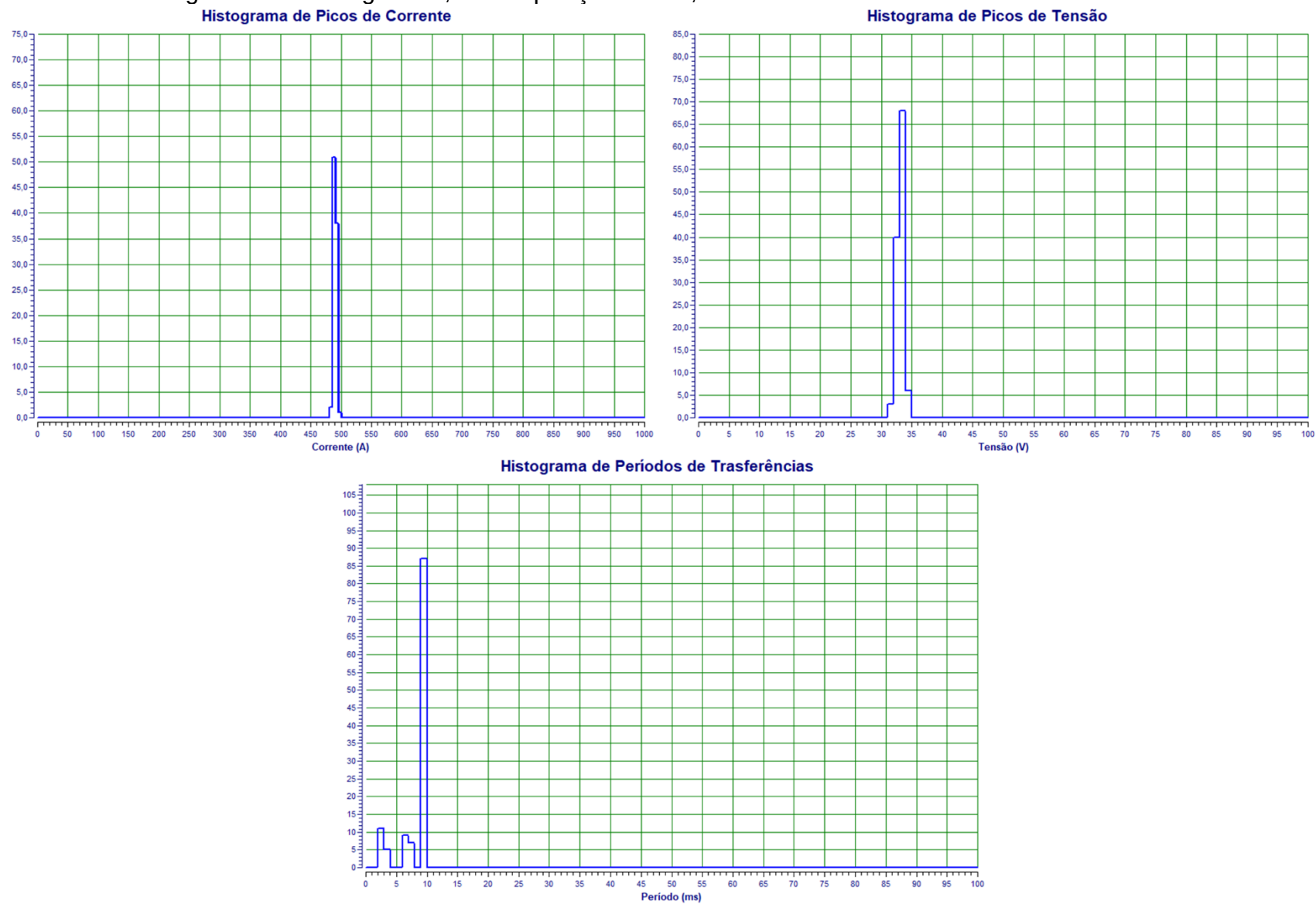


Figura 224 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC CP e DBCP de 21 mm.

