



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Tese de Doutorado

Utilização da oscilação magnética do arco elétrico seguindo Figuras de Lissajous na soldagem GMAW para passe de raiz

Autor: Luciano Juliani

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Março 2021



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Luciano Juliani

Utilização da oscilação magnética do arco elétrico seguindo Figuras de Lissajous na soldagem GMAW para passe de raiz

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD

Área de concentração: Processos de Fabricação

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2021

J94u

Juliani, Luciano.

Utilização da oscilação magnética do arco elétrico seguindo Figuras de Lissajous na soldagem GMAW para passe de raiz [recurso eletrônico] / Luciano Juliiani . - 2021.

1 recurso online (xxiii, 230 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 206-230.

Bibliografia: f. 198-205.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Oscilações - Teses. 3. Soldagem elétrica - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

UTILIZAÇÃO DA OSCILAÇÃO MAGNÉTICA DO ARCO ELÉTRICO SEGUINDO FIGURAS DE LISSAJOUS NA SOLDAGEM GMAW PARA PASSE DE RAIZ

LUCIANO JULIANI

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (orientador-Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ariel Rodriguez Arias (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa (LeTourneau University - USA), Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Universidade Federal de Uberlândia/UFU), Ivanilza Felizardo (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-CEFET), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Processos de Fabricação".

Tese aprovada no dia 12 de março de 2021.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Professor do Magistério Superior**, em 04/04/2021, às 10:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Professor do Magistério Superior**, em 17/04/2021, às 11:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ezequiel Caires Pereira Pessoa, Usuário Externo**, em 21/04/2021, às 13:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Usuário Externo**, em 22/04/2021, às 07:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivanilza Felizardo, Usuário Externo**, em 05/05/2021, às 12:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0655544 e o código CRC 4C53D828.

Resumo

A proposta deste trabalho é estudar a utilização da oscilação magnética controlada do arco elétrico conforme padrões geométricos complexos aplicados ao processo GMAW para a soldagem do passe de raiz. Estes padrões foram aqui representados pelo que se conhece como Figuras de Lissajous. As Figuras de Lissajous são curvas paramétricas produzidas matematicamente que podem oferecer a versatilidade para a criação de movimentos de tecimento similares aos praticados por soldadores experientes. Estas curvas, basicamente, são produzidas aplicando-se e controlando equações do tipo senoidais para os eixos ortogonais “X” e “Y”. Um sistema gerador/controlador de tensão elétrica foi desenvolvido para este trabalho e seu *software* combina e controla as variáveis, frequência (Hz), amplitude (V), fase (rad) e *offset* (%) da equação senoidal de cada eixo. Este sistema foi construído para alimentar dois pares de eletroímãs geradores de campo magnético, cada par correspondente a seu respectivo eixo. Os eletroímãs, por sua vez, recebem do sistema a tensão elétrica adequada para produzirem campos magnéticos com valores específicos de densidade magnética (mT). Uma vez posicionados os eletroímãs em seus respectivos eixos ortogonais com referência à linha de centro vertical do arco elétrico, torna-se possível fazê-lo descrever os referidos movimentos de tecimento por meio do fluxo magnético que foi gerado e direcionado para arco. Com este equipamento atuou-se na soldagem de forma a defletir o arco elétrico seguindo formas de Figuras de Lissajous.

Com a utilização deste recurso/equipamento no processo, além de se promover a deflexão controlada do arco elétrico (difíceis de serem conseguidos manual ou mecanicamente), foi possível depositar metal de adição em locais específicos, modificar as características da distribuição térmica localizada na região da soldagem, contribuir para a formação de uma poça de fusão menos concentrada na região da solda e produzir cordões com potencial para superar obstáculos como desalinhamentos e afastamentos desiguais típicos da etapa conhecida como passe de raiz.

Anteriormente ao se realizar as soldagens em chanfro utilizando o processo GMAW pulsado, o sistema oscilador magnético que foi construído foi posto à prova em uma sequência de testes iniciais realizados com os processos GTAW autógeno e GMAW com transferência por curto circuito. Impondo-se movimentos de tecimento ao arco seguindo duas diferentes Figura de Lissajous, nas soldagens GTAW autógeno ficou claramente evidenciado a movimentação transversal e longitudinal da poça de fusão em função das características visuais e dimensionais dos cordões que foram produzidos. Nas soldagens GMAW por curto circuito tal movimentação não foi visualizada claramente. Contudo, por meio de registros termográficos obtidos na face oposta dos cordões de solda realizados sobre chapa, foi

possível registrar diferenças térmicas com maior ou menor concentração de calor entre cordões produzidos sem e com padrões de tecimento. Fato este que sugere que a oscilação magnética imposta ao processo interferiu na distribuição térmica da solda.

As soldagens no processo GMAW pulsado em peças chanfradas, foram produzidas aplicando-se tecimento seguindo quatro diferentes Figuras de Lissajous. As análises dos resultados se deram conforme características dimensionais dos respectivos cordões e sinais elétricos registrados em oscilogramas. Estes resultados mostraram que a aplicação da oscilação magnética controlada imposta ao arco foi capaz de produzir soldagens do passe de raiz em peças chanfradas posicionadas de topo e estas com afastamento médio de até 3,7 mm entre suas faces, sendo que, sem a aplicação da oscilação magnética a abertura média da raiz foi de 2,4 mm.

Adicionalmente, nesta tese foi estabelecido um conceito básico denominado “Taxa de variação da tensão elétrica” a qual demonstrou ser consequência do campo magnético aplicado no arco.

Palavras chave: Oscilação magnética, Figuras de Lissajous, passe de raiz, GMAW.

Abstract

The purpose of this work is to study the use of controlled magnetic oscillation of the electric arc according to complex geometric patterns applied to the GMAW process for root pass welding. These patterns were represented here by what is known as Figures of Lissajous. These one are parametric curves mathematically produced that can offer versatility for the creation of wetting movements similar to those practiced by experienced welders. These curves are basically produced by applying and controlling sine equations for the orthogonal axes "X" and "Y". An electrical voltage generator/controller system was developed for this work and its software combines and controls the variables, frequency (Hz), amplitude (V), phase (rad) and offset (%) of the sine equation of each axis. This system was built to feed two pairs of electromagnets magnetic field generators, each pair corresponding to its respective axis. The electromagnets, in turn, receive from the system the appropriate electrical voltage to produce magnetic fields with specific magnetic density (mT) values. Once the electromagnets are positioned on their respective orthogonal axes with reference to the vertical center line of the electric arc, it becomes possible to make weave movements through the magnetic flux that was generated and directed to the arc. With this equipment, the welding was performed in order to deflect the electric arc following the forms of Figures of Lissajous.

With this resource/equipment in the process, in addition to promoting controlled deflection of the electric arc (difficult to be achieved manually or mechanically), it was possible to deposit addition metal in specific locations, modify the characteristics of the thermal, distribution located in the welding region, contribute to the formation of a fusion pool less concentrated in the weld region and produce beads with potential to overcome obstacles such as misalignments and uneven clearances typical of the stage known as root pass.

Prior to the groove joints welding using the pulsed GMAW process, the magnetic oscillator system that was built was put to the test in a sequence of initial trials performed with the autogenous GTAW and GMAW processes with short circuit transfer. Imposing weave movements to the arc following two different Lissajous Figure in the autogenous GTAW welds was clearly evidenced transverse and longitudinal movements of the molten pool as a visual and dimensional characteristics of the beads that were produced. In short-circuited GMAW welds such movement was not clearly visualized. However, through thermographic records obtained on the opposite side of weld beads made on plate, it was possible to record thermal differences with higher or lower heat concentration between beads produced without and with weaving patterns. This fact suggests that the magnetic oscillation imposed on the process interfered in the thermal distribution of the weld.

The welds in the GMAW process pulsed in groove joints parts were produced by applying weave following four different Lissajous Figures. The results were analyzed according to dimensional characteristics of the respective beads and electrical signals recorded in oscillograms. These results showed that the application of the controlled magnetic oscillation imposed to the arc was able to produce root pass welds in flat positioned groove joints parts and these with an average clearance of the 3.7 mm between their faces, and without the application of the oscillation the average root opening was 2.4 mm.

Additionally, this Thesis established a basic concept called "Rate of variation of electrical voltage" which proved to be a consequence of the magnetic field applied in the arc.

Keyword: Magnetic oscillation, Lissajous Figures, root pass, GMAW.

A minha esposa Léia Miguel Neves pelo apoio e dedicação.

A meus pais, Oswaldo Juliani (in memoriam) e Maria José Brazão Juliani pela confiança.

A meus irmãos Sérgio Juliani e Sandra Juliani pelo incentivo.

*“...os navegadores devem sua reputação
aos temporais e tempestades...”*

Epicuro, Filósofo Grego

Agradecimentos

A Deus, a minha família, irmãos e amigos.

Ao Professor Alexandre Queiroz Bracarense pela oportunidade, dedicação, ensinamentos e paciência.

Aos Professores, Alberto Gontijo - ELETRÔNICA do COLTEC e Paulo José Modenesi – METALURGIA e MATERIAIS da UFMG, por serem muito mais que Professores.

Aos Professores, Matheus Pereira Porto – TERMOMETRIA, Elmo Salomão Alves – FÍSICA e Roberto Parreiras Tavares – METALURGIA e MATERIAS, todos da UFMG.

Ao Engenheiro André Martins Vaz – CONTROLE e AUTOMAÇÃO - UFMG.

Ao IFMG - Campus Congonhas pelo programa de apoio à qualificação do docente.

Aos amigos do LRSS pelo incentivo e colaborações.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Objetivo geral	3
1.2. Objetivo específico	3
2. Revisão bibliográfica	4
2.1. Aspectos operacionais e econômicos	4
2.2. Propostas comerciais para a soldagem do passe de raiz.	5
2.3. Oscilação mecânica como forma de tecimento	7
2.4. Oscilação magnética como forma de tecimento	12
2.4.1. Fundamentos	12
2.4.2. Histerese e saturação magnéticas	15
2.5. Direcionadores de fluxo magnético	16
2.6. Estudos sobre fluxo magnético direcionado para o arco elétrico	20
2.6.1. Aplicação prática da oscilação magnética controlada ao arco	31
2.7. Transferência metálica	36
2.8. Gás de proteção	41
2.9. Formação do metal de solda em função da oscilação magnética	42
3. Materiais e Equipamentos	45
3.1. Materiais	45
3.2. Equipamentos	45
3.2.1. Fontes para soldagem	45
3.2.2. Sistema para deslocamento da soldagem	47
3.2.3. Eletroímãs para a deflexão do arco de soldagem	48
3.2.4. Sistema oscilador magnético	48
3.2.5. Fonte variável e Teslâmetro	49
3.2.6. Osciloscópio	49
3.2.7. Filmadora Termográfica e Câmara escura	50
3.2.8. Filmadora para vídeos em alta velocidade	51
3.2.9. Sistema de aquisição de dados	51

4. Metodologia	52
4.1. Desenvolvimento do sistema para deflexão magnética do arco	52
4.1.1. Fonte de alimentação e controladores	52
4.1.2. Direcionadores de fluxo magnético	53
4.1.3. Calibração do sistema	54
4.2. Testes de soldagem em caráter exploratórios	55
4.2.1. Soldagem GTAW autógeno sobre chapa	55
4.2.2. Soldagem GMAW com transferência por curto circuito sobre chapa	56
4.2.3. Soldagem GMAW pulsada sobre chapa	59
4.3. Soldagem GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados	64
4.3.1. Preparação e montagem de corpos de prova chanfrados	64
4.3.2. Realização dos testes de soldagem	66
4.3.3. Avaliação dos cordões obtidos	69
5. Resultados e discussões	70
5.1. Desenvolvimento do sistema para deflexão magnética do arco	70
5.1.1. Fonte de alimentação e controladores	71
5.1.2. Direcionadores de fluxo magnético	73
5.1.3. Calibração do sistema	75
5.2. Testes de soldagem GTAW autógeno sobre chapa	78
5.3. Testes de soldagem GMAW com transferência por curto circuito sobre chapa	87
5.4. Testes de soldagem GMAW pulsado sobre chapa	97
5.4.1. Regularidade no padrão dos Sinais Elétricos	99
5.4.2. Imagens da deflexão do arco e transferência metálica sob influência da oscilação magnética controlada	105
5.4.3. Formato do cordão	114
5.5. Testes de soldagem GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados	128
5.5.1. Primeiro subgrupo de testes – Espessura dos corpos de prova e ângulo do chanfro	128
5.5.2. Segundo subgrupo de testes – Amplitudes de oscilação	141

5.5.3. Terceiro subgrupo de testes – Padrões de tecimento seguindo diferentes Figuras de Lissajous	150
6. Conclusões	193
7. Sugestões para trabalhos futuros	196
8. Bibliografia	198
9. Apêndice	206
9.1. Áreas de concentração de calor GMAW transferência por curto circuito sobre chapa	206
9.2. Exemplos de oscilogramas e fotos GMAW pulsado sobre chapa	219

Lista de Figuras

Figura 2.1: Manipuladores mecânicos com duas tochas para soldagem de tubulação. Fonte: [12]. Disponível em: < https://all.biz/uz-en/welding-head-of-p600-crc-evans-g83350 >	6
Figura 2.2: Fontes eletrônicas de soldagem. Fontes: Respectivos fabricantes,	6
Figura 2.3: Manipulador mecânico para o processo GTAW alimentado. Fonte: [8]. Disponível em: < https://www.polysoude.com/orbital-and-automated-welding/automated-welding/ >	7
Figura 2.4: Bocal e bico de contato adaptados para a soldagem do passe de raiz automatizado. Fonte: [22]	8
Figura 2.5: Preparação da união das faces dos tubos em junta tipo “U”. Fonte: [22]	8
Figura 2.6: Preparação da união das faces dos tubos em junta tipo “V”. Fonte: [22].....	8
Figura 2.7: Desenho ilustrativo da movimentação do robô. Fonte: [23].....	9
Figura 2.8: Cordões de solda executados na posição 5G. Fonte: [23]	10
Figura 2.9: Resultados do deslocamento pendular da tocha. Fonte: [25].....	11
Figura 2.10: Forma construtiva de um tipo de indutor eletromagnético (bobina)	13
Figura 2.11: Exemplo de uma bobina com núcleo ferromagnético	14
Figura 2.12: Formas construtivas dos direcionadores de fluxo magnético. Fonte: [31].....	17
Figura 2.13: Posicionamentos relativos entre os direcionadores de fluxo magnético. Fonte: [31]	17
Figura 2.14: Representação simplificada do melhor conjunto eletromagnético. Fonte: [31] .	18
Figura 2.15: Formato das pontas dos núcleos dos eletroímãs. Fonte: [32]	18
Figura 2.16: Dimensão da deflexão magnética do arco. Fonte: [32].....	19
Figura 2.17: Oscilograma da tensão em função deflexão do arco. Fonte: [34].....	22
Figura 2.18: Comparação entre resultados experimentais (soldagem TIG) e os previstos pelo modelo de Larquer. Fonte: [35].....	23
Figura 2.19: Dispositivo utilizado para promover a oscilação magnética do arco GTAW. Fonte: [36]	24
Figura 2.20: Modelo teórico proposto para a simulação do perfil térmico do arco. Fonte: [36]	25
Figura 2.21: Macrografias e medições comparativas do cordão de solda, sem oscilação do arco. Fonte: [36].....	27
Figura 2.22: Comparações dos cordões de solda, com oscilação do arco. Fonte: [36]	27
Figura 2.23: Vista superior de cordões de solda sem e com oscilação do arco. Comparação entre a simulação e cordão real. Fonte: [36]	28
Figura 2.24: Denominação da influência do campo magnético externo na soldagem GTAW. Fonte: [37]	29

Figura 2.25: Pressão do arco em função do campo magnético AMF com variação na frequência. Fonte: [37].....	30
Figura 2.26: Tipos de indutores eletromagnéticos encontrados comercialmente. Fonte: [20]	30
Figura 2.27: Esquema do defletor de arco proposto por Greene [38].....	31
Figura 2.28: Imagens das soldagens. Fonte: [39]	32
Figura 2.29: Cordões de solda sob influência da oscilação magnética. Fonte: [40].....	33
Figura 2.30: Efeito da solidificação acelerada da poça de fusão em soldagem a alta velocidade. Fonte: [42].....	34
Figura 2.31: Desenho simplificado do sistema oscilador magnético. Fonte: [42].....	34
Figura 2.32: Comportamento do arco, sem e com deflexão. Fonte: [42]	35
Figura 2.33: Resultado do cordão de solda em função da aplicação da oscilação magnética por baixo da chapa metálica. Fonte: [42]	35
Figura 2.34: Forças envolvidas na teoria da transferência metálica no processo GMAW. Fonte: [43]	37
Figura 2.35: Resultado da simulação das forças envolvidas na transferência metálica do processo GMAW. Fonte: [46].....	38
Figura 2.36: Dispositivo indutor de fluxo magnético proposto por Camargo et al. Fonte: [46]	39
Figura 2.37: Influência do campo magnético externo quanto à transferência metálica no processo GMAW com duplo arame. Fonte: [37].....	40
Figura 2.38: Estrutura granular de cordões produzidos com oscilação do arco em ligas de alumínio. Fonte: [51]	43
Figura 3.1: Fonte utilizada nas soldagens GTAW. Fonte: Fonte: www.graysonline.com , 2020	46
Figura 3.2: Conjunto, fonte e robô antropomórfico, marca MOTOMAN modelo SK6.....	46
Figura 3.3: Fonte e alimentador de arame utilizados nas soldagens GMAW pulsada	47
Figura 3.4: Sistema de deslocamento da tocha com velocidade constante.....	48
Figura 3.5: Indutores eletromagnéticos, bobinas 24V DC. Dimensões em milímetros.....	48
Figura 3.6: Teslâmetro e fonte de tensão variável	49
Figura 3.7: Osciloscópio TEKTRONIX modelo TPS 2024B. Fonte site tectronix.com , 2020.	49
Figura 3.8: Filmadora termográfica, câmara escura e janela termográfica	50
Figura 3.9: Câmera PHANTOM para filmagens de alta velocidade e lente macro INFINITY. Fonte: (a) site phantomhighspeed.com , disponível em: < https://elma-instruments.no/produkter/phantom-lab-310-2.aspx >, acessado em 23/11/2020 e (b) foto do produto tirada pelo próprio autor.....	51
Figura 3.10: Sistema de aquisição de dados	51

Figura 4.1: Diagrama do equipamento de oscilação magnética do arco	53
Figura 4.2: Bancada de testes para a medição da densidade de fluxo	54
Figura 4.3: Arranjo físico da bancada de testes para as soldagens GTAW	56
Figura 4.4: Termografias dentro do percurso diametral de 65mm, de nº12 até nº101.....	58
Figura 4.5: Arranjo físico da bancada de testes para as soldagens GMAW por curto circuito e filmagens termográficas abaixo das chapas	59
Figura 4.6: Figura de Lissajous em forma de meia elipse vertical (“Meia Lua”). Padrão de tecimento utilizado nos testes para selecionar uma das proteções gasosas, Ar-18%CO ₂ ou Ar-4%CO ₂	62
Figura 4.7: Montagem da bancada para as filmagens em alta velocidade dos testes GMAW pulsado.....	63
Figura 4.8: Características dos corpos de prova para os testes do passe de raiz simulando afastamento constante entre as faces.	65
Figura 4.9: Detalhe dos suportes travadores que foram soldados na face inferior dos corpos de prova. As setas indicam os pontos de solda	65
Figura 4.10: Características dos corpos de prova para os testes do passe de raiz simulando a abertura progressiva entre as faces.....	66
Figura 4.11: Montagem da bancada de testes para as soldagens GMAW pulsado.....	68
Figura 5.1: Equipamento controlador de fluxo magnético	71
Figura 5.2: Exemplo de Figuras de Lissajous. Fonte: modificado de: < https://benebellwen.files.wordpress.com/2017/09/table-of-lissajous-figures-source-steven-lehar.jpg >, acessado em 23/11/2020	72
Figura 5.3: Figura de Lissajous (aqui denominada “Deslocamento lateral”) obtida com aplicação de uma onda quadrada no eixo “X” e uma onda triangular no eixo “Y”.....	72
Figura 5.4: Osciloscópio e painel do equipamento oscilador.....	73
Figura 5.5: Bobinas e direcionador de fluxo magnético. Dimensões em “mm”	74
Figura 5.6: Suporte posicionador das bobinas	74
Figura 5.7: Exemplos de Figuras de Lissajous que foram geradas pela alimentação de tensão nas bobinas para promoverem a oscilação do arco	77
Figura 5.8: Exemplos de padrão de oscilação do arco, “Deslocamento lateral” (Figura de Lissajous mostrada na Figura 5.3).....	77
Figura 5.9: Cordões de solda obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de “meia lua” à direita.....	79
Figura 5.10: Penetrações dos cordões de solda obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de “meia lua” à direita	80
Figura 5.11: Cordões de soldagem obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de “círculo” anti-horário.....	81

Figura 5.12: Penetrações dos cordões de soldagem obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de “círculo” anti-horário	83
Figura 5.13: Cordões de soldagem obtidos com o processo GTAW autógeno com oscilação em padrão de “meia lua” à esquerda e à direita.....	84
Figura 5.14: Penetrações dos cordões de solda obtidos com o processo GTAW autógeno com oscilação em padrão de “meia lua” à direita e à esquerda	85
Figura 5.15: Cordão obtido com o processo GMAW com transferência por curto-circuito, sem a atuação da oscilação magnética	88
Figura 5.16: Cordão obtido com o processo GMAW com transferência por curto-circuito, com atuação da oscilação magnéticas seguindo Figura de Lissajous “Elipse”	89
Figura 5.17: Exemplo de imagens termográficas dentro do percurso diametral de 65mm, sem e com atuação da oscilação magnética	92
Figura 5.18: Simulação das trajetórias de soldagem seguindo padrões de oscilação somadas à velocidade de deslocamento e frequência	94
Figura 5.19: Comparação entre frequências para oscilação em forma de Elipse	95
Figura 5.20: Exemplo de imagens termográficas das áreas com maior concentração de calor na soldagem GMAW com transferência por curto circuito, sem e com atuação da oscilação magnética	96
Figura 5.21: Medição do comprimento do arco, sem e com oscilação magnética imposta ao arco com gás 4%CO ₂ e frequência 0,5 Hz.....	99
Figura 5.22: Oscilogramas de tensão de testes com Ar-18%CO ₂	103
Figura 5.23: Parte dos oscilogramas de tensão e da alimentação da bobina de oscilação transversal do arco em um teste usando Ar-4%CO ₂ e Bx = 6 mT	104
Figura 5.24: Detalhe da Figura 5.23 mostrando a variação da tensão de soldagem após a reabertura do arco e imediatamente antes de sua extinção. Testes com Ar-4%CO ₂ e campo magnético da bobina de oscilação transversal (Bx = 6 mT)	104
Figura 5.25: Imagens mostrando o formato do arco nos períodos de pico e de base	105
Figura 5.26: Sequência de imagens de uma filmagem de alta velocidade mostrando a extinção do arco durante o período de base	106
Figura 5.27: Sequência de imagens de uma filmagem de alta velocidade mostrando a extinção do arco durante o período de base	107
Figura 5.28: Cálculo de “ β ” (Taxa de crescimento da tensão elétrica do arco) para o processo GMAW goticular pulsado. Gás de proteção 18%CO ₂	109
Figura 5.29: Localização, no oscilograma, das interrupções do arco ao longo da trajetória de deflexão	110
Figura 5.30: Transferência metálica na soldagem GMAW pulsada com deflexão do arco por oscilação magnética controlada do arco	113

Figura 5.31: Cordão produzido sem imposição de oscilação magnética. Parâmetros de soldagem conforme Tabela 5.6, Ar-4%CO ₂ – 85 A	114
Figura 5.32: Cordões produzidos sem imposição de oscilação magnética. (a) no processo GTAW autógeno (b) GMAW transferência por curto circuito e (c) GMAW pulsado	114
Figura 5.33: Comparação entre cordões produzidos nos processos GTAW autógeno, GMAW com transferência por curto circuito e GMAW pulsado.....	115
Figura 5.34: Macrografias de seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (f) da Tabela 5.8.....	117
Figura 5.35: Cordão produzido seguindo Figura de Lissajous, condição (e) da Tabela 5.8	118
Figura 5.36: Macrografias de seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (e) da Tabela 5.8.....	120
Figura 5.37: Cordão obtidos com GMAW pulsada conforme condição (g) da Tabela 5.8 e parâmetro de soldagem da Tabela 5.6, Ar-4%CO ₂ – 85 A.....	121
Figura 5.38: Cordões de solda obtidos nos processos GTAW autógeno e GMAW pulsado	123
Figura 5.39: Cordão de solda sobre chapa obtido com GMAW pulsada. Figura de Lissajous “Meia Lua”, condição (d) Tabela 5.8	124
Figura 5.40: Macrografias de seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (d) da Tabela 5.8.....	127
Figura 5.41: Corpos de prova chanfrados, bisel de 30°±1°, soldagem com oscilação, espessura 12,0±0,5 mm	129
Figura 5.42: Corpos de prova chanfrados, bisel de 30°±1°, soldagem com oscilação, espessura 16,0±0,5 mm	130
Figura 5.43: Oscilogramas de tensão e corrente. Soldagem em chanfro de 30°±1°, com oscilação “meia lua”, afastamento constante de 2,0+0,5 mm entre as faces, espessura 12,0±0,5 mm.....	131
Figura 5.44: Oscilogramas da Tensão (V) para os trechos próximos de 24 e 25 segundos e próximos de 28,5 e 29,5 segundos	132
Figura 5.45: Tensão elétrica aplicada nos eletroímãs no trecho de soldagem entre aproximadamente 24 e 25 segundos	133
Figura 5.46: Tensão elétrica aplicada nos eletroímãs no trecho de soldagem entre 28,5 e 29,5 segundos.....	133
Figura 5.47: Localização dos curtos circuitos ao longo da trajetória de oscilação do arco .	134
Figura 5.48: Encurtamento do comprimento do arco para chanfros com biseis de 30°±1° .	135
Figura 5.49: Relação trigonométrica existente entre a parede do bisel com 30°±1° e o centro do arame eletrodo.....	136
Figura 5.50: Separação dos triângulos da relação trigonométrica. Parede do bisel com 30°±1°	136

Figura 5.51: Determinação da distância calculada “C” para o comprimento do arco em função da deflexão lateral e proximidade da parede do bisel com $30^{\circ}\pm 1^{\circ}$	136
Figura 5.52: Simulação do comportamento das variações dimensionais do arco e formação da poça de fusão ao longo da soldagem. Parede do bisel com $30^{\circ}\pm 1^{\circ}$	137
Figura 5.53: Simulação da formação da poça de fusão no chanfro.....	138
Figura 5.54: Encurtamento do comprimento do arco para chanfros com biseis de $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$.	139
Figura 5.55: Relação trigonométrica existente entre a parede do bisel com $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$ e o centro do arame eletrodo.....	139
Figura 5.56: Separação dos triângulos da relação trigonométrica. Parede do bisel com $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$	139
Figura 5.57: Determinação da distância calculada “C” para o comprimento do arco em função da deflexão lateral e proximidade da parede do bisel com $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$	140
Figura 5.58: Simulação do comportamento das variações dimensionais do arco e formação da poça de fusão ao longo da soldagem. Parede do bisel com $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$	140
Figura 5.59: Oscilogramas de tensão e corrente. Soldagem em chanfro de $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$, com oscilação “meia lua”, afastamento constante de 2,0+0,5 mm entre as faces, espessura 12,0±0,5 mm.....	141
Figura 5.60: Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$, Bx=10 mT e By=5,6 mT	143
Figura 5.61: Detalhes ampliados da Figura 5.60. Variação da penetração da raiz no verso da chapa. Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$, Bx=10 mT e By=5,6 mT	144
Figura 5.62: Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$, Bx=13 mT e By=7,9 mT	145
Figura 5.63: Detalhes da variação da penetração da raiz no verso da chapa. Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$, Bx=13 mT e By=7,9 mT	146
Figura 5.64: Vista da raiz no verso da chapa. Raiz furada e “uma nova interrupção no processo”. Padrão “Meia Lua”, Bx=13 mT e By=7,9 mT	147
Figura 5.65: Soldagem com padrão de oscilação “Deslocamento Lateral” em chanfro com bisel $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$, Bx=10 mT e By=5,6 mT	148
Figura 5.66: Ilustração das localizações das seções transversais para medições	150
Figura 5.67: Ilustração das localizações das seções transversais para medições das penetrações.....	151
Figura 5.68: Soldagem em chanfro de $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$ com afastamento progressivo, sem oscilação do arco	153
Figura 5.69: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$, sem oscilação.....	153

Figura 5.70: Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco em forma de Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	155
Figura 5.71: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	155
Figura 5.72: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	156
Figura 5.73: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.72	157
Figura 5.74: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	158
Figura 5.75: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação em forma de Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s	159
Figura 5.76: Soldagem em chanfro de 45° com afastamento progressivo. Padrão de tecimento “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	161
Figura 5.77: Detalhes da face oposta da chapa da Figura 5.76. Visualização da variação da altura da raiz.....	162
Figura 5.78: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	162
Figura 5.79: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	164
Figura 5.80: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.79	165
Figura 5.81: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	166
Figura 5.82: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação padrão “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s	167
Figura 5.83: Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo. Padrão de tecimento em forma de Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	169
Figura 5.84: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT.....	169
Figura 5.85: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	171
Figura 5.86: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.85	172

Figura 5.87: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento em forma de Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT.....	173
Figura 5.88: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação em forma de Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s	174
Figura 5.89: Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo. Padrão de tecimento “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	176
Figura 5.90: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	176
Figura 5.91: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT	178
Figura 5.92: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.91	179
Figura 5.93: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento em forma de “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT.....	180
Figura 5.94: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação padrão em forma de “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s	181
Figura 5.95: Desenho da montagem dos corpos de prova simulando as soldagens realizadas com oscilação do arco em forma de “Meia Lua” para trás.....	184
Figura 5.96: Montagem dos corpos de prova simulando os ensaios de soldagem aplicando-se oscilação com padrão circular de tecimento	185
Figura 5.97: Gotas de metal de adição que foram lançadas através da fresta de corpos de prova	186
Figura 5.98: Base de apoio para as soldagens com oscilação para trás do sentido da soldagem	186
Figura 5.99: Determinação dos Perímetros adimensionais proporcionais, em função do padrão de tecimento	192
Figura 7.1: Proposta para aplicação do tecimento conforme Figuras de Lissajous para ser aplicado em soldagens de tubulação na posição 5G	197
Figura 9.1: Exemplo da ferramenta do Excel para formatação condicional	207
Figura 9.2: Exemplo da obtenção do maior valor conforme a ferramenta estatística do Excel	208
Figura 9.3: Imagens termográficas n° 35 e n° 40	213
Figura 9.4: Imagens termográficas n° 45, n° 50 e n° 55.....	214
Figura 9.5: Imagem termográfica n° 60.....	215

Figura 9.6: Imagem termográfica n° 65.....	215
Figura 9.7: Imagem termográfica n° 70.....	216
Figura 9.8: Imagem termográfica n° 75.....	216
Figura 9.9: Imagem termográfica n° 80.....	217
Figura 9.10: Imagem termográfica n° 85.....	217
Figura 9.11: Imagem termográfica n° 90.....	218
Figura 9.12: Gás 18%CO ₂ . Sem oscilação.....	219
Figura 9.13: Gás 4%CO ₂ – 55A. Sem oscilação	220
Figura 9.14: Gás 4%CO ₂ – 65A. Sem oscilação	221
Figura 9.15: Gás 4%CO ₂ – 85A. Sem oscilação	222
Figura 9.16: Gás 18%CO ₂ – Bx=2,8 mT. Uma bobina	223
Figura 9.17: Gás 4%CO ₂ – 55A – Bx=2,8 mT. Uma bobina	224
Figura 9.18: Gás 4%CO ₂ – 55A – Bx=10 mT. Duas bobinas.....	225
Figura 9.19: Gás 4%CO ₂ – 65A – Bx=10 mT. Duas bobinas.....	226
Figura 9.20: Gás 4%CO ₂ – 85A – Bx=10 mT. Duas bobinas.....	227
Figura 9.21: Soldagens GMAW pulsada. Sem oscilação do arco	228
Figura 9.22: Soldagens GMAW pulsada. Com oscilação do arco Bx=2,8 mT	229
Figura 9.23: Soldagens GMAW pulsada. Com oscilação do arco Bx=10 mT	230

Lista de Gráficos

Gráfico 2.1: Deflexão do arco x densidade de fluxo magnético aplicado no arco. Fonte: [34]	21
Gráfico 2.2: Característica do perfil térmico do cordão de solda, sem oscilação do arco. Fonte: [36]	26
Gráfico 2.3: Características do perfil térmico do cordão de solda, com oscilação lateral do arco. Fonte: [36]	26
Gráfico 5.1: Medições das densidades de fluxo magnético produzidos pelos eletroímãs com apenas uma bobina em operação	76
Gráfico 5.2: Medições das densidades de fluxo magnético produzidos pelos eletroímãs com duas bobinas em operação	76
Gráfico 5.3: Médias das temperaturas em função do tipo de oscilação. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão	92
Gráfico 5.4: Médias das áreas com maior concentração de calor. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão	97
Gráfico 5.5: Frequência de apagamento do arco obtida para as condições testadas. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão	102
Gráfico 5.6: Taxa média de crescimento da tensão entre uma reignição do arco e a sua próxima extinção em função da intensidade do campo magnético	111
Gráfico 5.7: Gráfico resumo dos “ β ” para tecimento em forma de Lemniscata, “Meia Lua”, Elipse e “Deslocamento Lateral”	183
Gráfico 5.8: Abertura da raiz em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão	188
Gráfico 5.9: Comprimento do cordão em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão	188
Gráfico 5.10: Área do metal de solda em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão	189
Gráfico 5.11: Penetração do metal de solda em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão	190
Gráfico 5.12: Perímetros adimensionais proporcionais, em função do padrão de tecimento	191

Lista de Tabelas

Tabela 5.1: Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento para a oscilação do arco na soldagem GTAW autógena.....	78
Tabela 5.2: Medições dos cordões que foram feitos na soldagem GTAW autógena com e sem a aplicação de diferentes padrões de oscilação ao processo.....	86
Tabela 5.3: Figura de Lissajous aplicada como forma de tecimento nos testes com o processo GMAW com transferência por curto-circuito.....	87
Tabela 5.4: Medições realizadas nos cordões da soldagem GMAW com transferência por curto circuito sem e com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Elipse” ..	88
Tabela 5.5: Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento nos testes com GMAW com transferência por curto-circuito, velocidades de soldagem de 4,8 mm/s.....	91
Tabela 5.6: Parâmetros propostos para os testes de soldagem GMAW pulsado que objetivaram a seleção do gás de proteção.....	100
Tabela 5.7: Parâmetros medidos dos testes feitos sem oscilação magnética do arco	101
Tabela 5.8: Características das Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento nos testes sobre chapa com soldagem GMAW pulsada.....	116
Tabela 5.9: Medições das macrografias referente às seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (f) da Tabela 5.8.....	118
Tabela 5.10: Medições realizadas nos cordões da soldagem GMAW pulsada sem e com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Círculo”	119
Tabela 5.11: Medições das macrografias referente às seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (e) da Tabela 5.8.....	120
Tabela 5.12: Medições realizadas nos cordões da soldagem GMAW pulsada com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Deslocamento Lateral”.....	122
Tabela 5.13: Medições realizadas nos cordões das soldagens GTAW autógena e GMAW pulsada com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Meia Lua”.....	123
Tabela 5.14: Tabela comparativa dos cordões feitos nas condições (c) e (d) da Tabela 5.8	126
Tabela 5.15: Medições das macrografias referente às seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (d) da Tabela 5.8.....	127
Tabela 5.16: Parâmetros de oscilação utilizados nos ensaios exploratórios das soldagens GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados.....	129
Tabela 5.17: Resultados e médias dos comprimentos de soldagem e preenchimento de abertura da raiz alcançados no segundo subgrupo de testes	149

Tabela 5.18: Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento nos testes finais das soldagens GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados	152
Tabela 5.19: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, sem oscilação do arco	154
Tabela 5.20: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Lemniscata.....	154
Tabela 5.21: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.75	160
Tabela 5.22: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Meia Lua	163
Tabela 5.23: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.82	168
Tabela 5.24: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Elipse	170
Tabela 5.25: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.88	175
Tabela 5.26: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Deslocamento Lateral	177
Tabela 5.27: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.94	182
Tabela 5.28: Resultados e médias dos comprimentos de cordões e preenchimento de abertura da raiz alcançados no terceiro subgrupo de testes	187
Tabela 9.1: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem sem oscilação magnética	209
Tabela 9.2: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem com oscilação magnética padrão Lemniscata com frequência 0,4 Hz	210
Tabela 9.3: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem com oscilação magnética padrão Elipse com frequência 0,4 Hz	211
Tabela 9.4: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem com oscilação magnética padrão Elipse com frequência 1,0 Hz	212
Tabela 9.5: Áreas a cada 5 imagens termográficas dentre as 90 termografias dos padrões de oscilação que foram ensaiados.....	218

Lista de Símbolos e Abreviaturas

GMAW	.....	Gas Metal Arc Welding
GTAW	.....	Gas Tungsten Arc Welding
SAW	.....	Submerged Arc Welding
SMAW	.....	Shielded Metal Arc Welding
FCAW	.....	Flux Cored Arc Welding
Z.T.A.	.....	Zona termicamente afetada
F	.....	Força magnética resultante, que atua dentro do campo magnético [N]
q	.....	Carga de uma partícula eletrizada [Coulomb]
v	.....	Velocidade da partícula [m/s]
B	.....	Campo magnético [Tesla ou Gauss]
Sen	.....	Seno do ângulo
q ₀	.....	Carga de uma partícula eletrizada (em módulo) [Coulomb]
E	.....	Campo elétrico [N/Coulomb]
μ	.....	Permeabilidade magnética do metal [Tesla * m / A]
N	.....	Número de espiras contidas no comprimento "L"
i	.....	Corrente elétrica [A]
L	.....	Comprimento do solenoide (bobina) [m]
R	.....	Raio da bobina [m]
S	.....	Área do núcleo da bobina [m ²]
Θ	.....	Fluxo magnético [Maxwell]; sendo 1 Maxwell = 1,0x10 ⁻⁸ T.m ²

D.B.C.P.	.....Distância do bico de contato à peça [mm]
U	.....Tensão elétrica [V]
<i>La</i>	.....Comprimento do arco elétrico [mm]
β	.....Taxa de crescimento da tensão elétrica em função do tempo [V/s]
C.C.C	.....Curto circuito com controle de corrente, ou também conhecido como curto circuito controlado
C.S.C	.....<i>Controlled short circuit</i> , ou no idioma português C.C.C
C.M.T	... <i>Cold metal transfer</i> , ou do idioma português Transferência de metal “frio”
S.T.T	.....<i>Surface Tension Transfer</i> , ou no idioma português Transferência devido à tensão superficial
R.M.D	.....<i>Regulated Metal Deposition</i> , ou no idioma português Deposição regulada de metal ou também Transferência controlada de metal

1. Introdução

Registros apontam para a patente de Benardos e Olszewski [1], como sendo os primeiros a promover a fusão de metais utilizando o arco elétrico. Tanto as instituições de pesquisas como indústrias estudam e desenvolvem sistemas capazes de produzir soldas por fusão de forma eficiente, segura e reproduzível. Além da rapidez produtiva e confiabilidade, quando bem executada, a soldagem é capaz de simplificar muitos processos, principalmente aqueles que dizem respeito a montagens.

A soldagem GMAW caracteriza-se por oferecer alta produtividade e também por ser de fácil automatização. Com este argumento, a indústria procura, continuamente, recursos para utilizá-la nas mais variadas necessidades.

Em soldas realizadas em chanfro, o primeiro passe, que é o de raiz, apresenta várias dificuldades como: irregularidades no alinhamento das faces do chanfro, distorções e variações dimensionais entre as peças, acesso limitado quando feito em chanfro profundo, baixa visibilidade, enfim, fatores que podem ser a razão para que um cordão seja mal executado e/ou não atenda as exigências requeridas para a aceitação da junta. Tais irregularidades tornam esta etapa uma das mais difíceis e trabalhosa [18-19].

Na soldagem a arco elétrico, este atua como uma fonte concentrada de energia capaz de fundir localmente as peças sendo unidas criando e mantendo uma poça de fusão responsável pela formação do cordão de solda. Se a energia não for corretamente controlada, pode resultar em consequências indesejáveis, como por exemplo, a perfuração da raiz da junta ou a degradação das propriedades. Para superar alguns destes problemas é comum que soldadores e/ou equipamentos executem movimentos característicos e repetitivos durante as atividades produtivas. Tais movimentos são conhecidos como tecimento. Esse termo usado na soldagem, basicamente refere-se a movimentar o eletrodo seguindo diferentes padrões durante a realização de um cordão. Tecimento é uma técnica que permite, entre outros resultados, uma maior distribuição do calor gerado pelo arco elétrico e como isso, uma melhor fusão das laterais da junta, a distribuição desejada de metal de solda no cordão, preenchimento de aberturas na junta, além do controle da poça de fusão na soldagem fora de posição [2-4]. Por outro lado, por resultar em geral em um aumento do aporte térmico na região da solda, deve ser controlado com rigor na soldagem de certos metais, como por exemplo, alguns aços ligados [5-7].

Em processos manuais, diferentes padrões de tecimento podem ser usados visando obter resultados específicos. Nesse caso, o próprio soldador aplica esta técnica na soldagem

sendo que, frequentemente, sua habilidade e experiência definem o padrão a ser empregado. Por outro lado, falta de ergonomia, fadiga e periculosidade do serviço, baixa produtividade, repetitividade e a decrescente disponibilidade de soldadores qualificados, particularmente nos países desenvolvidos, contribuem para o aumento expressivo de operações de soldagem mecanizadas ou automáticas.

Em processos mecanizados ou, até então o que se conhece como automáticos, a realização de tecimento durante a soldagem utilizam dispositivos ou equipamentos que permitem movimentar a tocha na direção transversal ao sentido de soldagem. Estes também, em alguns casos, oferecem movimentos na direção longitudinal do cordão [8-12] e até podem produzir formas circulares [13]. Tais recursos podem ou não ser controlados computacionalmente no que se refere a parâmetros de soldagem ou características das movimentações, tais como, frequência, amplitude e outras mais.

Empregar a oscilação magnética controlada ao arco pode ser uma solução com potencial para superar limitações como as existentes em sistemas mecânicos (movimentações ortogonais) ou mão de obra qualificada (alto custo, baixa produtividade, entre outras) para executar o tecimento na soldagem.

Realizar o tecimento por meios magnéticos, basicamente é defletir o arco utilizando um campo magnético. Algo semelhante à realização controlada de um sopro magnético, ou seja, na presença de um campo magnético, o arco é defletido na direção perpendicular ao plano formado pela corrente elétrica do arco e a indução magnética. Assim, para acontecer a deflexão lateral do arco, um campo magnético deve ser aplicado na direção de soldagem e, para deflexões longitudinais (para frente e para trás), um campo magnético deve atuar transversalmente à direção de soldagem [14-16]. No mercado, existem dispositivos eletroeletrônicos que, por meio de fluxo magnético, promovem a deflexão do arco ortogonalmente à soldagem e até em trajetórias circulares, porém, executar movimentos de tecimento conforme as Figuras de Lissajous¹ até então não foi encontrado.