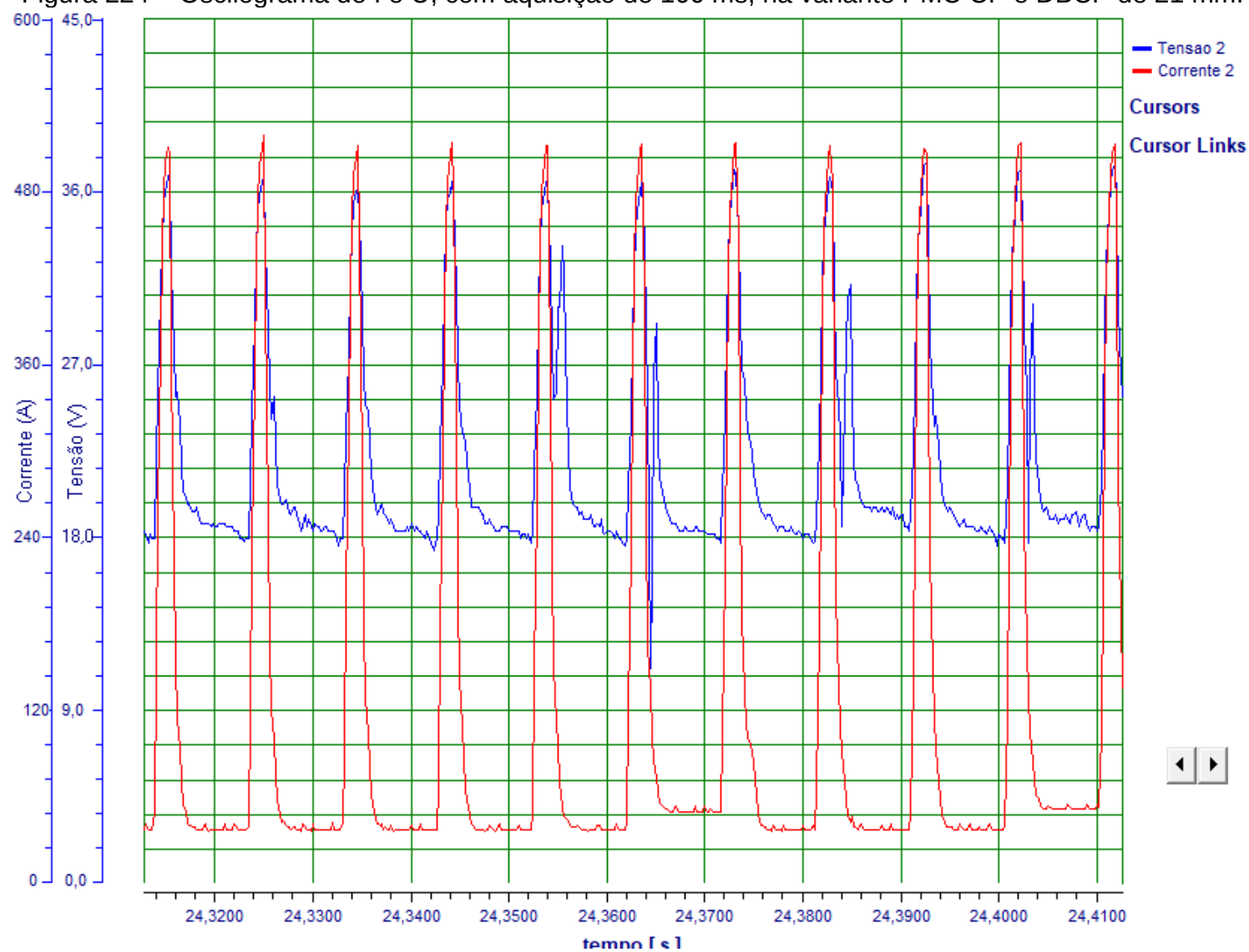


Figura 225 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 21 mm.

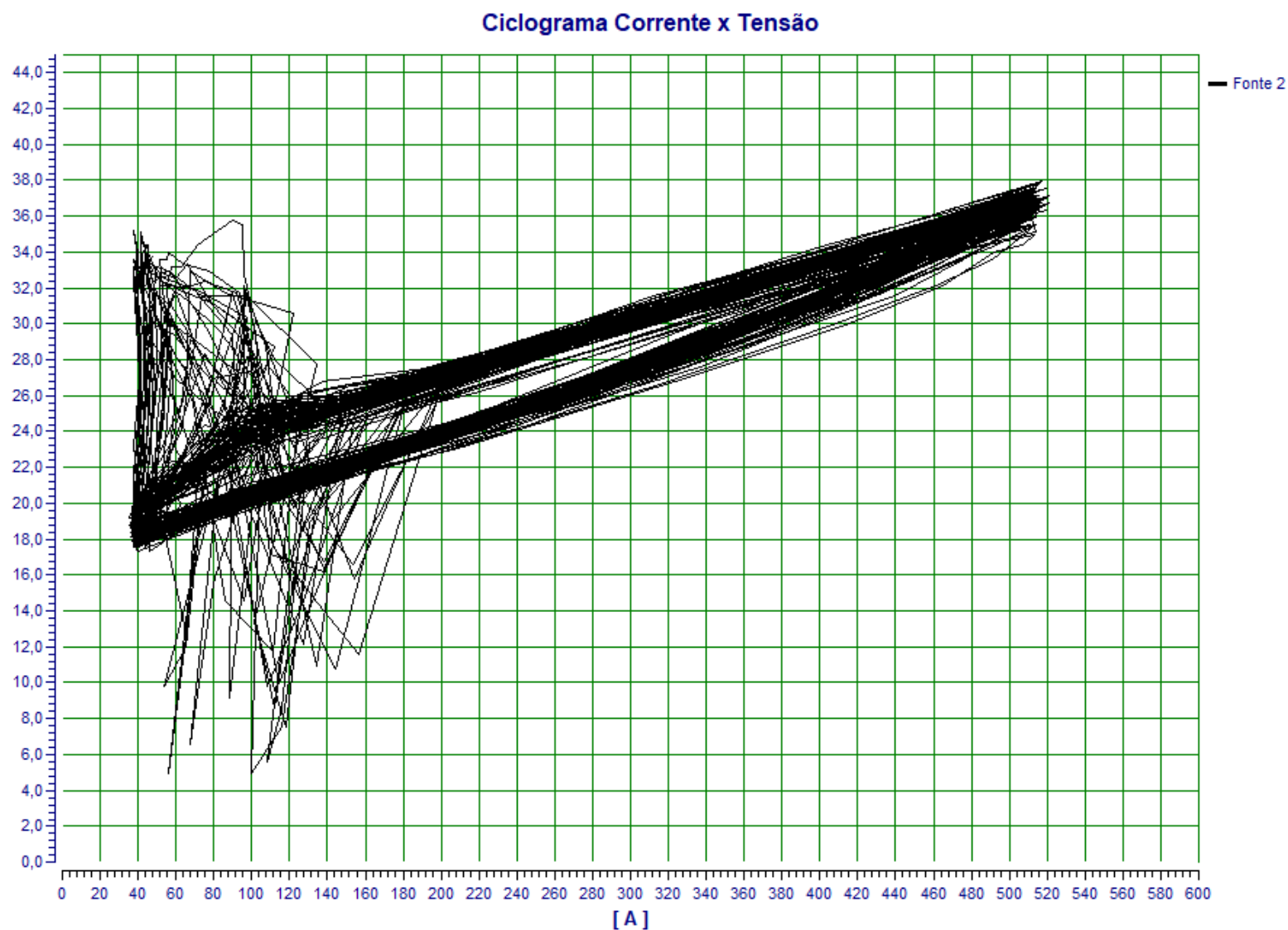


Figura 226 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 21 mm.