A motivação deste trabalho foi oferecer maiores recursos quanto à utilização da oscilação magnética controlada do arco afim de melhorar os processos de soldagem a arco com proteção gasosa. Para tanto, um sistema capaz de produzir padrões de tecimento complexos por meios de fluxo magnético direcionado necessitou ser desenvolvido e utilizado especificamente para este trabalho. Foi por meio deste equipamento que se promoveu a atuação do fluxo magnético direcionado para o arco elétrico. O sistema utiliza dois eletroímãs dispostos nas direções transversal e longitudinal ao sentido de soldagem, os quais podem ser alimentados por tensões com diferentes padrões de onda. Tais padrões são sincronizados e capazes de gerar indução magnética direcionada ao arco conforme diferentes Figuras de

1 - LISSAJOUS J. A., Físico Francês. Entre algumas inovações, Lissajous inventou o aparelho de Lissajous, um dispositivo que cria figuras harmônicas (que levam seu nome). Basicamente é o gráfico de um sistema paramétrico de equações. Versailles, 1880

Lissajous. Estas figuras, são curvas paramétricas produzidas matematicamente e semelhantes aos movimentos de tecimento produzidos por soldadores.

O objetivo deste trabalho foi aplicar a automatização da deflexão controlada do arco elétrico por meio de oscilação magnética externa para formar as Figuras de Lissajous e assim conseguir boa regularidade quanto à distribuição de calor, realizar deposição localizada de metal de adição e padronizar o movimento de tecimento durante as soldagens GTAW autógena, GMAW com transferência por curto circuito e GMAW pulsada, oferecendo assim recursos adicionais para o êxito na produção de cordões de solda e, por consequência, para realização do passe de raiz.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a aplicabilidade da deflexão magnética, seguindo Figuras de Lissajous. Com esta técnica de tecimento aplicada ao processo GMAW, objetivou-se estudar seus efeitos em características operacionais e na formação de cordões de solda pensando na realização do passe de raiz em peças chanfradas.

1.2. Objetivo específico

- Estudar a influência da oscilação magnética imposta ao arco elétrico do processo GMAW operando com diferentes modos de transferência.

- Estudar a aplicação da oscilação magnética do arco ao se executar movimentos de tecimento seguindo Figuras de Lissajous na realização do passe de raiz na posição plana de forma a simular o afastamento excessivo quanto ao posicionamento de juntas de topo.

2. Revisão bibliográfica

A soldagem GMAW é bastante versátil e produtiva e, frequentemente, aprimoramentos são introduzidos ao processo. Muito se deve ao fato da evolução contínua das máquinas, equipamentos e insumos que, em um passado recente, não eram acessíveis economicamente ou não ofereciam uma solução suficientemente robusta para serem aplicadas nas mais variadas necessidades industriais.

Tendo em vista que, um dos objetivos desta tese é apresentar uma solução em potencial para a soldagem do passe de raiz, o uso das Figuras de Lissajous como forma de tecimento foi a técnica empregada para se promover movimentos similares aos que soldadores executam [2-4]. Normalmente, as Figuras de Lissajous são utilizadas como recurso na manutenção, reparação e ajuste de equipamentos eletrônicos. Com estas Figuras é possível visualizar as grandezas que variam com o tempo em circuitos eletrônicos e em casos específicos de medida de frequências, amplitudes e fases. Mais do que isso, também podem ser usadas com outras finalidades, inclusive na geração de efeitos em editores de imagens para a Internet e recursos multimídia [64]. Contudo, nesta tese, este recurso buscou oferecer maior controle quanto à movimentação do arco elétrico, distribuição do calor na região da poça de fusão e também ao seu entorno. Com isso entendeu-se ser possível realizar soldas de uma forma menos subjetiva comparativamente ao que soldadores aplicam na prática.

Neste contexto, alguns importantes trabalhos a respeito dos assuntos que envolvem equipamentos utilizados e efeitos magnéticos atuantes no arco durante a execução da solda são relatados a seguir.

2.1. Aspectos operacionais e econômicos

De uma forma geral, defeitos, discontinuidades e dificuldades operacionais mais comuns na soldagem, são: falta de penetração, falta de fusão, acúmulo de massa seja na região superior ou inferior do cordão, deformidades devido a efeitos térmico na lateral dos cordões (mordeduras), inclusão de escórias, porosidade, excesso de tensão residual, enfim, tudo isso devido a fatores como má acomodação entre as faces das peças antes da soldagem, imperícia do soldador, parâmetros de soldagem inadequados, equipamentos pouco eficientes ou que apresentam alguma limitação para o uso, preparação inadequada de chanfros, posição de soldagem, entre outros.

Empresas ligadas ao ramo da soldagem convivem, a décadas, com problemas não apenas de processo, mas também no que diz respeito à insumos, produtividade, qualidade e utilização de mão de obra qualificada, cara e escassa [18]. Há, portanto, necessidade contínua de desenvolver diferentes soluções para cada processo.

Como um exemplo, cita-se a utilização do eletrodo revestido (SMAW) que, é versátil e de fácil mobilidade. Suas principais vantagens são, possibilitar a soldagem em qualquer posição e ser de baixo custo quanto aos insumos consumíveis, porém, é de baixa produtividade e depende de mão de obra cara e qualificada [18].

Outros processos como GTAW e FCAW também podem ser empregados, cada qual com suas particularidades benéficas e limitações podendo ser automatizados ou não.

Vários outros autores, publicam seus trabalhos e experiências práticas sobre fatores produtivos a respeito de soldagens, sejam em tubulação ou não. Uma variável comum é a busca por baixo custo e produtividade sendo que tudo começa com o passe de raiz, pois, se não for bem executado, compromete boa parte dos recursos investidos em uma obra [19]. Por estes e outros motivos é que empresas ligadas ao ramo da soldagem buscam cada vez mais, soluções voltadas para a automatização do processo.

2.2. Propostas comerciais para a soldagem do passe de raiz.

A soldagem em tubulações é uma atividade industrial que, continuamente apresenta necessidade de aprimoramentos tecnológico por se tratar de difícil execução e alta demanda de serviços. Empresas como POLYSOUDE [8], SERIMAX [9], LINCOLN ELECTRIC [10], HAN GIL [11], CRC EVANS [12], AP AUTOMATION [20], MAGNATECH [21] e outras, possuem equipamentos mecanizados ou automatizados que, em geral, atendem a estas demandas. As soluções oferecidas por estas empresas, basicamente utilizam manipuladores mecânicos que conduzem uma tocha de soldagem (ou até mais de uma) ao longo do percurso, com ou sem o recurso de movimentá-la transversal ou longitudinalmente ao sentido de soldagem como forma de tecimento do cordão. Ao se aplicar a soldagem GMAW mecanizada ou automática é mais comum realizar o tecimento usando tais dispositivos mecânicos [8-12 e 20-21]. A Figura 2.1 são fotos que ilustram este tipo de equipamento.

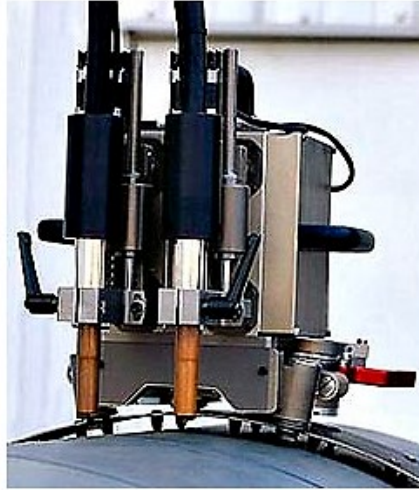
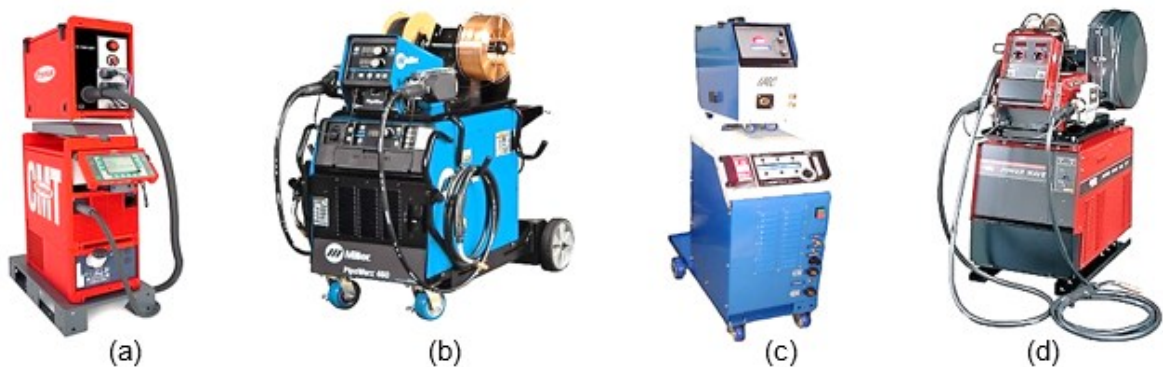


Figura 2.1: Manipuladores mecânicos com duas tochas para soldagem de tubulação. Fonte: [12]. Disponível em: <<https://all.biz/uz-en/welding-head-of-p600-crc-evans-g83350>>

Manipuladores como estes, em conjunto com fontes eletrônicas de soldagem GMAW que controlam a intensidade de energia fornecida, frequência de transferência metálica (taxa de curto circuito) e, que também oferecem a possibilidade de trabalhar no modo normal ou pulsado, com curto circuito com controle de corrente (*Controlled Short Circuit*), Figura 2.2, possibilitam soluções para muitas necessidades em um processo de soldagem. Nesta mesma linha descritiva podem ser incluídos os processos GTAW com alimentação automática de arame, Figura 2.3.



(a) CMT- *Cold Metal Transfer* (Fronius), (b) RMD- *Regulated Metal Deposition* (Miller), (c) *Controlled Short Circuit* “CSC”, também conhecido como “CCC” (IMC), (d) *Surface Tension Transfer* “STT” (Lincoln)

Figura 2.2: Fontes eletrônicas de soldagem. Fontes: Respetivos fabricantes, www.fronius.com, www.millerwelds.com, www.imc-soldagem.com.br, www.lincolnelectric.com

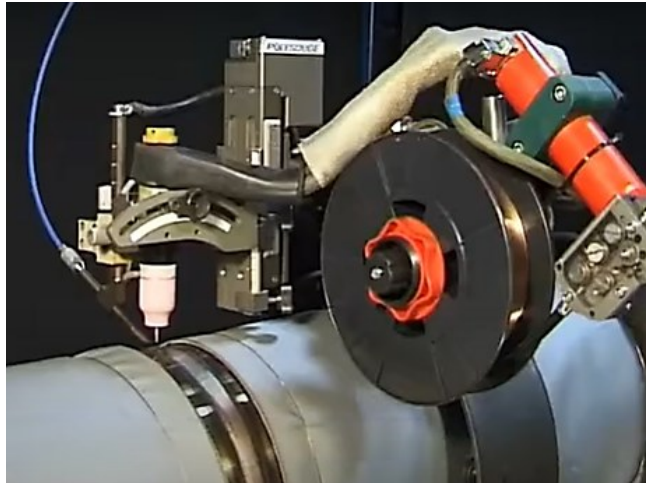


Figura 2.3: Manipulador mecânico para o processo GTAW alimentado. Fonte: [8]. Disponível em: <<https://www.polysoude.com/orbital-and-automated-welding/automated-welding/>>

Como alternativa para aprimorar as soldagens, utilizar a tecnologia de fluxo magnético controlado pode ser uma boa solução com a finalidade de promover movimentos complexos de tecimento durante o processo.

2.3. Oscilação mecânica como forma de tecimento

Utilizar uma fonte C.C.C. com um manipulador automático que oscila a tocha lateralmente durante o percurso da soldagem necessitou, por exemplo, sincronizar da melhor forma possível, os pulsos de corrente para que os curtos circuitos ocorressem nas laterais do chanfro. Isso foi realizado por Sartori [22], em condições laboratoriais quase ideais em soldagens do passe de raiz de tubulações na posição 5G. Mesmo munido com recursos “adequados”, os melhores resultados alcançados necessitaram de algumas adaptações, como por exemplo, utilizar um bocal com diâmetro e comprimento específicos, alongar o bico de contato conforme é mostrado na Figura 2.4 e, usinar as faces dos tubos para formarem chanfro em “U” ou em “V” conforme são mostrados nas, Figura 2.5 e Figura 2.6.

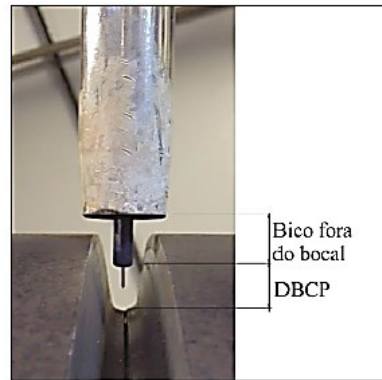


Figura 2.4: Bocal e bico de contato adaptados para a soldagem do passe de raiz automatizado. Fonte: [22]

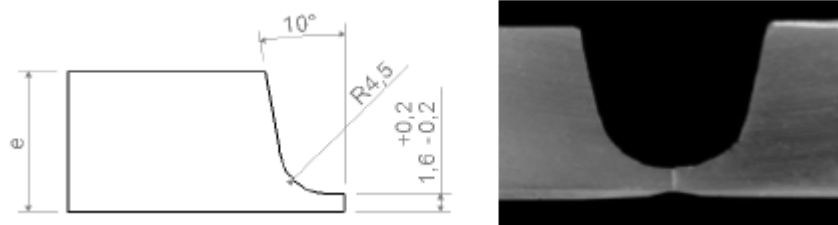


Figura 2.5: Preparação da união das faces dos tubos em junta tipo “U”. Fonte: [22]

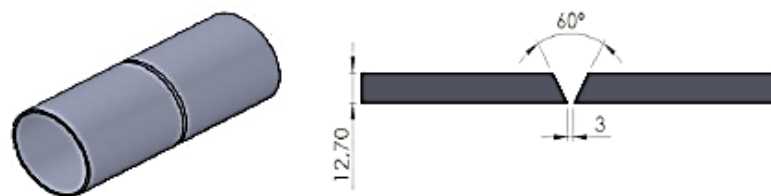
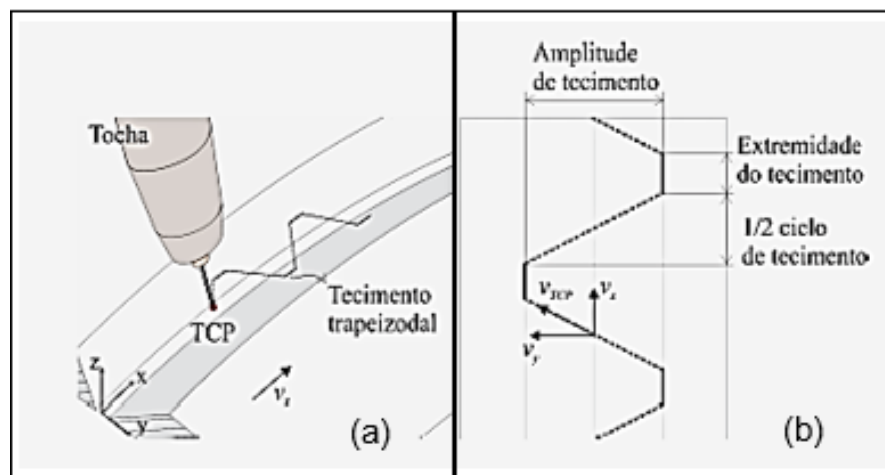


Figura 2.6: Preparação da união das faces dos tubos em junta tipo “V”. Fonte: [22]

Vários outros fatores se apresentaram como complicadores do processo, tais como: controlar a frequência, amplitude, padrão de movimentação da tocha, velocidade e parâmetros de soldagem adequados em função da posição relativa no tubo (são elas, plana, vertical ascendente ou descendente e sobre cabeça) e, afastamento entre as faces, o que provavelmente tornou esta atividade em uma tarefa difícil, trabalhosa e demorada.

Kindermann [23] desenvolveu e utilizou um sistema computacional adaptativo de mapeamento que consiste em um software que administra um banco de dados (elaborado

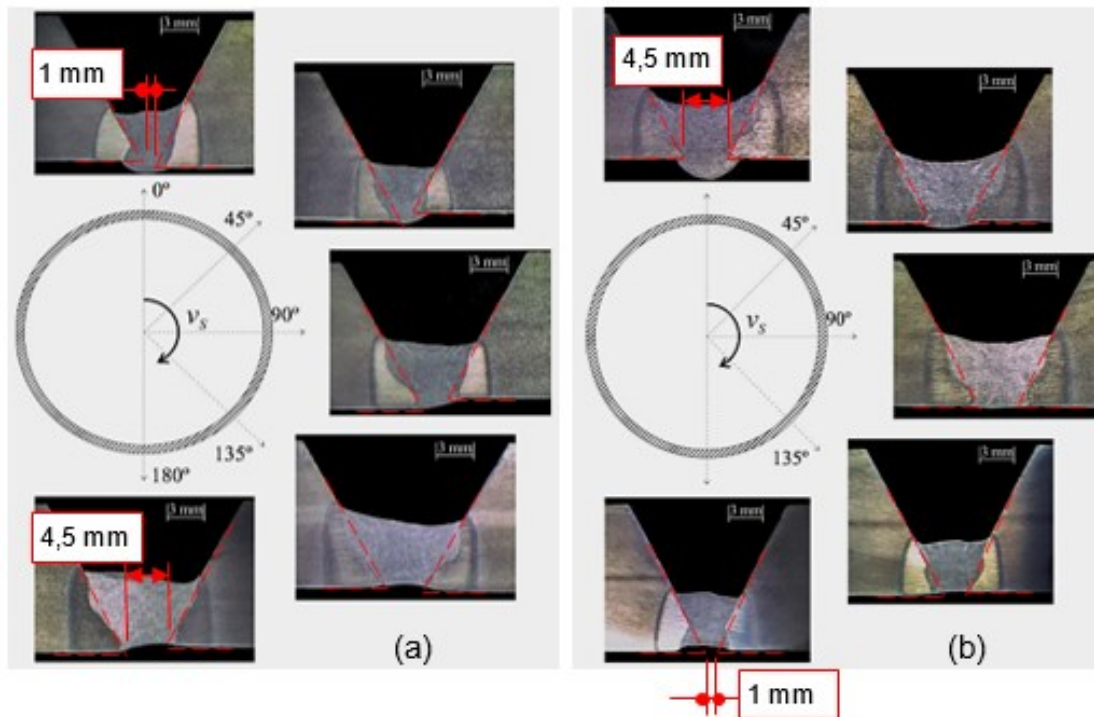
previamente, podendo este, ser atualizado convenientemente) e um leitor laser de medição bidimensional que registra as dimensões da junta. Basicamente, o software compara os registros obtidos com os arquivos armazenados previamente e o sistema todo, por sua vez, controla os parâmetros de soldagem e também os movimentos mecânicos de tecimento de um robô antropomórfico com 6 graus de liberdade para o preenchimento da raiz. Na Figura 2.7 pode-se observar o trajeto percorrido pela tocha de soldagem.



(a) Vista geral da tocha e do corpo de prova e (b) vista superior do plano de tecimento

Figura 2.7: Desenho ilustrativo da movimentação do robô. Fonte: [23]

Em seu trabalho, Kindermann [23] reuniu informações a respeito das condições mais favoráveis para se conseguir a fusão, solidificação e conseqüente união de dois tubos por meio de soldagem. Então, da mesma forma que Sartori [22], as soldas foram realizadas no processo GMAW utilizando uma fonte de curto circuito controlado (C.C.C.) e, sincronizando todas as variáveis que foram citados anteriormente, foi possível produzir os cordões que são apresentados na Figura 2.8.



(a) Afastamento 1mm na região plana de soldagem e (b) afastamento 4,5mm

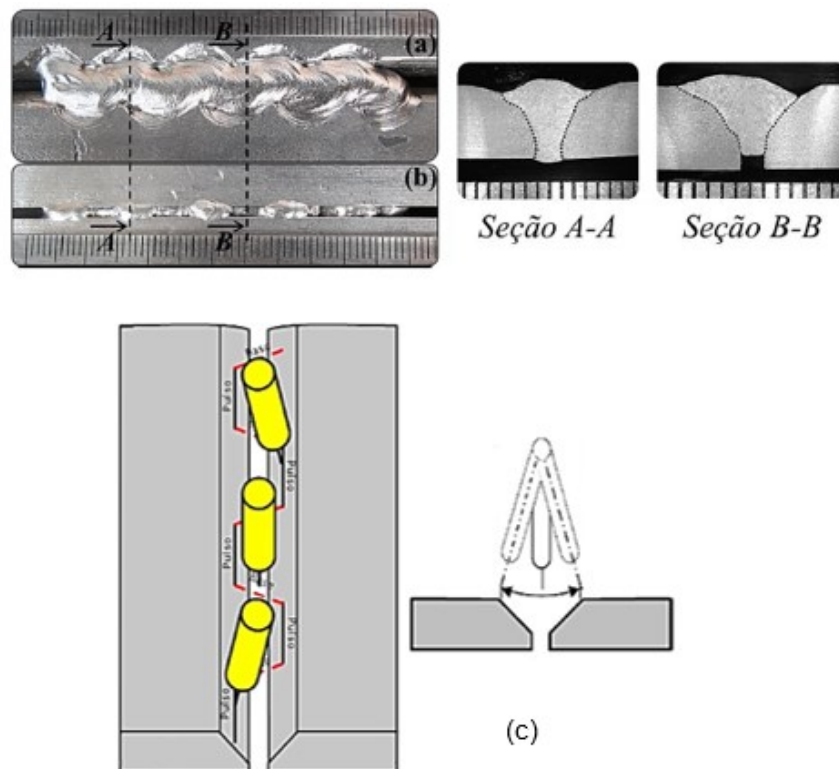
Figura 2.8: Cordões de solda executados na posição 5G. Fonte: [23]

Os resultados obtidos por Kindermman [23] foram bastante adequados para as posições plana e vertical, sendo que na sobre cabeça formou-se uma pequena deformação em forma de vale, principalmente por causa da força gravitacional, quantidade de metal depositado, fator de contração e outras variáveis que atuam durante e depois da soldagem.

Na soldagem GMAW com modo de transferência por curto circuito, a importância e influência da oscilação do arco elétrico quanto à distribuição de calor e massa durante o processo foi a base dos estudos realizados por Perez [24]. Este autor pré-aqueceu o metal-base, mas também movimentou a tocha durante a execução da soldagem na posição plana. O objetivo foi promover uma ampla distribuição térmica, reduzir a taxa de resfriamento do metal de solda para formar uma Z.T.A. menos tensionada e, por meio desta condição térmica, proporcionar melhor resistência mecânica (limite de resistência à tração) e tenacidade da união. Seus resultados positivos mais significativos foram alcançados com este conceito, sendo que a movimentação mecânica do arco foi realizada conforme padrões de “zig-zag” (alternância entre direita e esquerda) e também “vaivém” (alternância para frente e para traz) numa proporção de 2 ou 2,5 vezes o diâmetro do arame eletrodo com relação a amplitude da deflexão do arco.

Uma outra forma mecânica de movimentar a tocha/arco elétrico ao longo da soldagem é utilizar oscilações do tipo pendular. Ziberov [25] aplicou este recurso em seus testes no processo GMAW pulsado e obteve resultados positivos sincronizando a deposição de metal em função do pulso de corrente nas laterais do chanfro. Suas principais dificuldades foram estabelecer um sincronismo adequado entre o tempo de parada da oscilação, afastamento da junta, formato constante do bisel, quantidade de metal depositado. A forma de homogeneizar o calor e distribuir metal na região do cordão não reduziu a necessidade de controlar os parâmetros já relatados no trabalho de Kindermman [23]. Na Figura 2.9 são mostradas fotos da soldagem e uma ilustração de como foi aplicada a oscilação.

Uma observação interessante pode ser vista nas seções A-A e B-B que são imagens relativas às Figura 2.9 (a) e Figura 2.9 (b). Mesmo se tratando de uma oscilação supostamente padronizada para ambos os lados, a penetração do cordão não ocorreu igualmente em ambos os lados. Posteriormente, o autor aplicou novos parâmetros de soldagem e regulagem da oscilação para reduzir a frequência com que este tipo de descontinuidade ocorreu, porém, o próprio autor relata a necessidade de estudos mais aprofundados para se conseguir êxito na aplicação deste sistema.



(a) Soldagem na face superior dos corpos de prova, (b) penetração na face inferior do corpo de prova e em (c) uma ilustração de como foi aplicada a oscilação

Figura 2.9: Resultados do deslocamento pendular da tocha. Fonte: [25]

Com as informações destes autores, observa-se que, seja por meio de oscilação mecânica ortogonal, linear ou pendular, utilizar equipamento com tecnologia C.C.C., regular a transferência metálica para curto circuito ou pulsada, quantidade de metal depositado, quantidade de calor que atua por um determinado tempo e em uma região específica (normalmente na poça de fusão), controle da amplitude de oscilação e sua frequência, entre tantas outras, são importantes fatores responsáveis por produzirem uma solda adequada.

2.4. Oscilação magnética como forma de tecimento

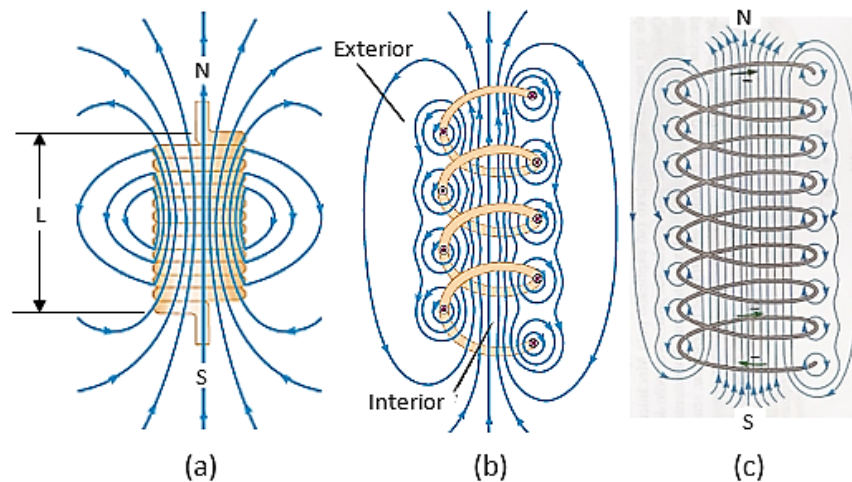
Uma outra forma de movimentar o arco elétrico (tecimento), para conseguir melhor distribuição de calor e massa ao longo da soldagem é utilizar a oscilação magnética controlada.

A passagem da corrente de soldagem pelo arco produz ao seu redor um campo magnético proporcional à intensidade da corrente [14]. A interação desse campo magnético, com campos externos gera forças no arco que, quando suficiente fortes podem causar deslocamentos e mudanças de forma no arco [14-16].

Uma forma eficiente de direcionar fluxo magnético para o arco é utilizar eletroímãs. O conceito de campo e linhas de fluxo magnético produzidos por um eletroímã será explicado mais adequadamente a seguir.

2.4.1. Fundamentos

Os nomes, eletroímã, indutor eletromagnético, solenoide ou simplesmente bobina, trata-se de um agrupamento organizado em forma de espiras, onde, pelo condutor circula uma corrente elétrica “ i ”. A corrente que circula por um único condutor produz um campo magnético fraco ao seu redor, porém, quando este condutor é agrupado em forma de espiras, torna-se capaz de produzir um campo magnético forte. Na Figura 2.10 é mostrado um exemplo de uma bobina e linhas de fluxo do campo magnético.



(a) Fio condutor enrolado, (b) soma dos campos magnéticos de cada anel e (c) campo magnético uniforme no interior da bobina, onde “ i ” é a corrente elétrica

Figura 2.10: Forma construtiva de um tipo de indutor eletromagnético (bobina)

Fonte: (a) e (b) site monografias.com, 2020, TURMERO, P.

Disponível em: <<https://www.monografias.com/trabajos106/introduccion-al-campo-magnetico-y-electromagnetismo/introduccion-al-campo-magnetico-y-electromagnetismo2.shtml>>, acessado em 22/11/2020. Fonte: (c) site infoescola.com.br, 2020

Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica/solenoide/>>, acessado em 22/11/2020

Construtivamente, uma bobina baseia-se na Lei de Ampère [26]. No seu interior, a densidade do campo magnético é praticamente uniforme e pode ser calculada pela Equação 2.1.

$$B = \frac{\mu * N * i}{L} \quad \text{Equação 2.1}$$

Por fim, chama-se circuito magnético a região onde se desenvolvem o conjunto das linhas de força do campo magnético ou, simplesmente, fluxo magnético. Este pode ser determinado pela Equação 2.2.

$$\theta = B * S \quad \text{Equação 2.2}$$

Lorentz¹, aproveitando os estudos de Orsted², definiu a expressão matemática conhecida como equação da Força de Lorentz que é a força exercida sobre uma partícula com a carga elétrica “q₀” [Coulomb] na presença de um campo elétrico “E” [V/m] e um campo magnético “B” [Tesla]:

$$\vec{F} = (q_0 * \vec{E}) + (q_0 * \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde: “F” é a força magnética resultante [N] e “v” é a velocidade de uma partícula [m/s].

Neste conceito a sucessão de cargas em movimento (corrente elétrica) que produz um campo magnético “B” ao redor do condutor por onde passam (arco elétrico) pode sofrer influência de um campo magnético externo no contexto de atuar com forças laterais sobre as cargas em movimento.

Sabendo-se que as linhas de fluxo do campo magnético são bem definidas no interior de uma bobina torna-se possível direcionar o campo magnético produzido no centro do enrolamento instalando nele um núcleo de material ferromagnético. Com isso consegue-se direcionar o campo magnético para locais relativamente distantes da face da bobina. A Figura 2.11 refere-se a uma bobina contendo um núcleo deste tipo.



Figura 2.11: Exemplo de uma bobina com núcleo ferromagnético

Fonte: RF Radiofrecuencias, 2016, disponível em: <<https://rf-radiofrecuencia.blogspot.com/2013/07/bobinas-y-choques-de-radio-frecuencia.html>>, acessado em 21/11/2020

1 - LORENTZ, H. A., Nobel de Física por seu trabalho sobre as radiações eletromagnéticas. Nascido em 1853, falecido em 1928. Hendrik Antoon Lorentz, Arnhem, Países Baixos- Holanda.

2 - ORSTED, H. C., Físico e Químico dinamarquês, Descobriu que as correntes elétricas podem criar campos magnéticos que são parte importante do Eletromagnetismo. Nascido em 1777, falecido em 1851.

A utilização de bobinas como geradores de campo magnético e núcleos ferromagnéticos como direcionadores do campo produzido foi o princípio aplicado nesta tese para defletir o arco elétrico na soldagem.

2.4.2. Histerese e saturação magnéticas

A proposta deste trabalho é utilizar a deflexão do arco elétrico por meio de fluxo magnético controlado e gerado por um conjunto de bobinas com núcleo ferromagnético, então, histerese e saturação magnéticas podem ser fatores relevantes para a eficiência do processo.

As referências bibliográficas [27-29] mostram a possibilidade de uso de núcleos de bobinas confeccionados a partir de materiais maciços e conjunto de lâminas. Uma classe de material comumente usada para essa aplicação é o aço ao silício ou aço para fins elétricos ou simplesmente "aço elétrico". Suas perdas térmicas, saturação de campo magnético, formação cristalina, alta permeabilidade magnética, resistividade elétrica relativamente elevada e indução residual relativamente baixa quando submetido a uma magnetização cíclica, remetem à sua aplicação para este fim. Os materiais ferromagnéticos possuem propriedades que implicam, em baixa relutância, conseqüentemente em pequena absorção de corrente magnetizante e de potência relativa de magnetização, baixa perda por correntes parasitas (correntes de Foucault) e também baixa histerese. Maiores eficiências podem ser conseguidas utilizando-se aço-silício de grãos orientados que apresentam alta permeabilidade quando excitados no sentido da laminação e baixíssimas perdas magnéticas específicas (watts por unidade de massa).

Landgraf [27], estudou o fenômeno da histerese em aços baixo carbono (0,06%C ou 0,08%C) sem silício, com baixíssimo teor ou enriquecidos com este elemento (presença de até 6,5% Si na amostra de material) testando a eficiência magnética destes materiais quanto a saturação e permissividade. Foi relatado que o efeito significativo da histerese ocorre com valores de frequência por volta de 120 Hz trabalhando com indução magnética acima de 0,5 T. Outros autores definem 60 Hz sob indução acima de 0,9 T. Enfim, o autor descreveu a histerese, basicamente como sendo um fator dependente da frequência, intensidade do campo magnético e material onde o magnetismo está atuando. Estas e outras características dos materiais ferromagnéticos, no que diz respeito à saturação magnética, devem ser levadas em consideração a fim de se conseguir a melhor eficiência possível quanto à atuação do fluxo magnético no processo.

Juliani [30], antes de executar seus experimentos, realizou medições do campo magnético de um indutor eletromagnético de 12 W de potência a 25 mm de distância entre a

face do indutor e o arame eletrodo com o objetivo de assegurar que efeitos de saturação magnética e nem histerese causassem interferências em seus estudos. As medições registraram 2 mT de indução para causar a deflexão de 6 mm em um arco GTAW com frequência de 0,5 Hz até 1,5 Hz, portanto, dentro dos limites recomendados por Landgraf [27]. Esta medição serviu como base para, posteriormente naquele mesmo trabalho, o arco GMAW fosse defletido controladamente. No trabalho de Juliani [30], mesmo empregando-se 2mT em direção ao arco a sua amplitude de deflexão transversal não chegou aos 6mm devido às características típicas do arco elétrico de cada processo.

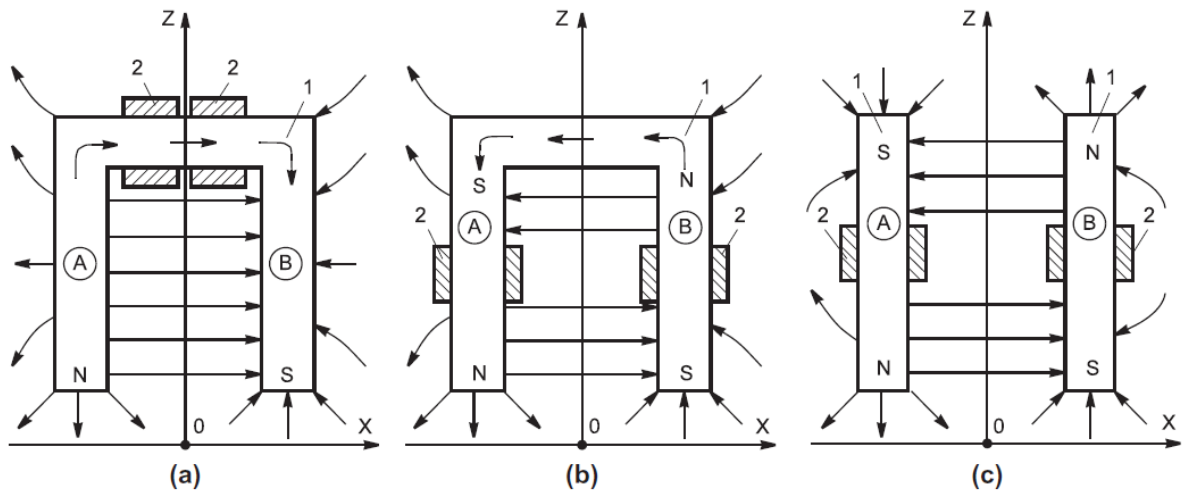
Estas informações indicam que a movimentação do arco elétrico ficará limitada a determinados valores da frequência e intensidade do campo. O fenômeno da histerese pode interferir na movimentação do arco caso o campo magnético seja intenso o suficiente para permanecer residualmente atuante no material e em determinada condição dificultando assim a sua dissipação e “aceitação” de uma nova condição. Resumidamente, baseado nestas informações e também nas referências bibliográficas [27-29] foi considerado que na utilização de aços enriquecidos com silício o valor limite para a saturação magnética deva ficar abaixo de 1,7 T. Para aço baixo carbono deve-se trabalhar com valores não superiores a 0,5 e 0,7 T.

Sendo assim, como condições de contorno para esta tese o dispositivo indutor eletromagnético a ser utilizado para promover deflexão do arco elétrico GMAW deverá trabalhar com frequência abaixo de 60Hz, densidade de fluxo inferior a 0,9T e a saturação magnética do direcionador de fluxo não deve ultrapassar 0,5 T.

2.5. Direcionadores de fluxo magnético

Após entender um pouco mais sobre as propriedades eletromagnéticas dos materiais, esta seção traz informações a respeito da eficiência quanto à forma construtiva e características geométricas para se fabricar direcionadores de fluxo magnético. Tais componentes podem ser utilizados em diversas aplicações práticas, inclusive na soldagem.

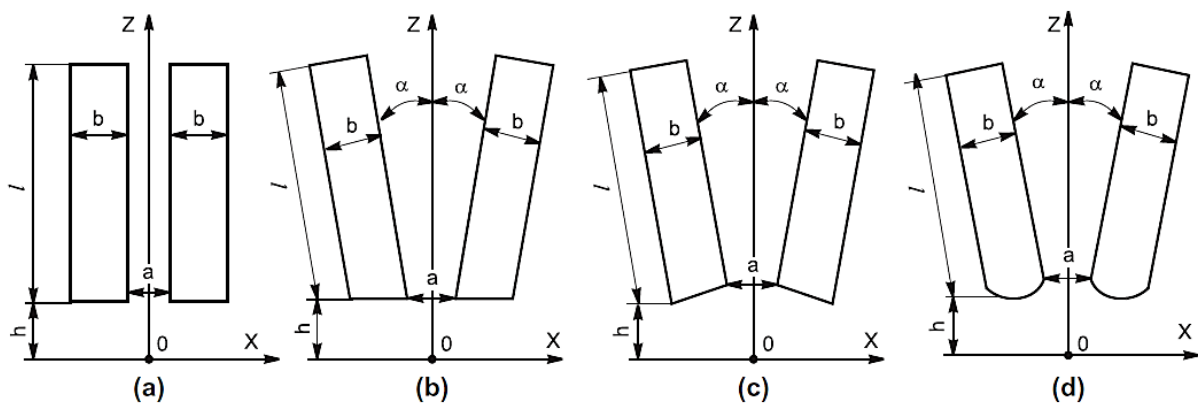
Razmyshlyeva e Vydmysh [31] realizaram estudos sobre as características construtivas de alguns indutores eletromagnéticos a fim de se determinar quais poderiam fornecer a maior densidade possível de campo direcionado para a região da soldagem. Na Figura 2.12 são mostrados alguns dos dispositivos que foram testados.



(a) Núcleo contínuo e duas bobinas agrupadas, (b) Núcleo contínuo e duas bobinas separadas e (c) Núcleos separados e duas bobinas separadas. (A) e (B) são os núcleos direcionadores de fluxo, (1) vetores representando as linhas de fluxo magnético e (2) bobinas

Figura 2.12: Formas construtivas dos direcionadores de fluxo magnético. Fonte: [31]

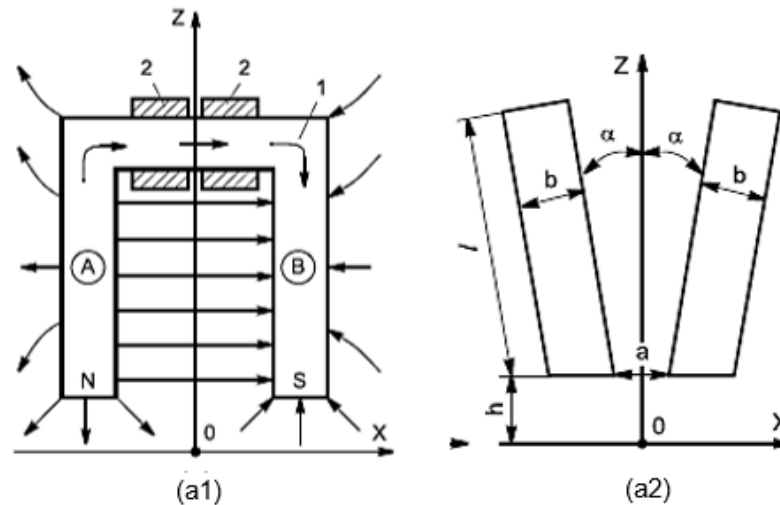
Na Figura 2.13, são mostrados os posicionamentos relativos entre os direcionadores de fluxo.



(a) Núcleos direcionadores paralelos, (b) núcleos inclinados e faces paralelas à superfície da peça, (c) núcleos inclinados e faces inclinadas à superfície da peça, (d) núcleos inclinados e faces arredondadas. “a” e “b” distância entre os direcionadores de fluxo e sua largura, “ α ” ângulo com relação a um eixo vertical, “l” comprimento do direcionador e “h” distância entre a extremidade dos direcionadores de fluxo e a superfície de uma peça

Figura 2.13: Posicionamentos relativos entre os direcionadores de fluxo magnético. Fonte: [31]

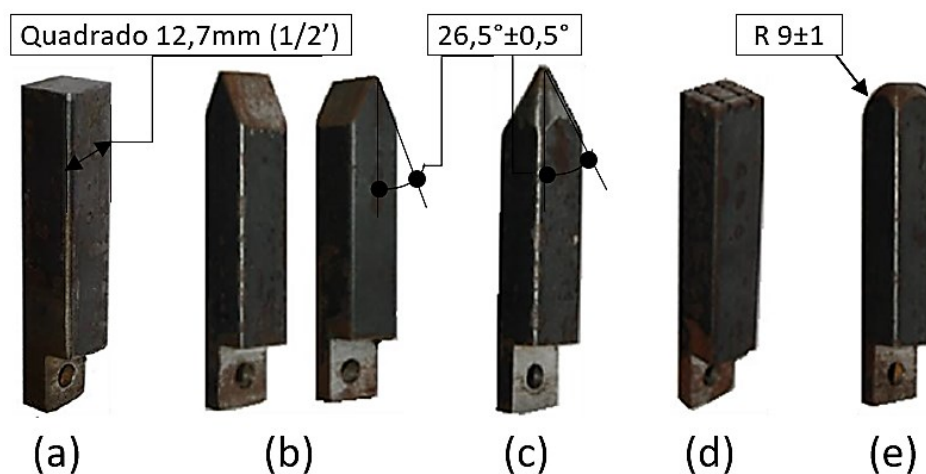
Após testes controlados, os autores concluíram que, o melhor desempenho do sistema indutor eletromagnético foi conseguido com uma combinação entre a forma construtiva e o posicionamento relativo dos direcionadores de fluxo conforme é mostrado na Figura 2.14.