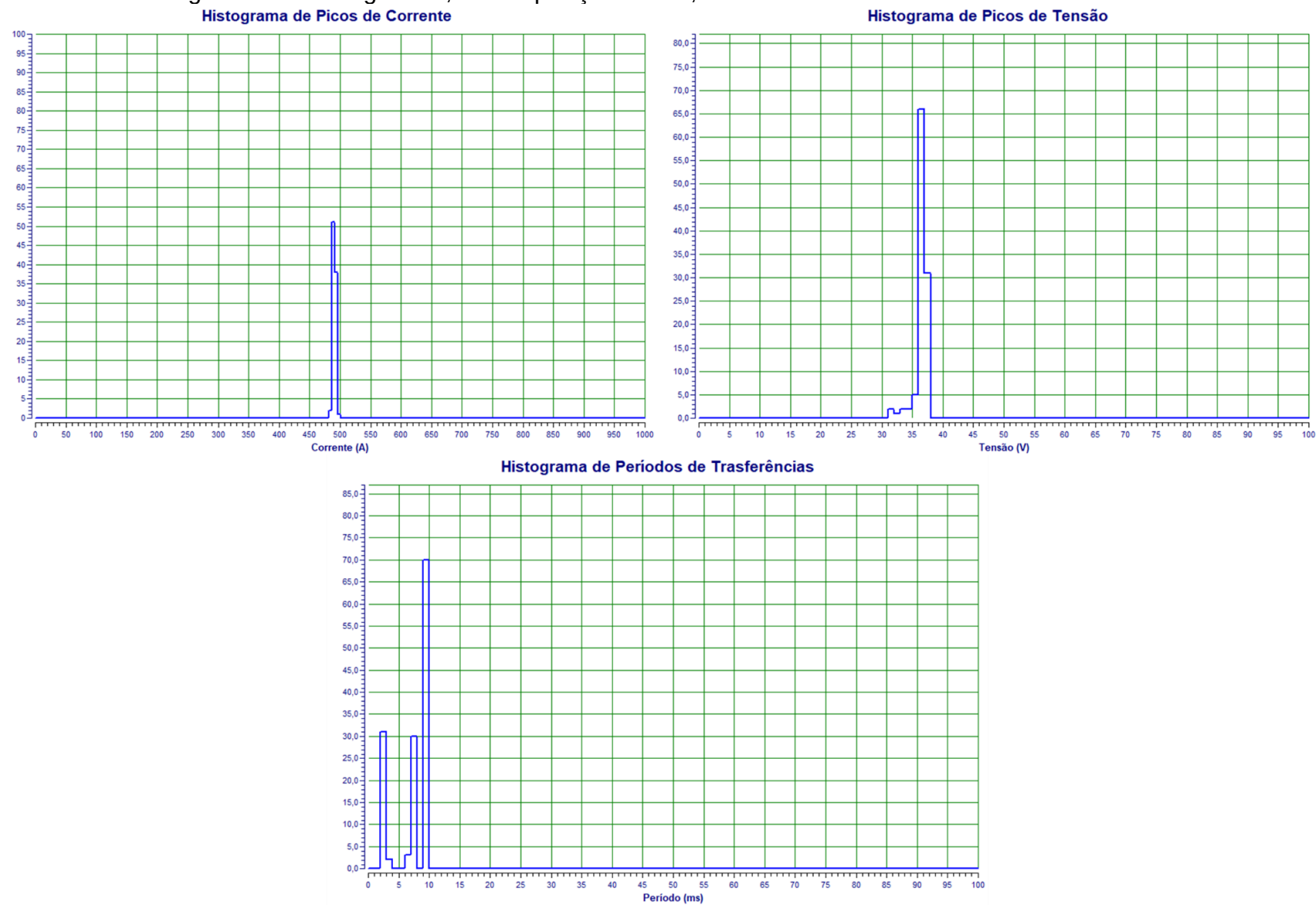


Figura 227 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante PMC CP e DBCP de 30 mm.