(a1) Núcleo contínuo e duas bobinas agrupadas e (a2) núcleos inclinados e faces paralelas à superfície da peça. Sendo que " α " = 45° , " a "=20mm, " b "=26mm, " h "=15mm, " l "=50mm e, o ponto "0" representa o centro do eletrodo, arco ou poça de fusão

Figura 2.14: Representação simplificada do melhor conjunto eletromagnético. Fonte: [31]

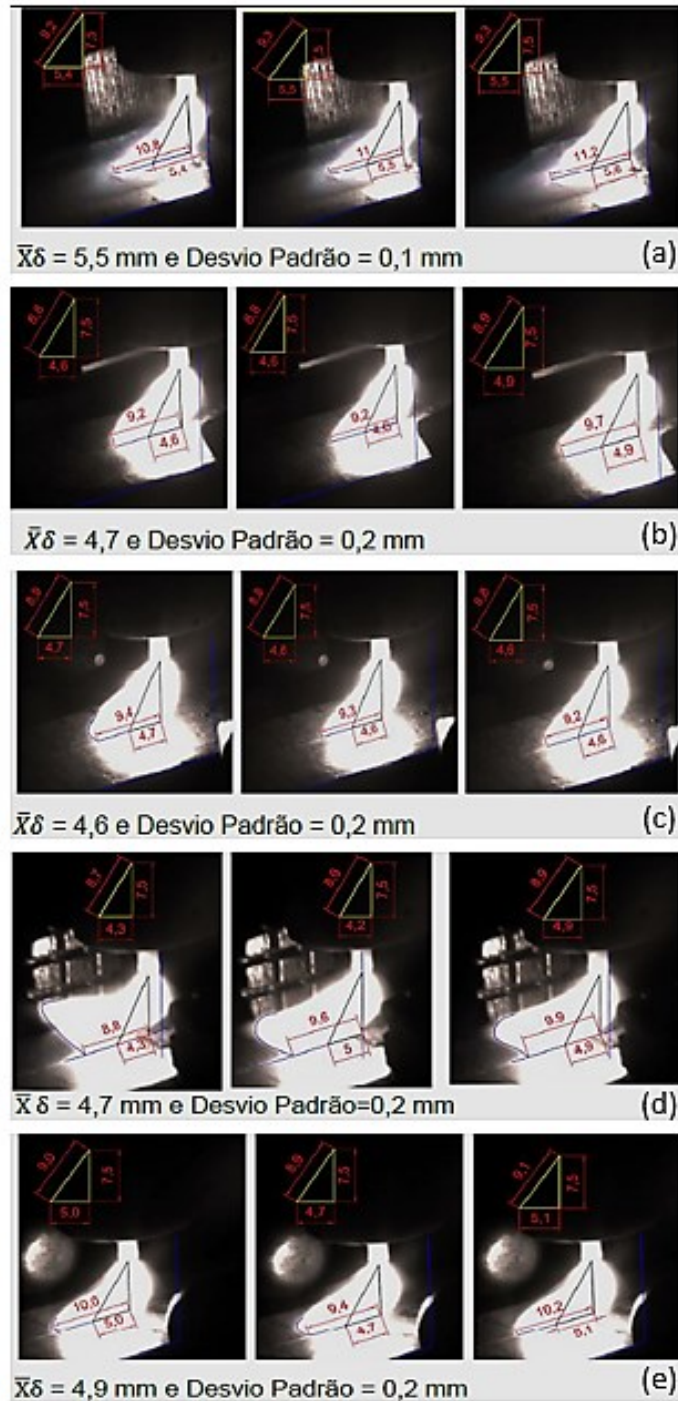
Muitos estudos sobre efeitos do fluxo magnético direcionado para o arco vem sendo realizados e, sobre este tema, Guilherme [32] realizou um trabalho quanto a influência da geometria da ponta do núcleo do eletroímã como direcionador de fluxo para o arco de soldagem. Na Figura 2.15 são mostrados alguns exemplos das pontas que foram testadas.



(a) ponta plana, (b) ponta em forma de cunha, (c) ponta cônica, (d) ponta em forma de torre, (e) ponta com raio

Figura 2.15: Formato das pontas dos núcleos dos eletroímãs. Fonte: [32]

Com este estudo foi possível comprovar alterações na amplitude da flexão de um arco de soldagem GTAW conforme o formato da ponta do eletroímã. Verificou-se que as pontas com maiores áreas direcionadas para a região do arco elétrico produziram maiores deflexões, o que comprova a aplicação da Equação 2.2. Na Figura 2.16, pode-se observar as dimensões das deflexões do arco que foram alcançadas em função do formato das pontas dos direcionadores de fluxo que foram utilizados.



(a) ponta plana, (b) ponta em forma de cunha, (c) ponta cônica, (d) ponta em forma de torre, (e) ponta com raio

Figura 2.16: Dimensão da deflexão magnética do arco. Fonte: [32]

2.6. Estudos sobre fluxo magnético direcionado para o arco elétrico

Nesta seção, estão relacionados os assuntos referentes aos efeitos do fluxo magnético direcionado para o arco elétrico como forma de promover e controlar sua deflexão.

Um dos primeiros estudos que se tem conhecimento sobre este tema data de 1960 com a patente de Greene [38] (será apresentada mais adiante nesta tese). Posteriormente, Ecer [33], utilizando arco GTAW pulsado, realizou experimentos comparativos tendo como referência as expressões matemáticas propostas por Bachelis (em 1963) e Kovalev (em 1973) que, por sua vez, utilizaram arco GTAW constante para tentar prever o quanto este poderia defletir em função do fluxo magnético externo e direcionado. Os resultados apresentados por Ecer [33] mostraram boa aproximação entre as condições, mas, com algumas restrições devido ao grande número de variáveis influenciadoras, tais como: diâmetro do eletrodo e sua composição, comprimento do arco, valores de corrente média nas condições de pulso, corrente com arco constante, densidade de fluxo magnético, entre outras. Após os experimentos e apuração dos dados, foi possível notar maiores deflexões com o arco em suas condições de base, ou seja, dado um determinado fluxo magnético e corrente elétrica média, a deflexão do arco foi maior quanto menor a corrente e maior o comprimento de arco.

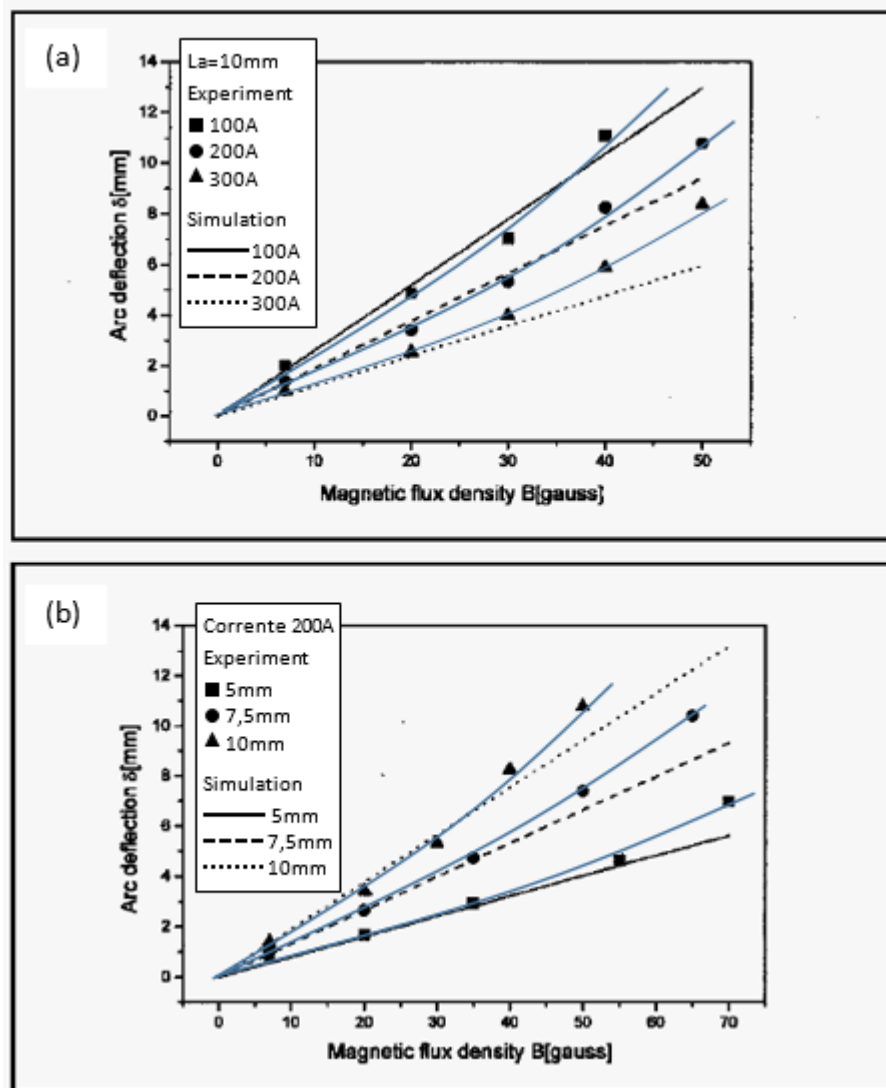
Kang e Na [34] desenvolveram uma forma de simular o comportamento do arco em função da deflexão magnética imposta no processo de soldagem GTAW autógeno.

Variáveis como frequência de oscilação, tensão do arco, aporte térmico, densidade de fluxo magnético, amplitude de oscilação do arco, enfim, puderam ser testadas em uma simulação computacional e posteriormente introduzidas no processo.

Um destaque desta ferramenta foi apontar a necessidade de aumentar a tensão de soldagem no momento em que o arco é defletido. Por outro lado, Kang e Na [34] também indicaram que a deflexão do arco por um campo magnético externo afeta o valor da corrente elétrica. Estes autores, observaram vários efeitos ligados às variáveis que foram citadas, algumas delas são:

- Com uma maior corrente elétrica, para uma mesma densidade de fluxo magnético aplicado, o arco deflete menos em função de um determinado comprimento de arco. Um efeito diretamente oposto foi observado quando, para uma mesma corrente, o arco defletiu mais conforme maior o seu comprimento.
- Comparativamente, foi possível notar boa aproximação entre os resultados dos testes e o modelo proposto pelos autores. Importante ressaltar que para densidades

de fluxo até aproximadamente 20 ou 25 Gauss, mantendo-se fixo o comprimento de arco, ou até aproximadamente 30 ou 35 Gauss, mantendo-se fixo a corrente, a deflexão do arco tendeu a obedecer uma evolução linear e proporcional entre a corrente e o campo magnético. Porém, nestas mesmas condições, conforme aumentou-se progressivamente a densidade de fluxo acima dos valores mencionados esta evolução deixou de ser linear e tendeu a apresentar uma certa curvatura ascendente. No Gráfico 2.1 são mostradas estas tendências.



(a) mantendo fixo o comprimento do arco com 10mm e (b) mantendo fixo a corrente elétrica com 200A
Gráfico 2.1: Deflexão do arco x densidade de fluxo magnético aplicado no arco. Fonte: [34]

Explicando este efeito didaticamente, foi como se uma linha imaginária, ligeiramente curvada, fosse traçada no centro do arco partindo axialmente da ponta do eletrodo e curvando-se levemente até tocar a peça. Então, nestas condições, a proposta de Kang e Na [34] não foi

capaz de simular, convenientemente, os efeitos descritos. Várias razões podem ter sido responsáveis por esta variação, desde uma constante física ou simplificações das expressões matemáticas até um determinado parâmetro de soldagem em função de uma certa densidade de fluxo magnético podem ter influenciado significativamente o processo sugerindo que novas expressões tenham que ser desenvolvidas ou novas variáveis tenham que ser incorporadas na solução que foi proposta.

Como exemplo, na Figura 2.17 é apresentado os resultados comparativos entre simulação e experimento. Pode-se observar o acréscimo da tensão de aproximadamente, 11.5 V para 14 V, conforme ocorreram as deflexões laterais do arco.

Estas informações sugerem que a utilização da oscilação magnética no processo induzirá tensões de trabalho mais altas. Consequentemente maiores correntes elétricas serão necessárias levando-se em consideração o comprimento de arco no processo.

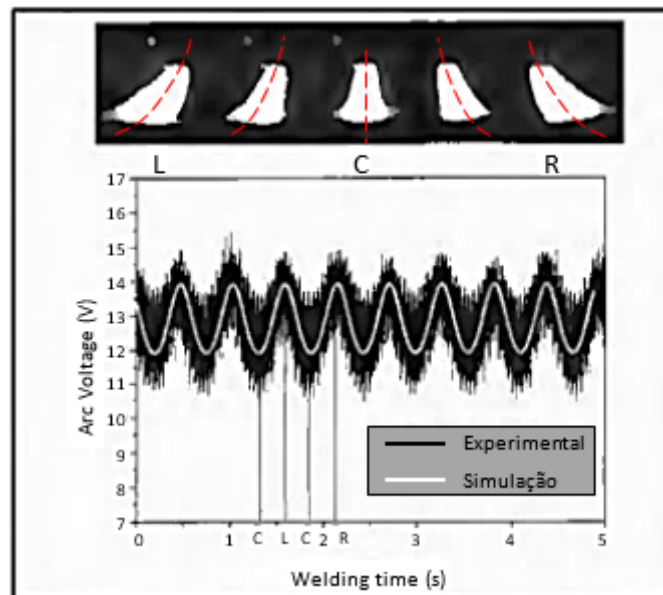


Figura 2.17: Oscilograma da tensão em função deflexão do arco. Fonte: [34]

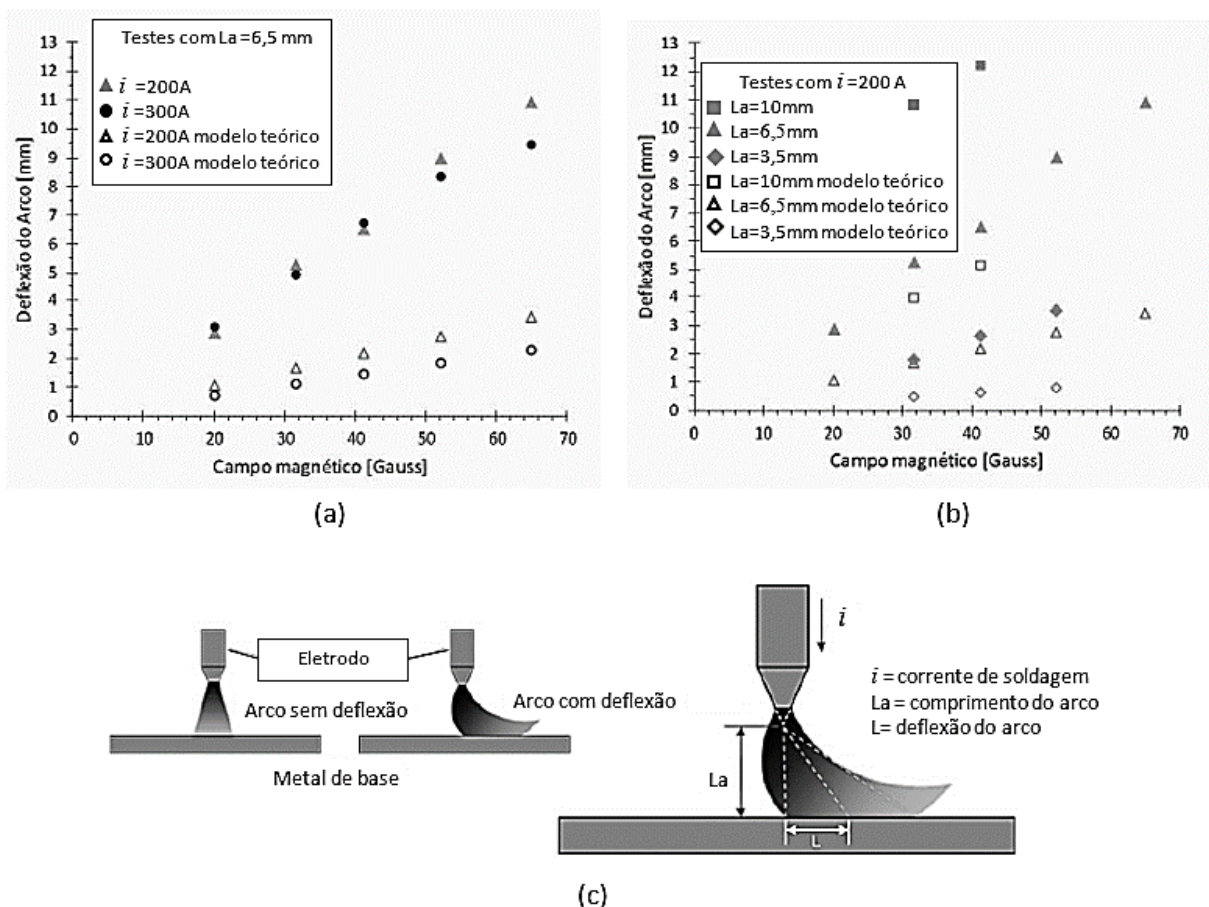
Larquer, Souza e Reis [35] também desenvolveram um modelo matemático para tentar prever a dimensão da deflexão do arco GTAW em função da densidade de fluxo magnético aplicado na soldagem. Eles consideraram que o jato de plasma se opõe à sua deflexão e que a intensidade desse jato seria proporcional ao quadrado do comprimento do arco. Os autores realizaram seus estudos utilizando o processo GTAW autógeno e cordão sobre chapa. Como resultado esperado, a deflexão do arco tenderia a ser inversamente proporcional à corrente de soldagem. Em outra condição, seria mais significativa para uma dada intensidade do campo

magnético quando a corrente fosse menor, Equação 2.4, onde, “ La ” é o comprimento do arco, “ B ” é o campo magnético atuante no arco e “ μ_0 ” é a permeabilidade magnética no vácuo.

$$L = \frac{\pi * B * La^2}{\mu_0 * i} \quad \text{Equação 2.4}$$

Esse modelo matemático e resultados experimentais também mostraram um maior potencial de perturbação da soldagem pelo campo magnético nas menores correntes, particularmente para maiores comprimentos de arco, conforme havia sido proposto por Kang e Na [34].

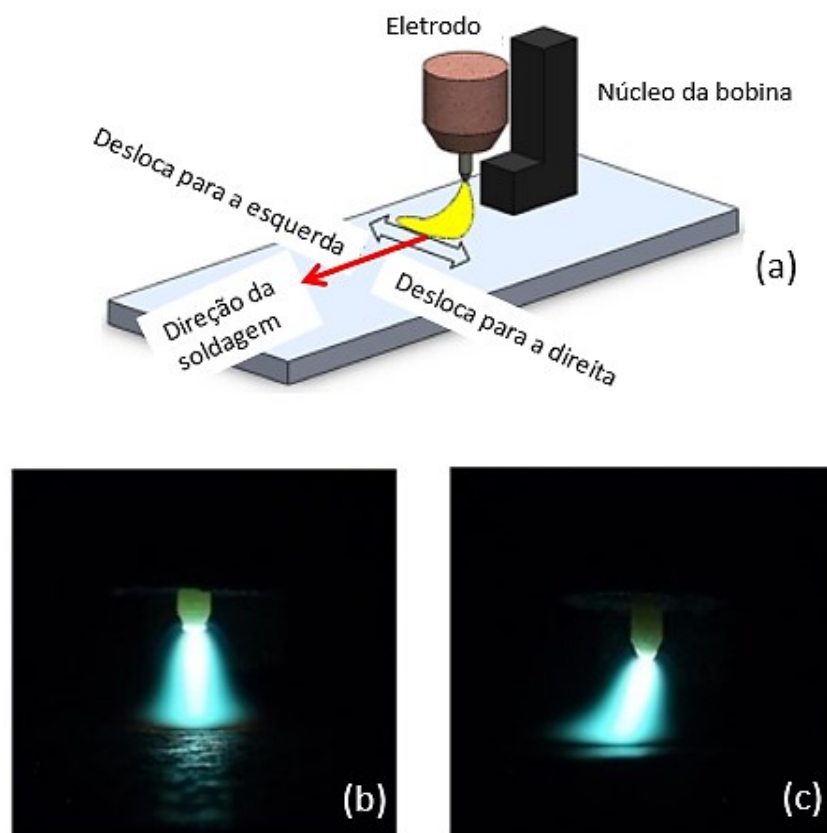
Os estudos de Larquer [35] estão de acordo com outros autores, porém, a sua expressão matemática não previu o deslocamento do arco com boa precisão, mas apresentou esta tendência de acordo com o que já foi relatado. Na Figura 2.18 são mostrados os resultados comparativo entre o modelo teórico proposto e os obtidos na prática.



- (a) Com variação da corrente de soldagem, (b) mantendo fixo a corrente e variação do comprimento de arco e (c) esboço da deflexão do arco

Figura 2.18: Comparação entre resultados experimentais (soldagem TIG) e os previstos pelo modelo de Larquer. Fonte: [35]

É de longa data que as simulações numéricas computacionais proporcionam grandes avanços tecnológicos em diversas áreas. Como não seria diferente, na soldagem, alguns autores desenvolvem e outros utilizam softwares capazes de testar virtualmente ocorrências no processo [60]. Utilizando dois softwares; o ANSYS *Multiphysics* para as análises quanto ao comportamento térmico e o FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) para analisar a deflexão do arco, Clain, Teixeira e Araújo [36] realizaram estudos comparativos entre simulações e testes controlados quanto ao perfil térmico do arco e no cordão de solda. Os testes foram feitos sem e com a influência da oscilação magnética externa e controlada do arco GTAW. Na Figura 2.19 é mostrado o dispositivo que foi utilizado para oscilar o arco.

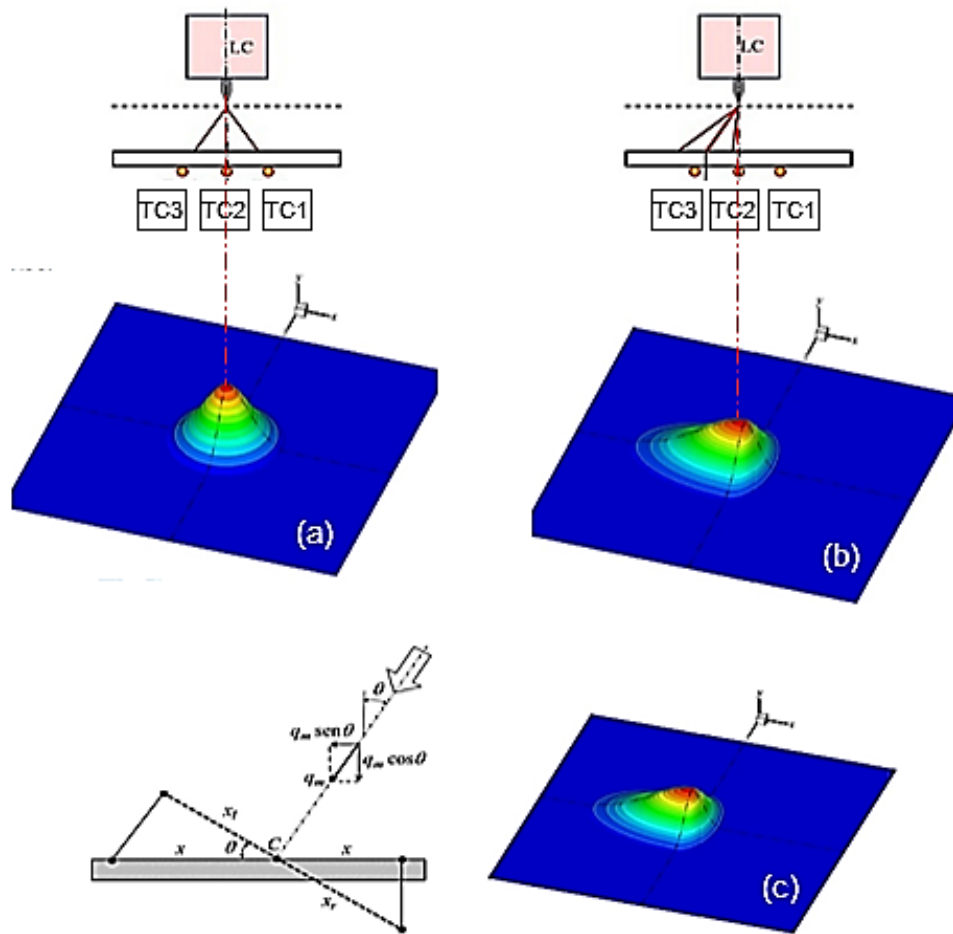


(a) Representação gráfica de como foi planejada a oscilação magnética lateral do arco, (b) e (c) são fotografias do comportamento real do arco sem deflexão e defletido, respectivamente

Figura 2.19: Dispositivo utilizado para promover a oscilação magnética do arco GTAW. Fonte: [36]

Uma vez estabelecidas as condições dos ensaios, tais como, gás de proteção, comprimento de arco, velocidade de soldagem, corrente elétrica de trabalho, entre outras, as simulações e os testes controlados foram realizados em cordão sobre chapa, utilizando corpos de prova em aço carbono SAE 1020, espessuras de 3,2mm e 6mm. Na Figura 2.20 são mostradas as condições estabelecidas para a simulação quanto ao perfil térmico do arco.

Nos testes práticos, as temperaturas nas regiões das soldagens controladas foram obtidas por meio de medições realizadas na face oposta da chapa onde foram feitos os cordões.

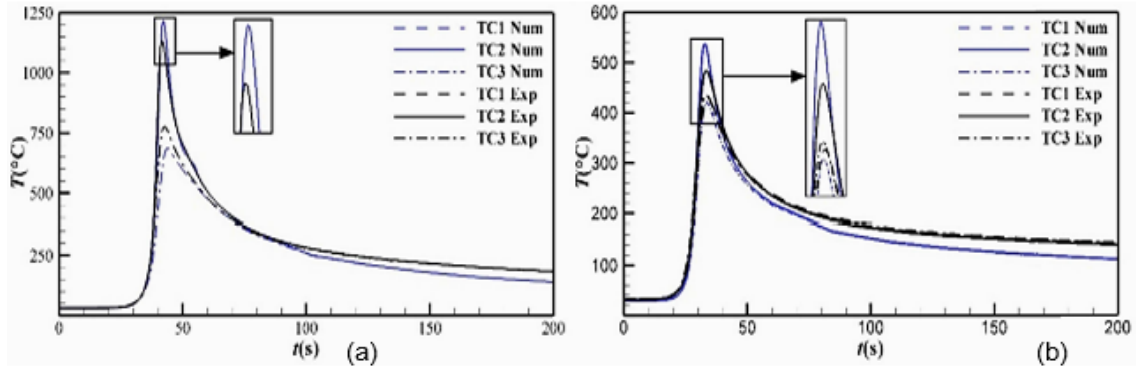


(a) Simulação onde existe fluxo de calor, mas não há deflexão, (b) simulação das características do fluxo de calor sob influência da deflexão lateral e (c) simulação da decomposição vetorial do fluxo de calor que foi considerado sobre a região de soldagem

Figura 2.20: Modelo teórico proposto para a simulação do perfil térmico do arco. Fonte: [36]

No Gráfico 2.2, são apresentados os resultados comparativos entre as simulações e os testes práticos utilizando espessuras de chapa de 3,2 mm e 6 mm na condição sem oscilação do arco. As identificações, TC1, TC2 e TC3 também mostradas na Figura 2.20 (a), correspondem às regiões, lateral direita, centro e lateral esquerda do arco. A sigla “Num” e “Exp” correspondem às simulações numéricas e testes práticos.

A região TC2, correspondente ao centro do arco e, como era previsto, apresentou maior temperatura (consolidadamente é onde o arco possui maior concentração de calor). Nota-se que os resultados entre simulação e prática estão com boa aproximação.

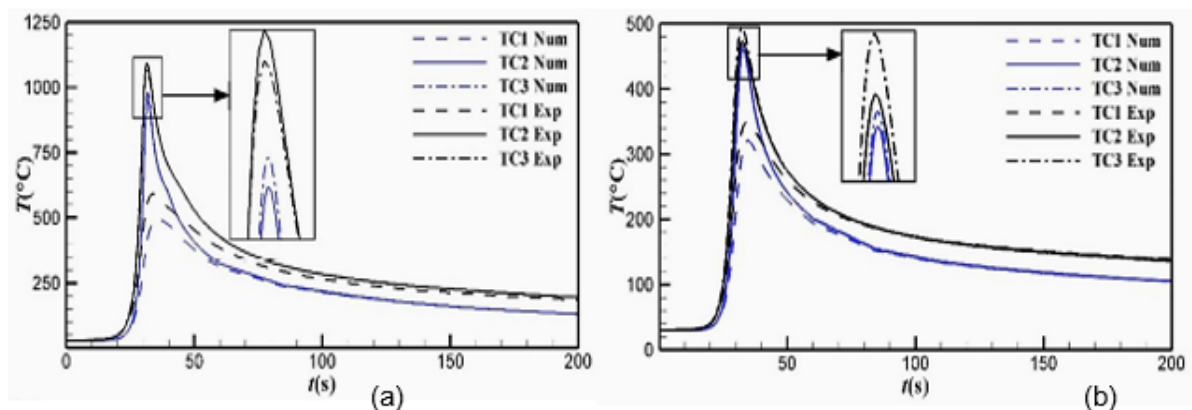


(a) Chapa com 3,2 mm de espessura e (b) chapa com 6 mm de espessura

Gráfico 2.2: Característica do perfil térmico do cordão de solda, sem oscilação do arco. Fonte: [36]

A próxima análise foi realizada em função da deflexão lateral do arco. O indutor de fluxo magnético atuou de modo a deslocar o arco para a esquerda (conforme foi mostrado na Figura 2.20 (b) e Figura 2.20 (c)), tendo como referência o sentido longitudinal da soldagem. Tal deslocamento foi mantido constante durante todo o comprimento do cordão. No Gráfico 2.3 é mostrado as análises do comportamento térmico da solda.

As regiões TC2 e TC3, correspondentes ao centro e a lateral esquerda do arco, apresentaram maiores temperaturas, pois o centro do arco (região com maior concentração de calor) foi deslocado. Nota-se que, em função da deflexão do arco a simulação apresentou um maior gradiente de temperatura com referência aos testes controlados.

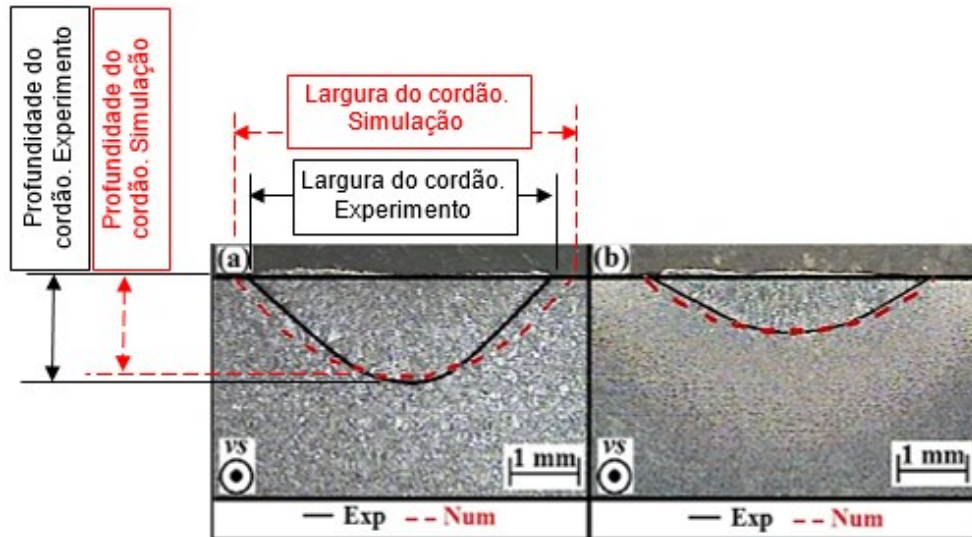


(a) Chapa com 3,2 mm de espessura e (b) chapa com 6 mm de espessura

Gráfico 2.3: Características do perfil térmico do cordão de solda, com oscilação lateral do arco. Fonte: [36]

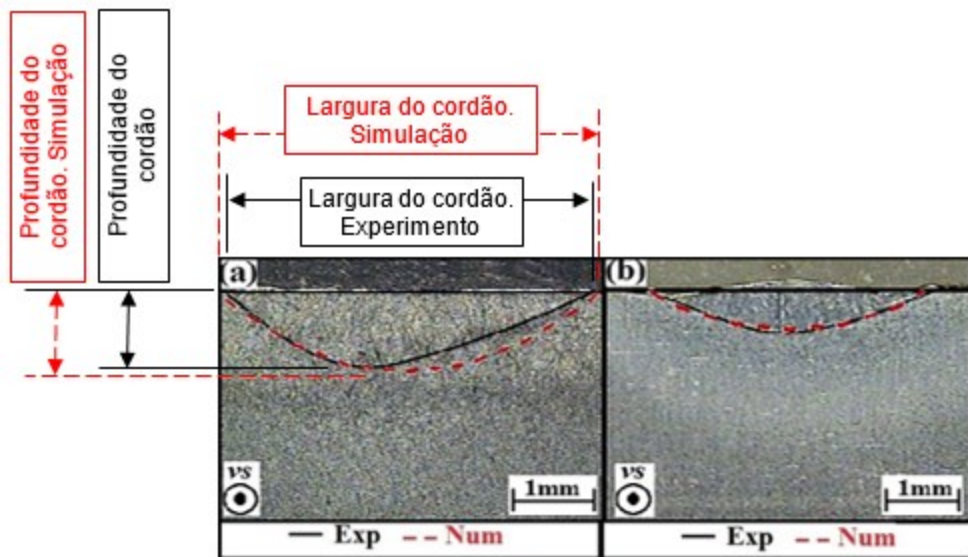
Após as análises térmicas, Clain, Teixeira e Araújo [36] realizaram macrografias dos cordões e estas são mostradas nas Figura 2.21 e Figura 2.22. O perfil traçado com linha

contínua refere-se ao teste controlado e a linha tracejada refere-se à simulação. Graficamente, na Figura 2.21, sem deflexão do arco, observa-se as comparações entre a simulação e a soldagem que foi executada e na Figura 2.22, com deflexão do arco, também é possível observar o deslocamento lateral da fusão da chapa (linha contínua) evidenciando as regiões TC2 e TC3 (onde foram registradas as maiores temperaturas).



(a) Chapa com 3,2 mm de espessura e (b) chapa com 6 mm de espessura

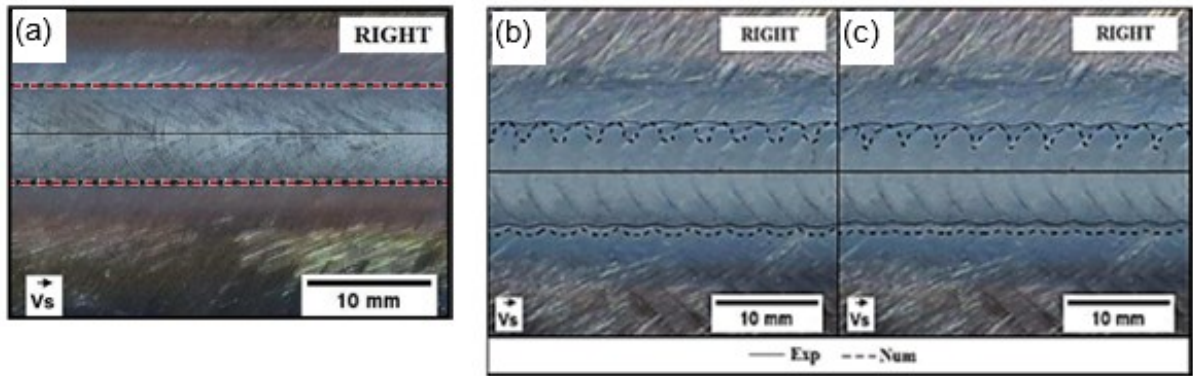
Figura 2.21: Macrografias e medições comparativas do cordão de solda, sem oscilação do arco. Fonte: [36]



(a) Chapa com 3,2 mm de espessura e (b) chapa com 6 mm de espessura

Figura 2.22: Comparações dos cordões de solda, com oscilação do arco. Fonte: [36]

Na Figura 2.23, podem ser observadas as linhas (contínua e tracejada) que delimitam as margens dos cordões.



(a) Cordão sem oscilação do arco, em (b) e (c) com o arco defletido lateralmente nas chapas com 3,2 mm e 6 mm de espessura, respectivamente

Figura 2.23: Vista superior de cordões de solda sem e com oscilação do arco. Comparação entre a simulação e cordão real. Fonte: [36]

Considerando-se que os estudos de Clain, Teixeira e Araújo [36] foram realizados em uma determinada condição de oscilação e parâmetros de soldagem, os resultados mostraram, em linhas gerais, uma boa aproximação entre as simulações computacionais e os ensaios controlados. As divergências que ocorreram podem ter acontecido em função da forma como foram estabelecidas as condições para as simulações, por exemplo, distribuição Gaussiana de temperatura ou outra característica do simulador ANSYS *Multiphysics*. Quanto aos testes controlados, foi observado que, a maior área de metal fundido localizou-se, preferencialmente, na região central do arco e ao longo do eixo longitudinal da soldagem. Estas observações incluem o efeito do deslocamento lateral do arco. Apontaram também, para a fonte de calor e pressão do arco como responsáveis por ter havido deslocamento lateral da poça e fusão localizada conforme o arco foi defletido. Tais acontecimentos ficaram mais evidentes na chapa de menor espessura a qual, naturalmente, está mais susceptível aos efeitos térmicos de condução de calor do que a chapa mais espessa.

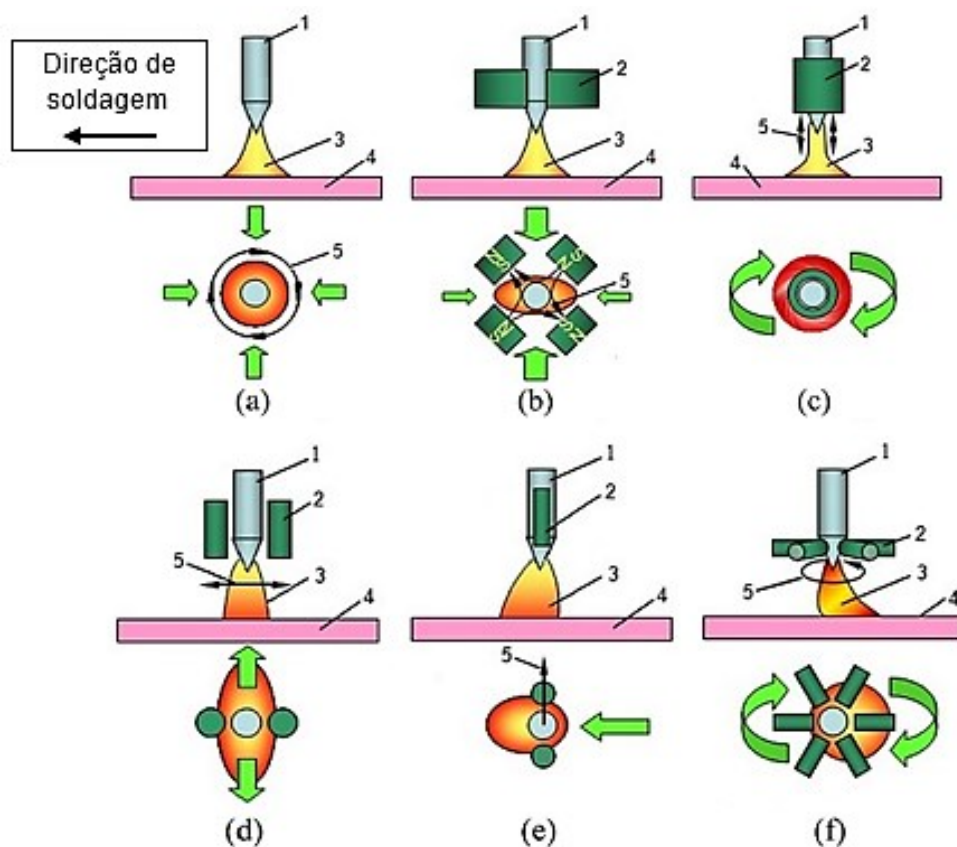
Wu et al. [37], em seus estudos sobre aplicação de fluxo magnético externo e controlado nas soldagens GTAW e GMAW relataram que, o fluxo magnético induzido pode influenciar a soldagem de várias formas diferentes. No trabalho destes autores consta que, cada situação deve ser tratada individualmente, pois, oferecem vantagens e limitações sendo necessário uma análise atenciosa antes da utilização. Como exemplo de variáveis influenciadoras estão, o posicionamento dos indutores eletromagnéticos com referência à região de soldagem, intensidade de campo magnético, frequência e sentido de atuação do fluxo entre outros. Como principais vantagens de se utilizar fluxo magnético controlado na soldagem são mencionadas: a distribuição homogênea de calor, formação de uma poça de fusão uniforme e melhorias em

propriedades metalúrgicas da união. Como principais limitações foram relacionados, basicamente, a frequência de atuação em determinadas condições e algum tipo de instabilidade no processo por conta da densidade de fluxo aplicado.

Para o processo GTAW os autores denominaram a influência do fluxo magnético no arco da seguinte forma:

- CMF: (b), elíptica com seu eixo longitudinal alongado, ao sentido da soldagem,
- AMF: (c), axial referente ao arame eletrodo,
- LMF: (d), elíptica com seu eixo transversal alongado, ao sentido da solda,
- TMF: (e), elíptica com seu eixo longitudinal alongado para frente, ao sentido da solda,
- RMF: (f), elíptica com seu eixo longitudinal alongado para trás, ao sentido da solda e descrevendo uma trajetória circular.

A Figura 2.24 ilustra as denominações mencionadas acima.

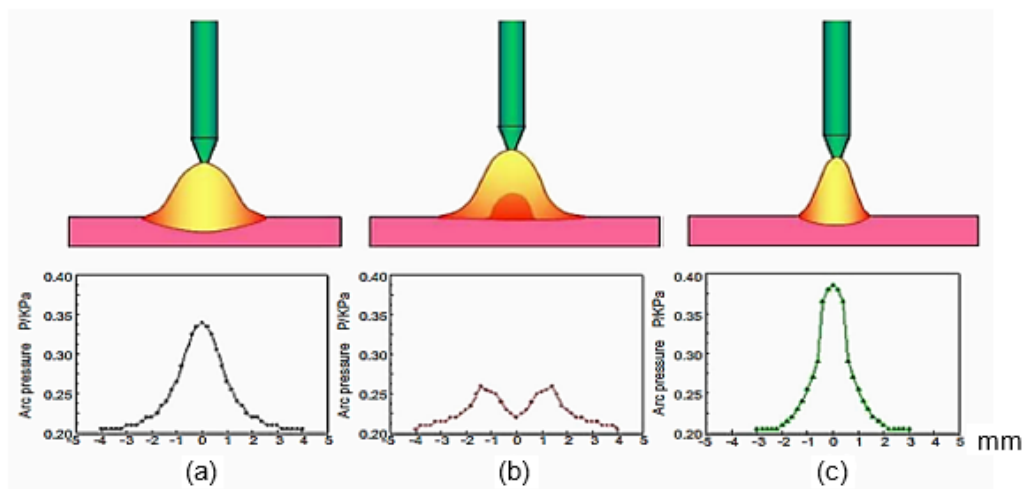


(a) representa o arco sem influência de fluxo magnético externo, (b) refere-se ao arco defletido na condição CMF, (c) AMF, (d) LMF, (e) TMF e (f) RMF. Os números que aparecem nas figuras representam: 1 – Eletrodo de tungstênio, 2 – Indutor eletromagnético, 3 – Arco plasma, 4 – Metal base, 5 – Direção e sentido do campo magnético

Figura 2.24: Denominação da influência do campo magnético externo na soldagem GTAW.

Fonte: [37]

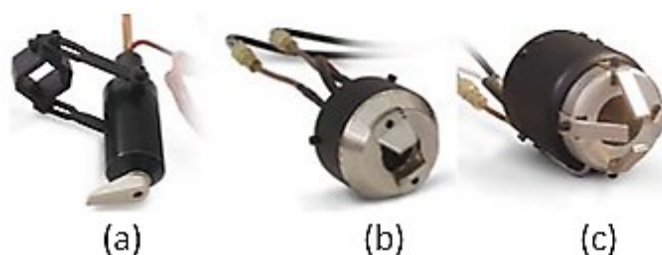
Tomando-se como exemplo a Figura 2.24 (c), condição AMF, o fluxo magnético axial produziu um arco alongado na região próxima ao eletrodo (cátodo) e em forma de boca de sino na base (ânodo). Isso sugere que, talvez, possa ser possível alcançar maiores temperaturas, dependendo dos parâmetros utilizados. Na mesma condição de fluxo, quando a frequência de atuação do campo foi alterada, notou-se variações na pressão do arco conforme é mostrado na Figura 2.25. Observa-se que, a aplicação do campo magnético com maior frequência proporcionou maior pressão de atuação do arco comparando-se as figuras (a), (b) e (c). Também houve redução na dimensão da abertura do cone do arco que está em contato com a peça. Foram classificadas como alta frequência os valores próximos a 500 Hz e os ensaios foram limitados em 1500 Hz, pois, ocorreram instabilidades no processo.