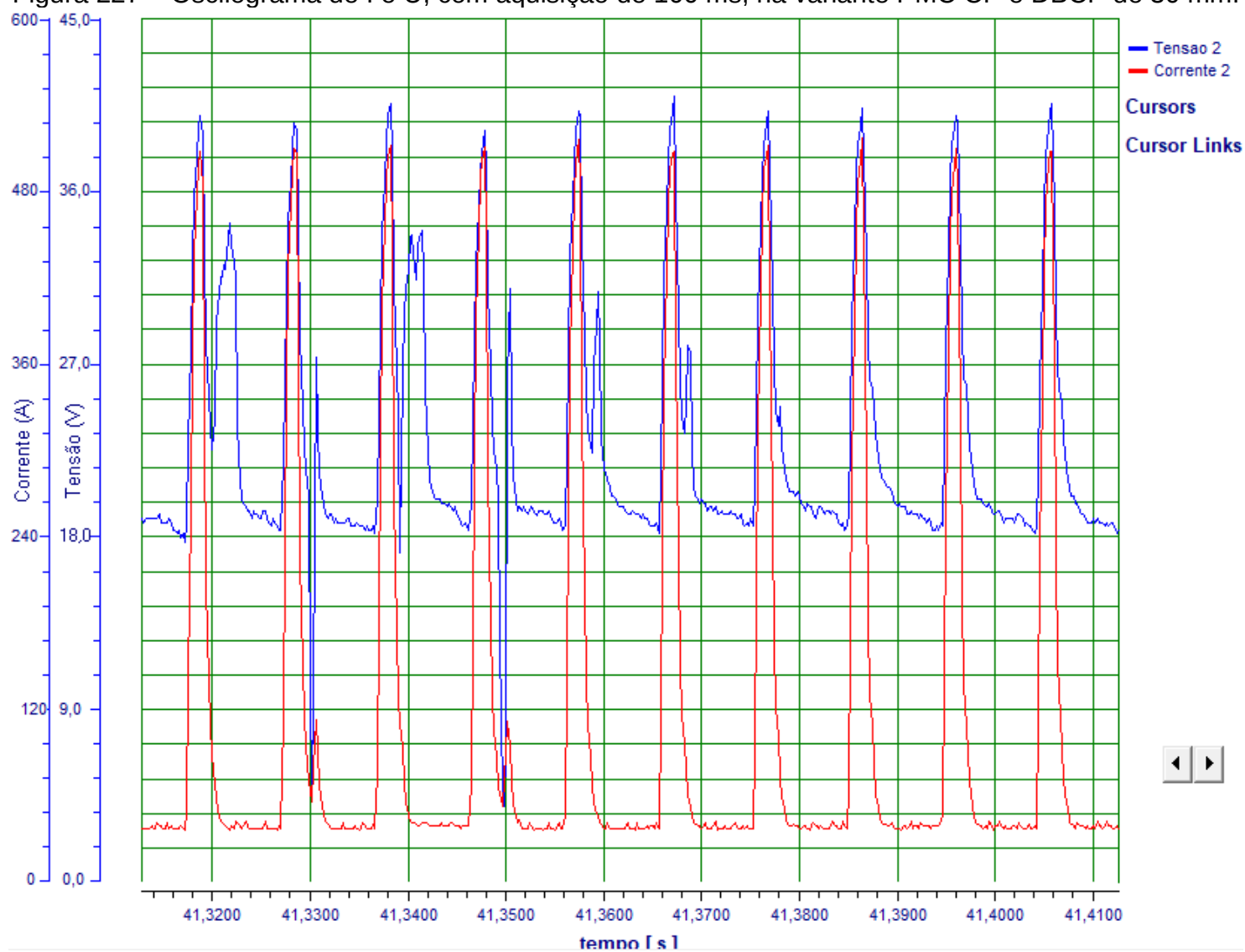


Figura 228 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 