(a) Valores obtidos sem a influência do campo magnético externo, (b), com frequência abaixo de 50Hz e em (c), com frequência acima de 500Hz

Figura 2.25: Pressão do arco em função do campo magnético AMF com variação na frequência. Fonte: [37]

Direcionadores de campo dos tipos como foram mostrados e, com as funções que foram apresentadas, podem ser adquiridos comercialmente e instalados facilmente em tochas de soldagem. A Figura 2.26 mostra alguns destes produtos.



(a) de ação simples, (b) de ação LMF ou TMF e em (c) de ação CMF

Figura 2.26: Tipos de indutores eletromagnéticos encontrados comercialmente. Fonte: [20]

2.6.1. Aplicação prática da oscilação magnética controlada ao arco

Greene [38] aproveitando a relação existente entre eletricidade e magnetismo, percebeu a possibilidade de direcionar o arco elétrico para locais específicos durante a soldagem (movimentos de tecimento), então publicou em 1960 a patente que utiliza indutores eletromagnéticos (bobinas) para conseguir defletir lateralmente um arco elétrico e, talvez este equipamento possa ter sido utilizado em alguma situação prática da época, Figura 2.27.

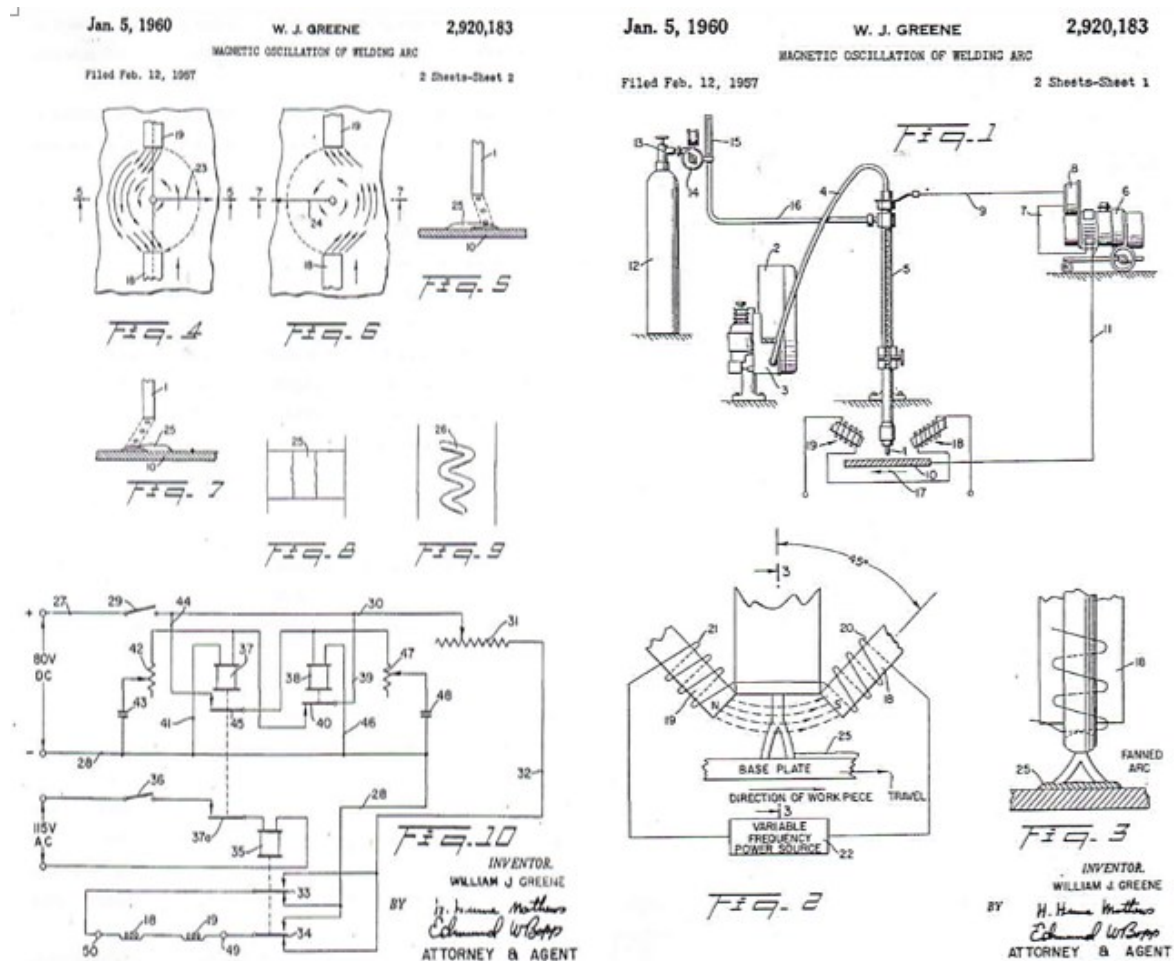


Figura 2.27: Esquema do defletor de arco proposto por Greene [38]

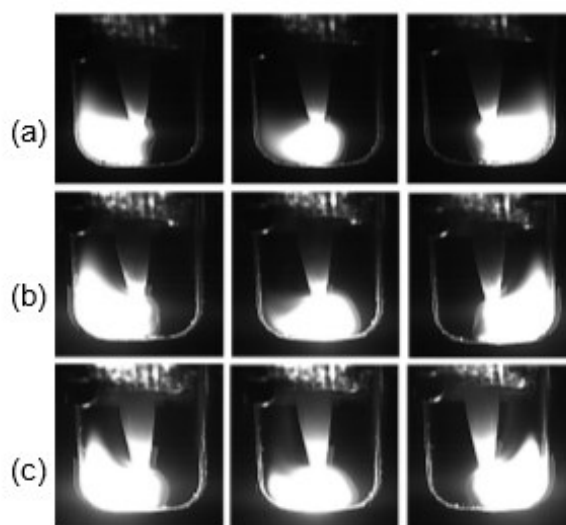
Senapati e Mohanty [59] em estudo sobre os efeitos do campo magnético externo na soldagem SMAW, observaram alterações não só na morfologia do cordão, mas também em propriedades mecânicas do metal de solda. No trabalho destes autores foi possível observar que um fluxo magnético de 70 Gauss (7 mT), em determinada condição, promoveu aumento da Resistência a Tração, Dureza e também da Resistência ao Impacto. Isso dependeu da

orientação do fluxo magnético referente ao sentido de soldagem. Ou seja, cada propriedade mecânica respondeu de forma diferente ao estímulo provocado por um determinado fluxo magnético. Igualmente a Sharma e Chattopadhyaya [62], também foi possível verificar que a atuação do campo magnético direcionado para o cordão causou um decréscimo da penetração, o que sugere ter havido uma certa movimentação do metal de solda provavelmente causando um gradiente térmico com maior dispersão de calor comparado com as soldas feitas sem a oscilação magnética no processo.

Com esta informação pode-se esperar que, nos testes realizados nesta tese, o fluxo magnético também atue de forma a distribuir o calor produzido na região do cordão, desde que a intensidade de fluxo magnético seja suficiente e adequada.

Contudo, Wang et al. [39] em 2016, utilizando a deflexão do arco transversalmente ao sentido de soldagem no processo GTAW, com adição de metal, em chanfro profundo relataram como efeitos benéficos da oscilação do arco elétrico terem conseguido maior penetração lateral nas paredes planas, melhor formato da base do cordão e alcançado maior penetração vertical da solda. Comparando-se com as soldagens deste tipo de junta que não utilizam a oscilação magnética, os bons resultados podem ser atribuídos a atuação da pressão do arco e a movimentação da poça de fusão que, por difusão e efeito da tensão superficial distribuíram o metal fundido de forma mais homogênea.

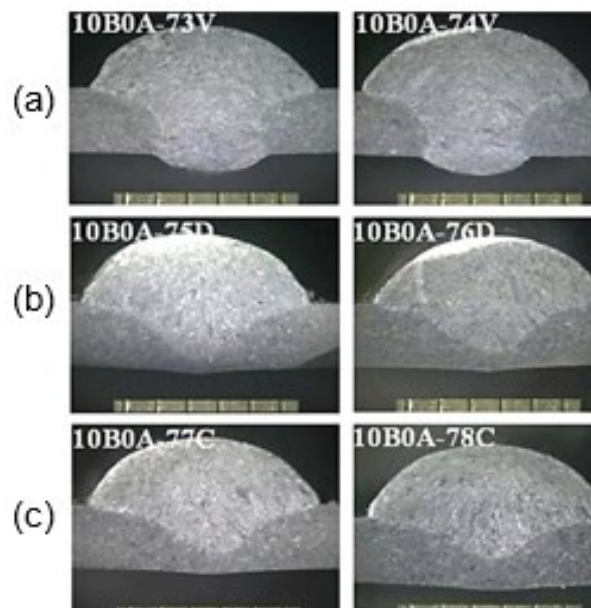
Deve-se levar em consideração que, para ser possível alcançar estabilidade aceitável no processo foram necessários o aumento da tensão e corrente de trabalho, pois, a influência do efeito magnético causou certa instabilidade ao arco por este estar confinado. Na Figura 2.28 são mostradas imagens das soldagens realizadas com diferentes valores de corrente elétrica.



(a) 150A, (b) 200A e (c) 250A

Figura 2.28: Imagens das soldagens. Fonte: [39]

Soares [40] e Andrade [41], propuseram melhorias aos processos GMAW e FCAW, respectivamente, utilizando oscilação magnética externa em forma de onda quadrada e frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz. Especificamente no trabalho de Soares [40], foi possível notar melhorias na penetração do metal de solda. Em ambos os estudos, o fluxo magnético atuante causou influências positivas quanto à transferência metálica e consequente movimentação da poça de fusão em função da forma de onda gerada e frequência de oscilação, conforme havia sido descrito por Wu et al. [37], Kobayashi e Nakahara [61]. Na Figura 2.29 são apresentados os cordões de solda realizados sob a influência da oscilação magnética externa no processo GMAW com transferência por curto circuito.



(a) com 20 Hz, em (b) com 10 Hz e em (c) com 5 Hz

Figura 2.29: Cordões de solda sob influência da oscilação magnética. Fonte: [40]

Wang et al. [42], resolveram o problema da solidificação irregular da poça de fusão durante a soldagem GMAW com transferência por spray, a qual provocava uma série de saliências intermitentes no cordão. Na Figura 2.30 é mostrado o efeito de tal ocorrência, conhecida como “*humping*”, que normalmente está presente em soldagens com alta corrente e alta velocidade. Este fenômeno ocorre por conta do gradiente térmico entre a frente quente sob o arco e a região traseira do cordão. Nestas situações, basicamente, a pressão do arco é intensa o suficiente para provocar grande movimentação da poça fazendo com que esta troque calor rapidamente com regiões ao seu entorno e, por vezes, o metal de solda se acumula nestas regiões causando solidificações intermitentes.



Figura 2.30: Efeito da solidificação acelerada da poça de fusão em soldagem a alta velocidade. Fonte: [42]

Esta descontinuidade foi eliminada com a aplicação de campo magnético externo durante o processo. O que se fez foi posicionar duas bobinas embaixo de um corpo de prova de forma a produzirem fluxo magnético transversal ao sentido do cordão. Estas ações promoveram a movimentação física tanto do arco elétrico como da poça de fusão. A Figura 2.31 é um desenho simplificado do sistema oscilador magnético que foi utilizado.

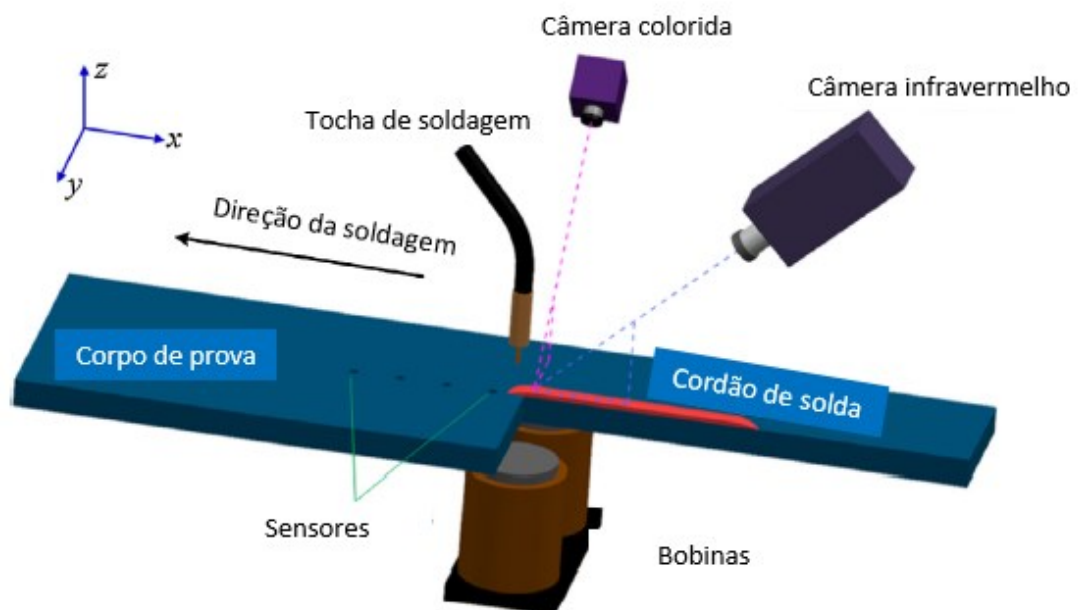
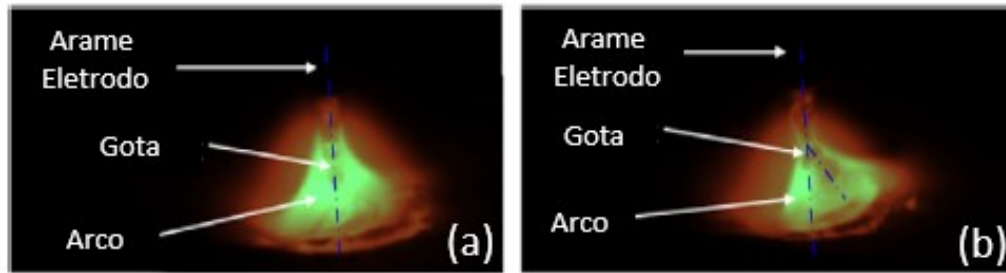


Figura 2.31: Desenho simplificado do sistema oscilador magnético. Fonte: [42]

A influência da densidade de fluxo magnético capaz de movimentar o arco também de certa forma, foi responsável pela distribuição homogênea de calor na região da soldagem o que possibilitou uma taxa de resfriamento mais adequada para a formação de uma poça homogênea e um cordão uniforme. Na Figura 2.32 são mostradas imagens do comportamento do arco e, na Figura 2.33 é mostrado o resultado da soldagem após ter sido aplicado a oscilação magnética.



(a) sem o efeito da oscilação e em (b) com o arco defletido

Figura 2.32: Comportamento do arco, sem e com deflexão. Fonte: [42]



Figura 2.33: Resultado do cordão de solda em função da aplicação da oscilação magnética por baixo da chapa metálica. Fonte: [42]

Com as informações adquiridas até esta etapa da tese, percebe-se que o fluxo magnético externo além de ser capaz de defletir o arco GTAW e/ou GMAW conforme um determinado padrão que lhe é imposto, também pode provocar alterações no processo. Fatores como a movimentação da poça, constituintes do metal de base, adição ou não de metal durante a soldagem, composição do eletrodo, corrente elétrica, comprimento de arco, padrão de oscilação, entre outros, são variáveis influenciadoras no estudo da deflexão magnética controlada do arco em um processo de soldagem e estes argumentos também são relatados por Wang, Chen e Wu [65]. Conforme o arco elétrico sofre influência do fluxo magnético externo ele pode ser deslocado longitudinal ou transversalmente, pode descrever movimentos alternados ao longo da soldagem e conseqüentemente a distribuição térmica e de metal tornam-se típicas para cada situação o que pode resultar em benefícios ou instabilidades para os processos.

Os estudos de Razmyshlyeva et al. [31], ratificaram que aparelhos como estes são capazes de interferir positivamente no processo de soldagem a arco, promovendo bom controle

de deposição metálica, auxiliando a estabilidade do arco, reduzindo o efeito de mordedura nas laterais dos cordões e, conforme o controle do fluxo magnético, podem direcionar o arco afim de distribuir melhor o calor na região da soldagem. No entanto, outros autores, não deixam de relatar pontos negativos sobre a influência de um determinado campo magnético sobre a estabilidade do arco podendo causar a sua extinção decorrente do aumento exagerado do seu comprimento ou da densidade de fluxo atuante que pode resultar em uma grande deflexão do arco além de outros fatores que foram relatados anteriormente.

2.7. Transferência metálica

O controle da transferência metálica é um importante fator para a soldagem do passe de raiz, principalmente na posição sobre cabeça. Normalmente, no processo GMAW opta-se por utilizar o modo por curto-circuito e, uma das razões para isso, é o fenômeno da tensão superficial que auxilia reter o metal fundido na região da solda para superar a ação da força gravitacional dificultando o escoamento da poça de fusão para fora da junta. Equipamentos que oferecem a tecnologia de curto-circuito com controle de corrente são eficientes ferramentas para este tipo de soldagem. Utilizando-os em soldagens é possível conseguir maior eficiência da energia transferida para a poça, maior controle da penetração da solda e uniformidade da taxa de deposição na junta trazendo mais estabilidade ao processo e maior produtividade comparados com os convencionais. Também oferecem melhor controle da frequência de curto circuito e redução da taxa de respingos, pois, a transferência metálica trabalha com pulsos de corrente. Basicamente o que acontece é que no momento da transferência da gota o equipamento reduz a intensidade de corrente e após a gota ser transferida, a corrente aumenta novamente para promover a fusão de mais arame eletrodo para a próxima deposição.

Particularmente, nota-se que produzir soldagens por meio de transferência do tipo goticular pulsado vem ganhando destaque em diversas aplicações por possibilitar bom controle da energia fornecida para a junta. Inicialmente, fontes de soldagem com este recurso eram caras e de difícil utilização devido à grande quantidade de variáveis de controle. Contudo, Fischer [66] e Melo [67] relatam vantagens produtivas ao se utilizar o processo GMAW pulsado em comparação com a utilização de fontes do tipo transformador/retificador de tensão (convencionais). Tais benefícios relatados se referem a ser possível alcançar maior velocidade de soldagem e até mesmo se conseguir maior resistência à abrasão em ligas de Fe-Cr-C.

A soldagem com corrente pulsada pode ser uma alternativa interessante, comparativamente ao uso daquelas com transferência por curto-circuito. O processo GMAW pulsado permite a obtenção de uma transferência metálica do tipo *spray* usando correntes médias inferiores às de transição [43] e [44]. Este tipo de soldagem, é caracterizada pela imposição de uma forma de onda à corrente e, por incursões periódicas acima da corrente de transição de forma a propiciar o destacamento do metal líquido da ponta do eletrodo por forças eletromagnéticas [43] e [44]. Assim, quando regulado adequadamente, o processo de soldagem opera de forma estável [45], típica da operação com *spray* e, com transferência de metal independente da atração gravitacional, o que possibilita alta eficiência e qualidade em todas as posições de soldagem.

Modenesi [43], Scotti e Ponomarev [44] relataram em suas respectivas obras a teoria para a transferência metálica no processo GMAW. A Figura 2.34 representa o que se conhece como forças envolvidas na teoria da transferência metálica.

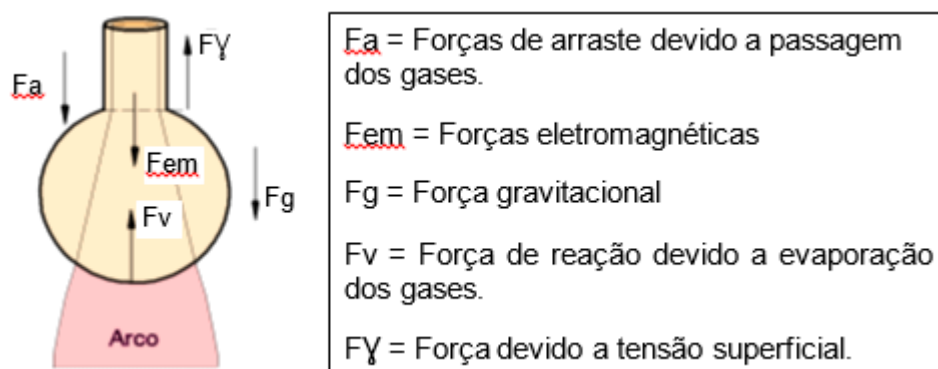


Figura 2.34: Forças envolvidas na teoria da transferência metálica no processo GMAW.

Fonte: [43]

Camargo et al [46] realizaram estudos sobre forças eletromagnéticas atuantes durante a transferência metálica no processo GMAW com presença de fluxo magnético externo. O intuito destes autores foi oferecer uma solução em potencial no sentido de promover maior facilidade para o desprendimento das gotas e assim ser possível alcançar alguma similaridade com a transferência goticular sem a necessidade de empregar alta energia de soldagem típico do GMAW no modo “*spray*”. Como parte do trabalho, previamente estes autores fizeram simulações das forças presentes desde a ponta do arame eletrodo até a poça de fusão e o resultado é mostrado na Figura 2.35. Conforme consta nesta revisão bibliográfica, a maior corrente elétrica utilizada pode majorar ou não as interações no sentido de destacar a gota (dentre as explicações conhecidas, está a Teoria da instabilidade Pinch).