30 mm.

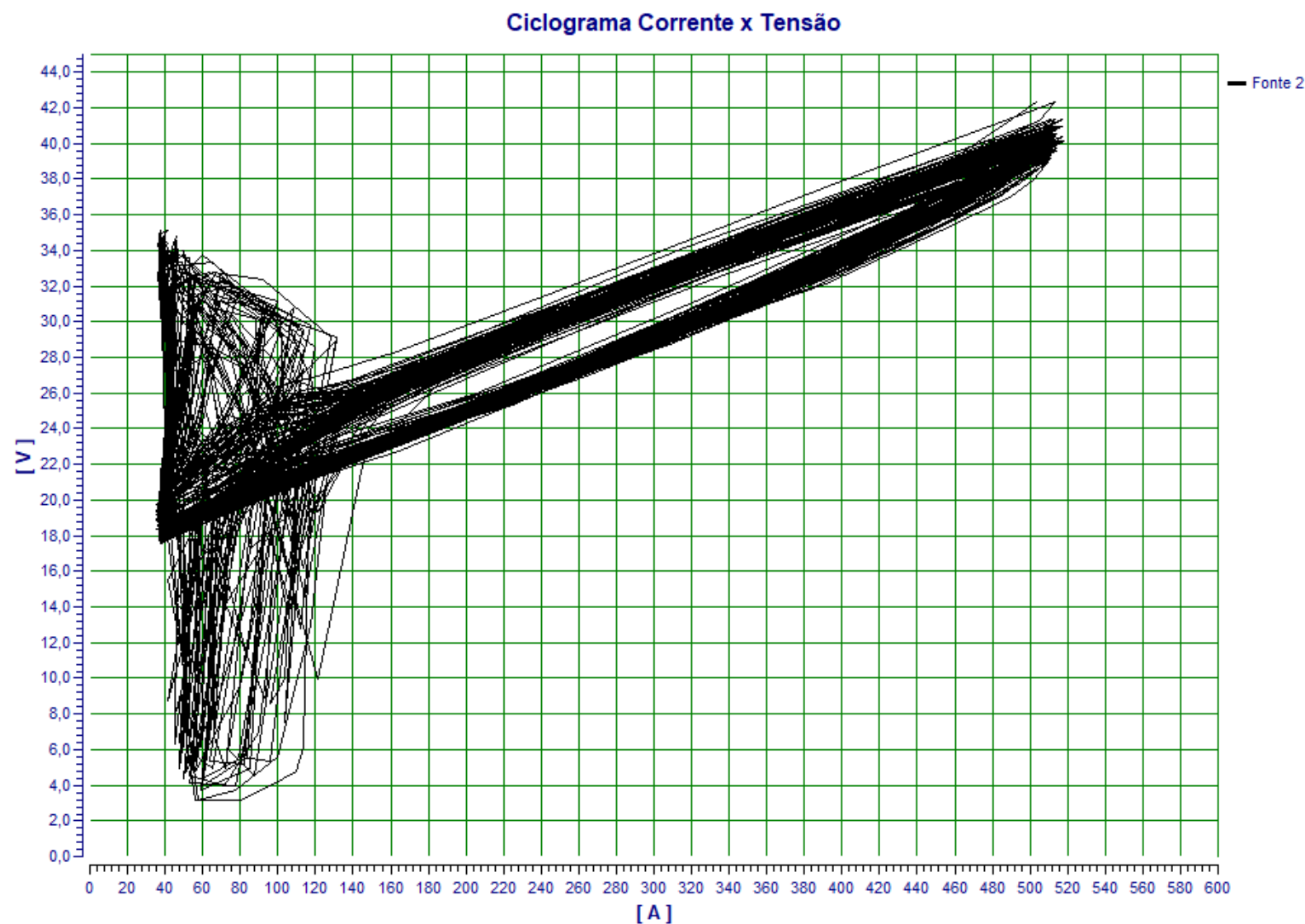
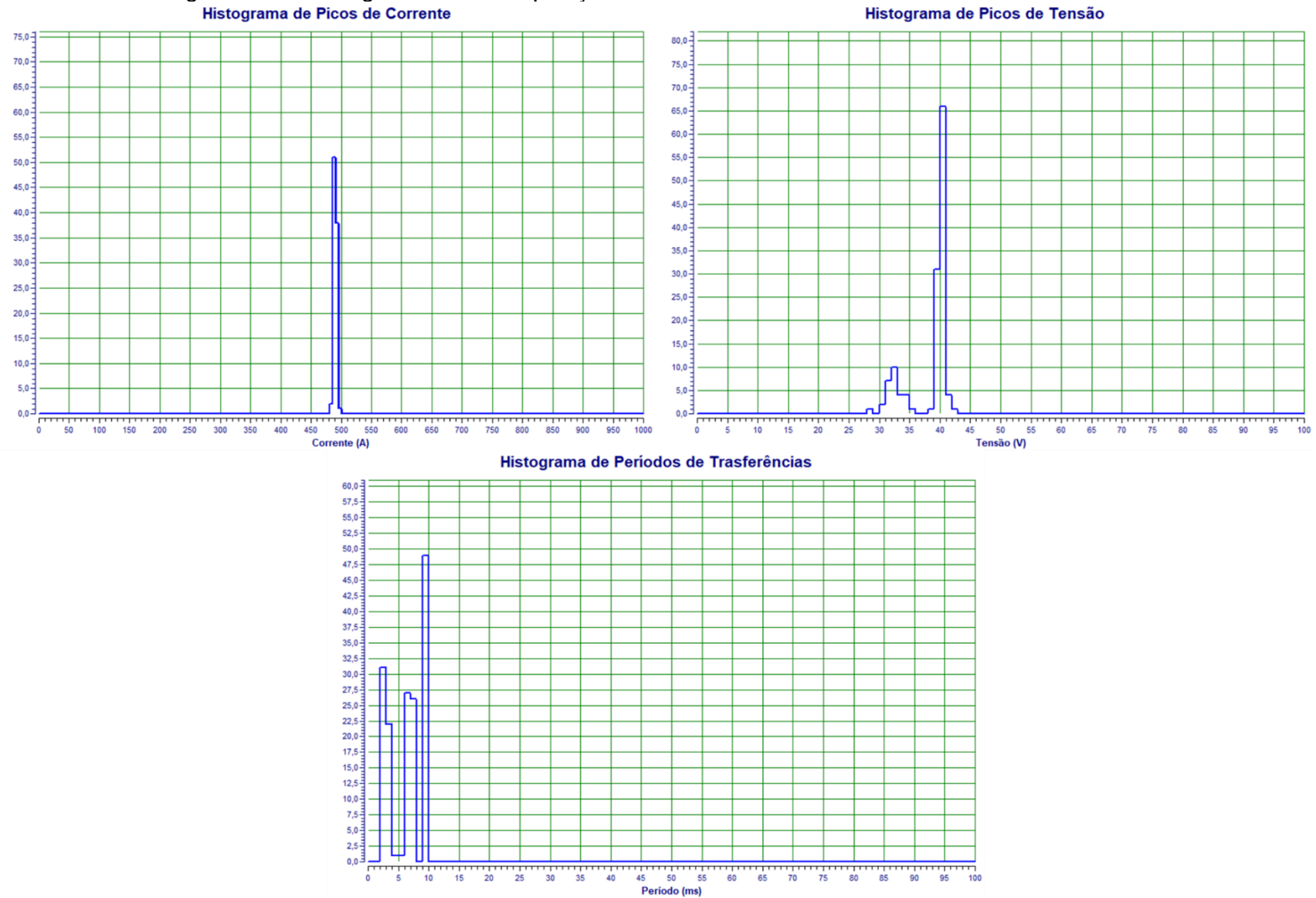


Figura 229 - Histogramas, com aquisição de 1 s, na variante PMC CP e DBCP de 30 mm.



Pulsado convencional:

Figura 230 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Pulsado convencional e DBCP de 15 mm.

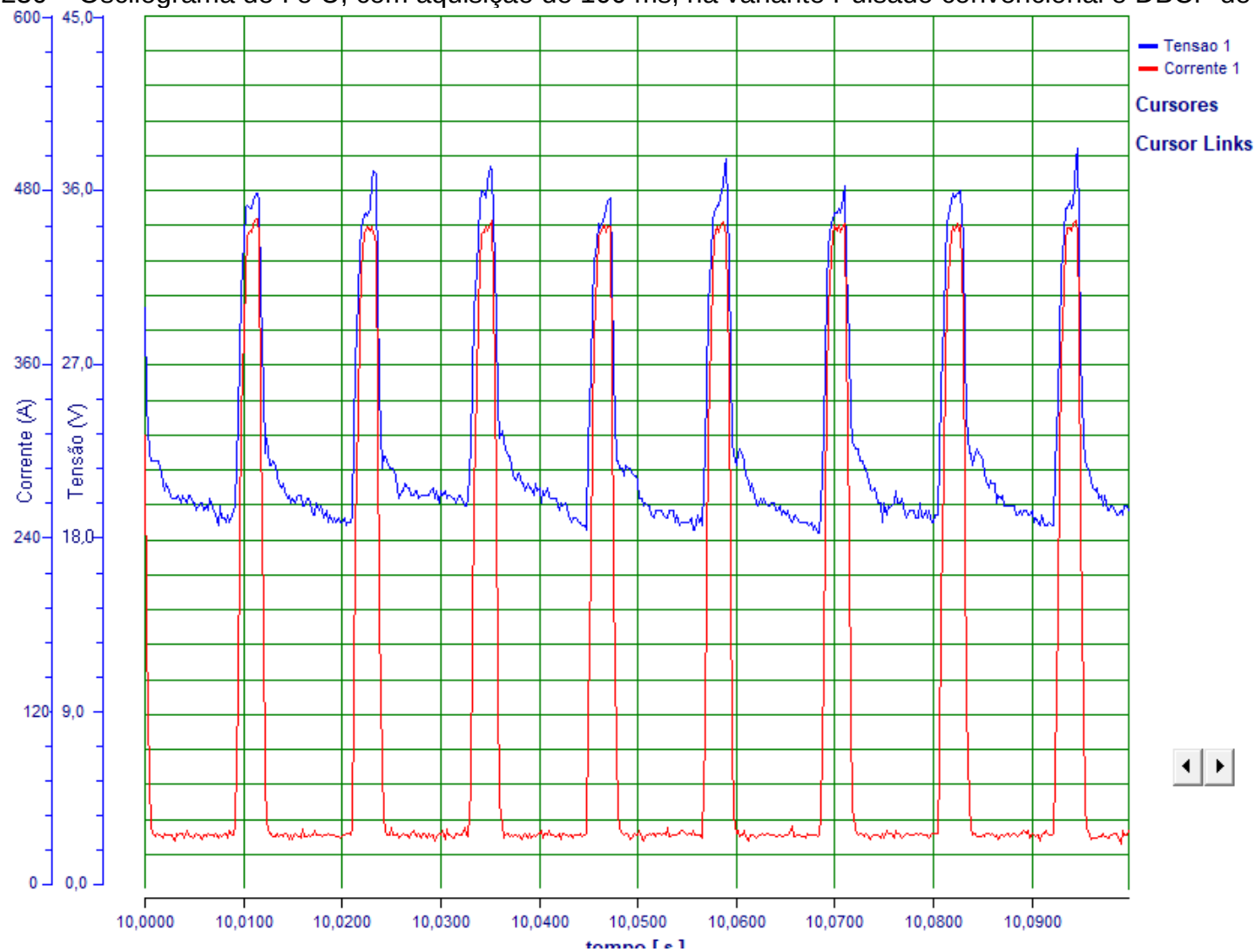


Figura 231 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante Pulsado convencional e DBCP de 15 mm.

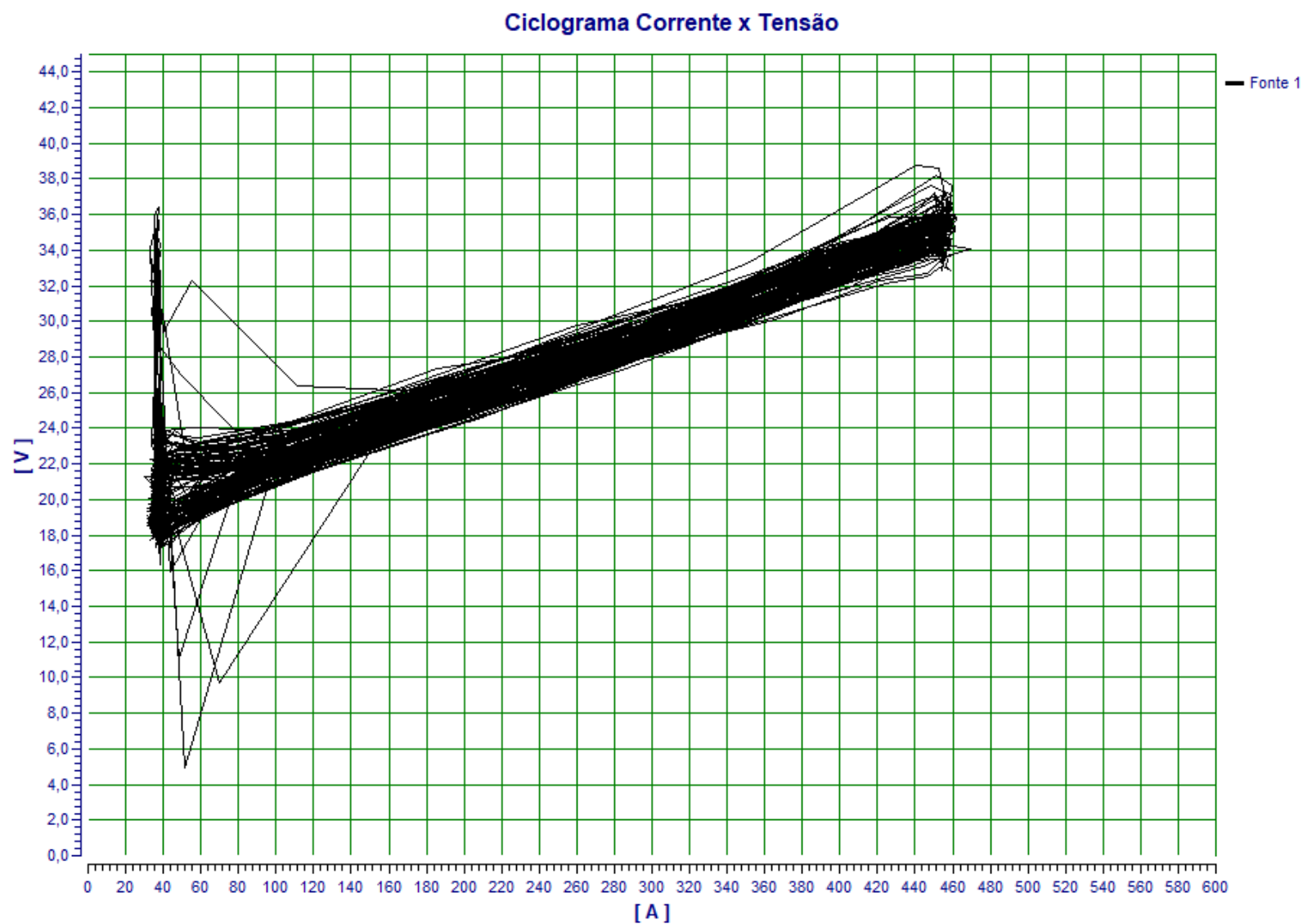


Figura 232 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Pulsado convencional e DBCP de 21 mm.

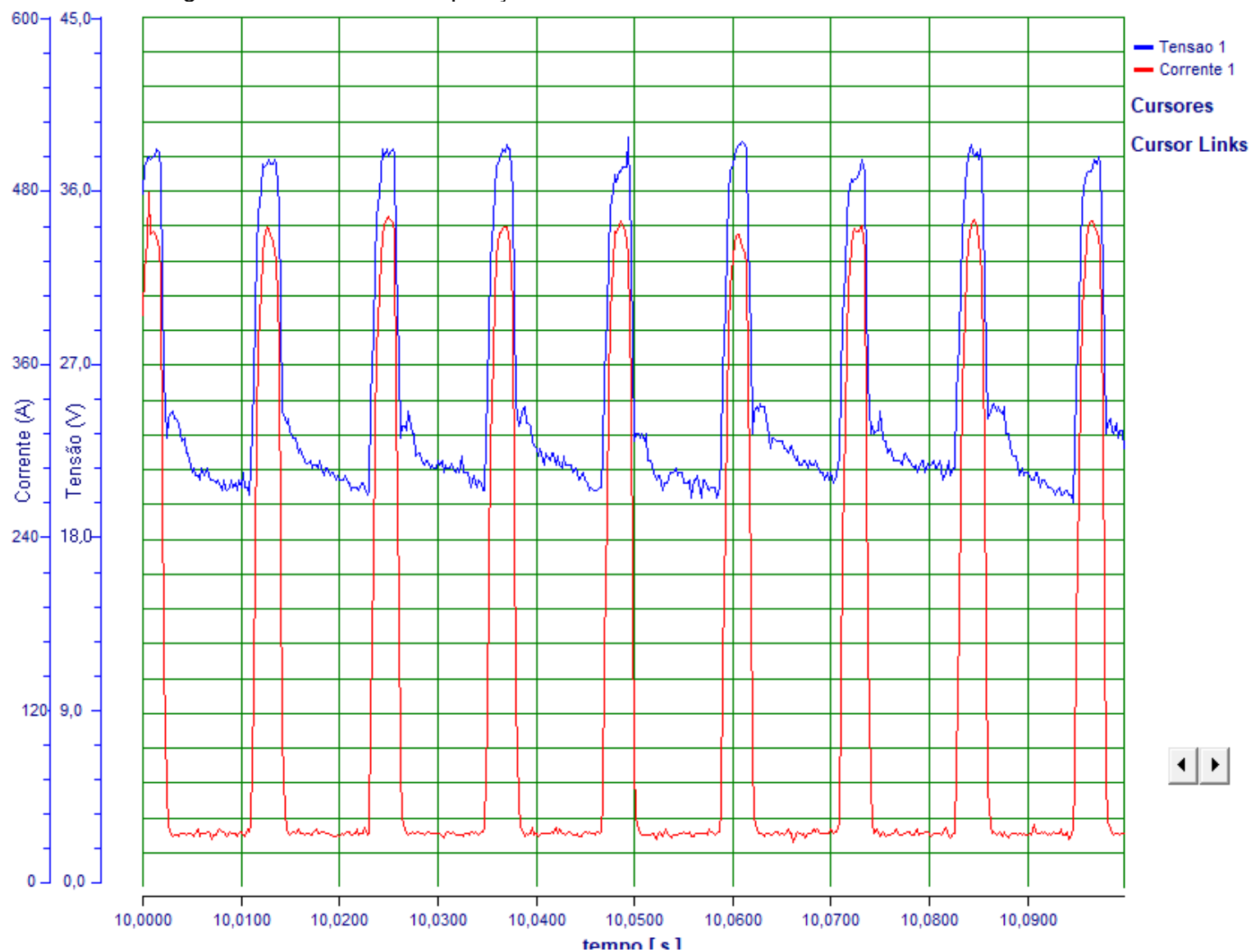


Figura 233 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante Pulsado convencional e DBCP de 21 mm.

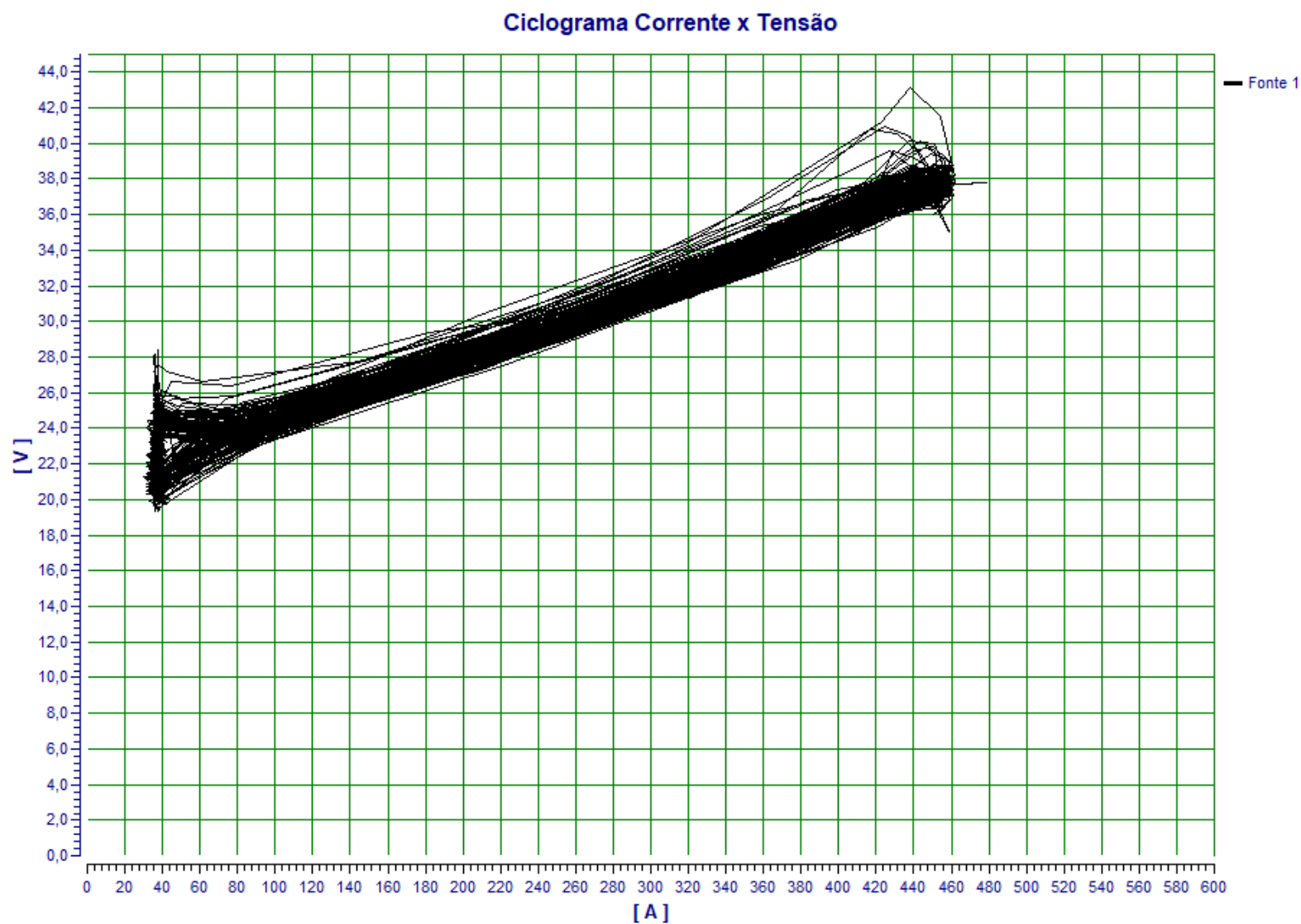


Figura 234 – Oscilograma de I e U, com aquisição de 100 ms, na variante Pulsado convencional e DBCP de 30 mm.

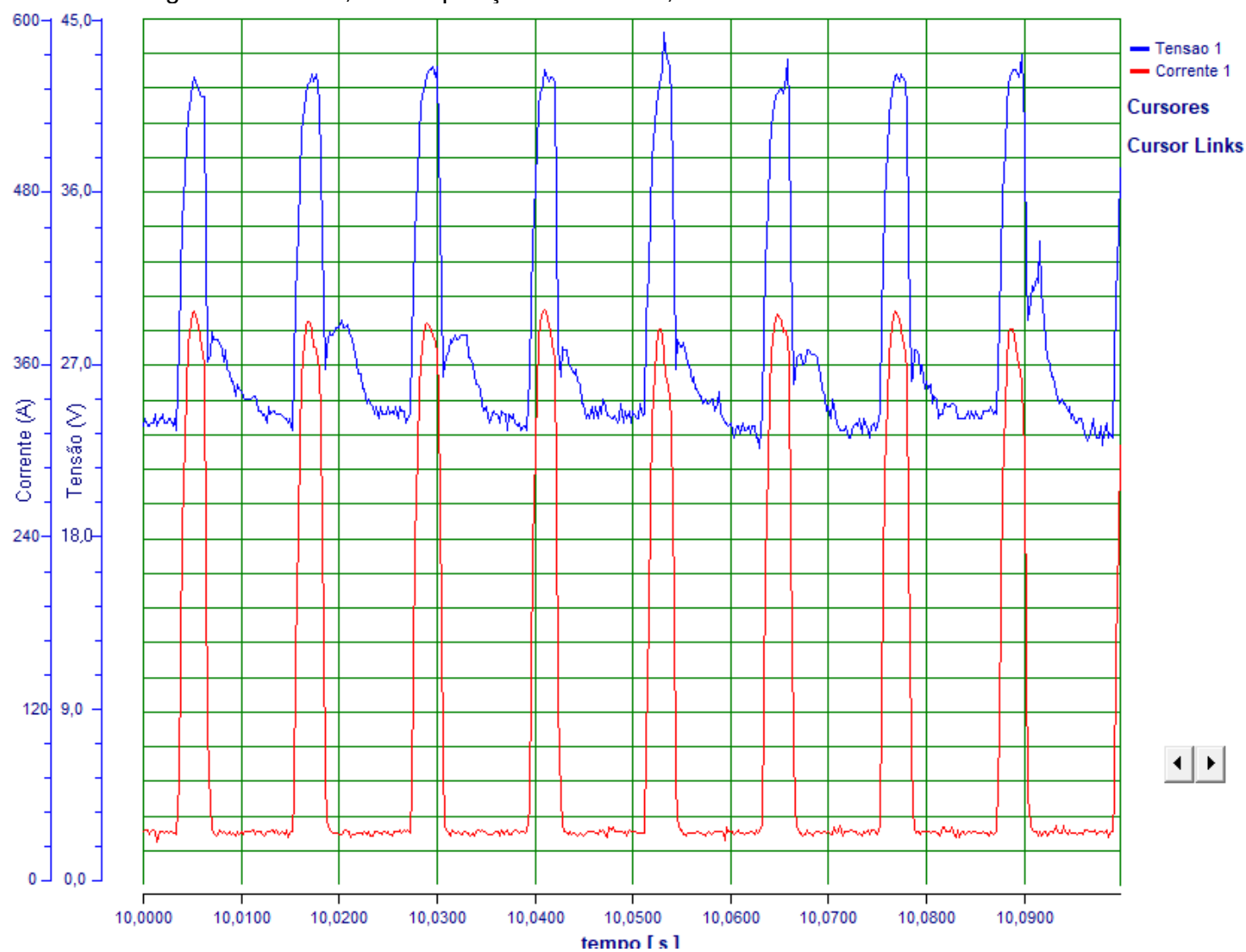


Figura 235 - Ciclograma de corrente (A) no eixo horizontal e tensão (V) no eixo vertical, com aquisição de 1 s, na variante Pulsado convencional e DBCP de 30 mm.