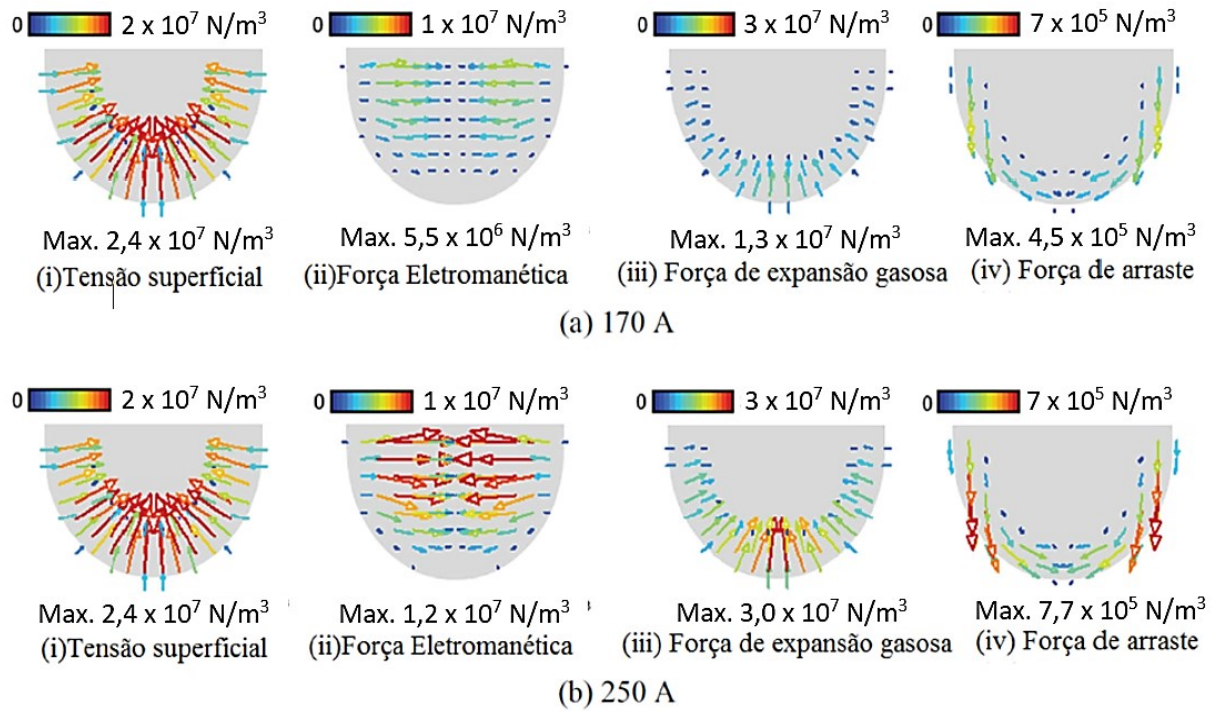
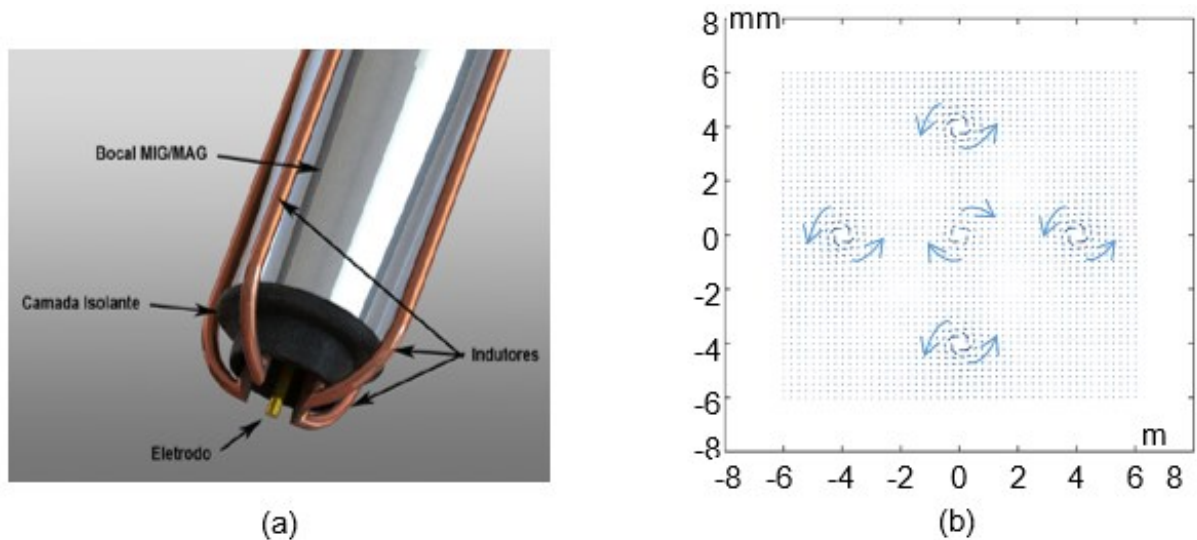


Figura 2.35: Resultado da simulação das forças envolvidas na transferência metálica do processo GMAW. Fonte: [46]

A proposta de Camargo et al. [46] foi instalar condutores lineares (3, 4 e 8 condutores dispostos simetricamente ao redor da tocha) conforme é mostrado na Figura 2.36 (a), posicioná-los próximos ao arame eletrodo e por estes condutores fazer circular alta corrente elétrica. Da forma como foi construído o dispositivo, o fluxo magnético que foi produzido, embora tenha alcançado valores de campo, forte o suficiente, ao redor dos condutores para ter havido a deflexão magnética do arco (entre 0,1 e 0,45 T), aparentemente fez com que os fluxos magnéticos induzidos atuassem opostamente um contra o outro e se anulassem ou, as forças eletromagnéticas próximas aos condutores que, deveriam agir a favor do destacamento das gotas, não surtiram o efeito pretendido. Este efeito magnético é mostrado na Figura 2.36 (b).

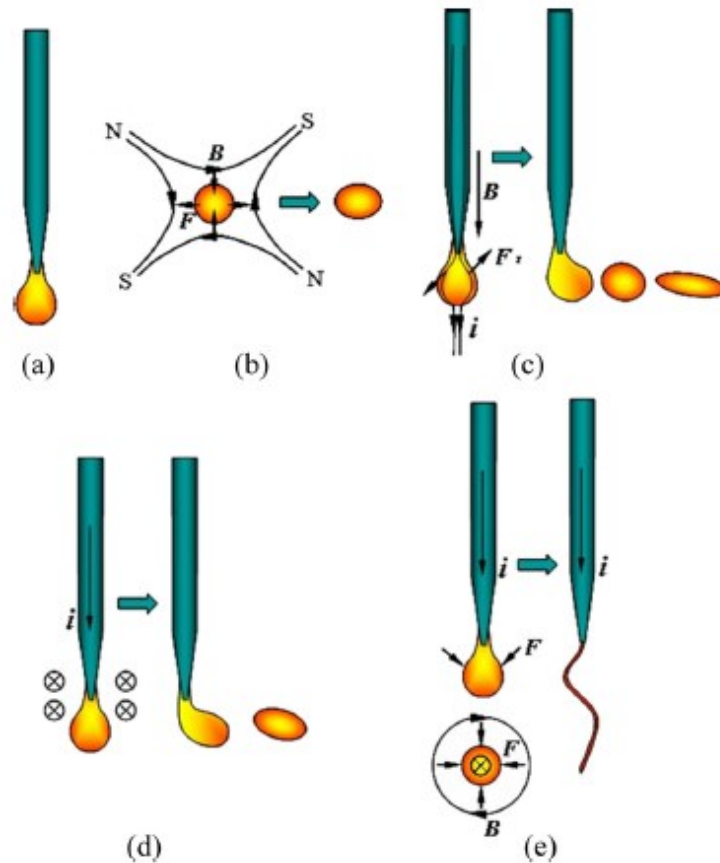
Basicamente, o trabalho de Camargo et al. [46] ratifica os argumentos apresentados anteriormente que relataram a necessidade, tanto dos direcionadores como do fluxo magnético, serem direcionados adequadamente para o arco e possuírem a densidade de fluxo suficiente para se conseguir os resultados pretendidos em um processo de soldagem.



(a) Condutores posicionados próximos ao arame eletrodo e (b) fluxos magnéticos atuando próximos aos condutores

Figura 2.36: Dispositivo indutor de fluxo magnético proposto por Camargo et al. Fonte: [46]

Wu et al. [37] utilizaram os mesmos indutores e condições de fluxo apresentados na seção 2.6 “Estudos sobre fluxo magnético direcionado para o arco elétrico” com o objetivo de estudar as influências do campo no processo GMAW. Este autores relataram que o campo magnético, conforme sua forma de aplicação (AMF, CMF, TMF, LMF e RMF, Figura 2.24), amplitude, frequência e intensidade, pode interferir nas características da transferência metálica facilitando o destacamento das gotas, porém, quando este processo trabalha com tocha de duplo arame e, no respectivo estudo posicionados em TANDEN, os campos magnéticos gerados pelos respectivos arcos, interagem e, quando mal sincronizados nas condições de pulso, podem não só repelir as gotas para fora da região de soldagem (aumento expressivo de respingos) como causar instabilidades no processo e até extinguir o arco. Na Figura 2.37 pode ser visto a representação das gotas sendo transferidas.



(a) Sem influência de fluxo magnético externo, (b) o formato da gota altera-se por consequência do fluxo magnético CMF, (c) fluxo magnético AMF melhora o destacamento das gotas, mas as projeta para fora por motivo de forças rotacionais do próprio fluxo magnético, (d) fluxo magnético LMF e/ou TMF, causando o lançamento lateral das gotas e (e) fluxo magnético RMF, que causa o alongamento da gota no sentido longitudinal da transferência metálica

Figura 2.37: Influência do campo magnético externo quanto à transferência metálica no processo GMAW com duplo arame. Fonte: [37]

Lee, Kim et al. [58] em experimentos realizados no processo GMAW com transferência por curto circuito também relataram haver alterações quanto às características da transferência metálica conforme interações de forças eletromagnéticas externas na soldagem. Estes autores notaram também que, conforme o teor de CO_2 na mistura, ocorrer maior geração de respingos e alterações de determinadas propriedades mecânicas do metal de solda está de acordo com maiores intensidades de campo magnético externo aplicado. Estes fatos reforçam o argumento de que o campo magnético induzido em uma soldagem pode ser benéfico, porém, necessita ser controlado adequadamente para cada condição de trabalho e processo.

2.8. Gás de proteção

Nesta etapa da revisão bibliográfica, os efeitos da movimentação do arco por meio de fluxo magnético externo serão referenciados com a proteção gasosa.

Scotti e Ponomarev [44], Modenesi [43] e outros autores [14 e 47-49] relatam a influência e necessidade da existência de um fluxo de gás ao redor do arame eletrodo e na região da poça de fusão para soldagens GMAW. Várias são as razões para isso, das quais se destacam a proteção da poça, ionização do gás, formação do jato de plasma, estabilização do arco, regulação da transferência metálica. Estas informações contribuem para aumentar a importância dada ao jato de plasma (conjunto formado por arco elétrico e gás ionizado) como sendo um dos principais responsáveis pelo deslocamento do arco sob influência de fluxo magnético externo e adicionalmente, o calor, transferência metálica direcionada e outros fatores relatados.

Os gases de proteção mais utilizados na soldagem GMAW são: Argônio (Ar), Hélio (He), Dióxido de carbono (CO_2), Oxigênio (O_2) e suas misturas sendo que, cada qual apresenta suas vantagens e limitações. Para o aço carbono, comumente utilizam-se misturas entre Argônio (Ar) e Dióxido de carbono (CO_2), Argônio (Ar) e oxigênio (O_2) ou uma mistura ternária de Argônio (Ar), Dióxido de carbono (CO_2) e Oxigênio (O_2). A mistura Argônio e CO_2 é adequada para o uso industrial e em termos gerais, é a mais utilizada, Scotti e Ponomarev [44].

Nos modos por curto circuito ou globular as misturas gasosas usuais, para a soldagem GMAW, são: Argônio com 20% CO_2 , com 25% CO_2 e até 100% CO_2 . No modo de transferência goticular convencional, experimentalmente observa-se dificuldades para se conseguir estabilizar o processo com teores próximos a 20% CO_2 exceto quando a corrente atinge valores acima de 300A. Liskévych [48] e Soderstrom [54] relatam que maiores proporções de CO_2 presente no gás de proteção podem causar aumento da tensão superficial do metal líquido e isso seria uma das razões para que o teor deste gás limite a transferência metálica goticular. Zielinska et al. [55] em sua revisão da literatura mencionam que o coeficiente da tensão superficial do metal líquido muda quando influenciado por gases quimicamente ativos (por exemplo: oxigênio e dióxido de carbono) e isso diminui o coeficiente da tensão superficial do aço. Com isso o aumento do teor de oxidante no gás de proteção deveria facilitar a obtenção da transferência metálica goticular, mas os próprios autores mostram, por meio de seus experimentos, que isso acontece só para pequenas adições de CO_2 . Com estas informações, nota-se que a questão da porcentagem de CO_2 presente na mistura do gás de proteção pode facilitar ou não a transferência metálica.

A proposta deste trabalho foi utilizar arco GMAW pulsado (valor da corrente média abaixo do valor da corrente de transição) e baseando-se nas informações que foram reunidas nesta revisão bibliográfica, o teor de CO₂ na proteção gasosa não ultrapassou 20%, justamente para não haver limitações quanto à transferência metálica. Outra característica importante do CO₂ é quanto ao fornecimento de energia do arco para o metal de base. A utilização deste gás na mistura de proteção tende a formar uma poça de fusão com maior penetração lateral (quando comparado com o Argônio que tende a formar uma poça dediforme, ou seja, com maior penetração axial ao sentido do arco). Scotti e Ponomarev [44] relatam que tal energia é consequência da alta temperatura que o arco deve ter para compensar as perdas decorrentes da dissociação do CO₂ em CO e ½ O₂. Segundo estes autores, uma parcela desta energia é necessária para ionizar seus átomos e estes gases ionizados e/ou dissociados em contato com a poça de fusão se recombina liberando mais calor neste local, o que justifica maiores penetrações conforme maiores teores de CO₂ na mistura. Este efeito térmico cujo valor se transfere para a peça representa a energia que o gás teve de absorver para passar do estado gasoso, à temperatura ambiente, para o estado de plasma (processo endotérmico). Quanto maior o potencial de ionização, maior a entalpia (quantidade de calor absorvido ou liberado em uma reação química). Se o gás precisar se dissociar antes de ionizar, maior ainda será a entalpia. Ao retornar para o estado gasoso, o gás, antes ionizado, “transfere” este calor para a poça “relativamente fria” (processo exotérmico). Consequentemente conforme maior teor deste gás na mistura haverá maior demanda de tensão e corrente elétricas para manter a estabilidade do arco.

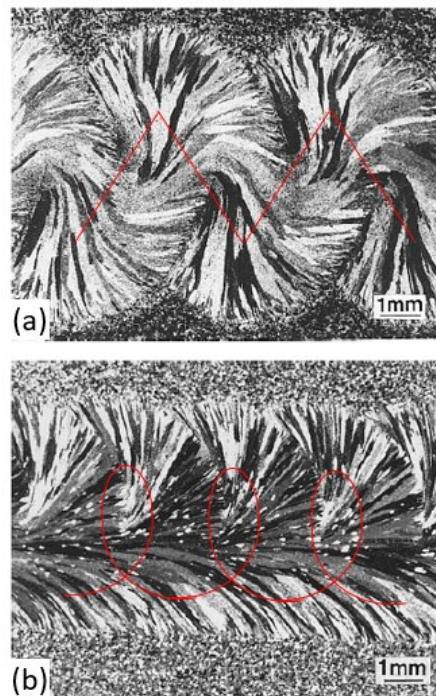
Foi relatado nesta revisão bibliográfica que a ação do fluxo magnético que deflete o arco causa um aumento no seu comprimento, o que demanda maior energia para mantê-lo estável. Portanto, para uma maior amplitude de deflexão do arco serão necessários maiores tensão e corrente elétricas. Com maior teor de CO₂ na mistura o arco também requer maior energia. Portanto espera-se que, no modo pulsado, uma condição adequada entre teor de CO₂, intensidade de fluxo magnético, tensão e corrente média de soldagem sejam estabelecidas.

2.9. Formação do metal de solda em função da oscilação magnética

A utilização de oscilação magnética do arco normalmente está associada a aspectos relacionados com a produtividade, homogeneidade da distribuição de calor, controle das condições de solidificação e controle da penetração do cordão.

Embora o assunto tratado nesta tese não seja a metalurgia torna-se interessante relatar que Ram, Murugesan e Sundaresan [50] utilizaram a oscilação magnética no processo GTAW para soldagens de ligas de alumínio e identificaram melhorias nas características metalúrgicas da união. As análises feitas por estes autores apresentaram, basicamente, ser possível promover o refinamento de grãos na zona fundida. A liga ganhou maior ductilidade, resistência à ruptura e maior vida à fadiga. Estes autores utilizando amplitude de oscilação de 0,2 mm e 0,8 mm com frequências de 1, 2.5, 5, 7.5, 10 e 20Hz, transversal e longitudinalmente ao sentido de soldagem com tipo de onda quadrada. Estas informações levam a crer que a utilização da oscilação magnética durante a soldagem apresenta um certo potencial quanto a promover o controle das propriedades metalúrgicas de uma união soldada entre materiais ferrosos. Porém, estudos mais adequados necessitam ser realizados e como já foi mencionado esta tese não tratará de propriedades metalúrgicas.

Kou [51] no processo GTAW utilizando frequência de 1 Hz produziu cordões em ligas de alumínio conforme é mostrado na Figura 2.38. Nas macrografias pode ser observado arranjos granulares diferentes conforme o padrão de oscilação que foi aplicado. Trata-se, a exemplo dos estudos realizados por Ram [50], de um registo quanto aos efeitos da movimentação do arco/poça que podem ocorrer em função da aplicação da oscilação magnética controlada na região do cordão.



(a) Oscilação transversal e em (b) oscilação circular

Figura 2.38: Estrutura granular de cordões produzidos com oscilação do arco em ligas de alumínio. Fonte: [51]

Baseado no que foi apresentado por estes autores, talvez alterações nas propriedades metalúrgicas e/ou mecânicas possam ocorrer também em ligas ferrosas, porém, estudos adequados deverão ser realizados antes de qualquer afirmação.

Em suma, esta revisão bibliográfica procurou reunir informações pertinentes aos fatores correlacionados com a oscilação magnética aplicada em processos de soldagem, cada qual com sua importância no sentido de contribuir para o objeto de estudo desta tese. Contudo, foram citados aqui, aqueles compreendidos como sendo de maior relevância quanto a deposição de metal de adição em um determinado local para formar uma poça de fusão adequada, controlar o tempo de atuação da fonte de calor (arco), sua intensidade, posição e forma de interação para que um cordão de soldagem seja bem-sucedido.

3. Materiais e Equipamentos

3.1. Materiais

O metal de base usado em ambos os processos foi o aço carbono ASTM A36.

As soldagens GTAW foram realizadas em placas de teste com espessura de $5,0\pm 0,5$ mm, comprimento 230 ± 5 mm e largura 100 ± 5 mm.

Argônio puro em cilindro de 10 m^3 de capacidade de armazenamento foi utilizado como gás de proteção. A tocha de soldagem foi montada para trabalhar com eletrodo de Tungstênio puro com 2,4 mm de diâmetro e bocal cerâmico de corpo reto, modelo TN26, nº 10.

Nas soldagens GMAW utilizou-se arame AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm acondicionado em bobina de 18 kg marca Belgo Bekaert. Os gases de proteção Ar-20%CO₂, Ar-18%CO₂ e Ar-4%CO₂ que foram utilizados estavam em cilindro de $9,4\text{ m}^3$ de capacidade de armazenamento.

Os cordões sobre chapa foram realizados em placas de teste com espessuras de $5,0\pm 0,5$ mm, comprimento 230 ± 5 mm e largura 100 ± 5 mm.

Para os testes em peças chanfradas estas foram adquiridas na forma bruta de laminação e após usinagem apresentaram dimensões de 55 ± 3 mm de largura, 250 ± 2 mm de comprimento. Uma determinada quantidade de peças foi preparada até chegar na espessura de $16\pm 0,5$ mm e uma outra quantidade foi usinada até alcançar $12\pm 0,5$ mm de espessura.

3.2. Equipamentos

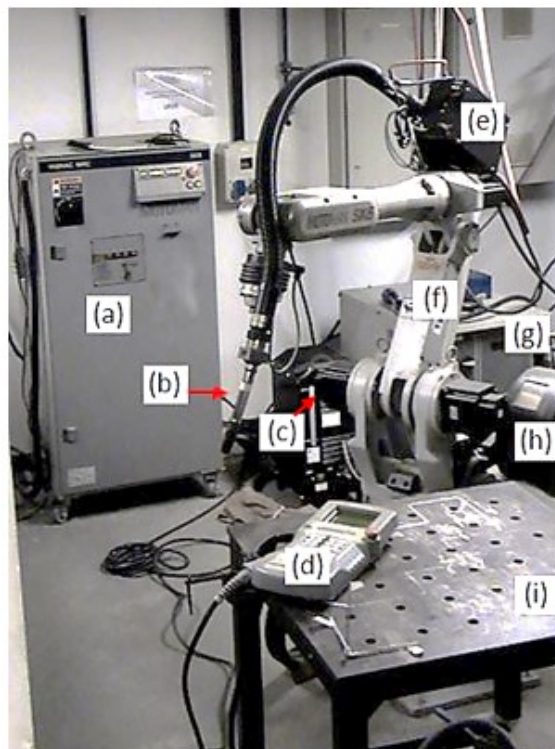
3.2.1. Fontes para soldagem

Para as soldagens no processo GTAW foi empregada uma fonte multiprocessos com controle eletrônico, modelo Master TIG 2500W do fabricante KEMPPPI, Figura 3.1.



Figura 3.1: Fonte utilizada nas soldagens GTAW. Fonte: Fonte: www.graysonline.com, 2020
Disponível em: <https://res3.graysonline.com/handlers/imagehandler.ashx?t=sh&id=4859078&s=n&index=0&ts=635289652279070000>, acessado em 23/11/2020

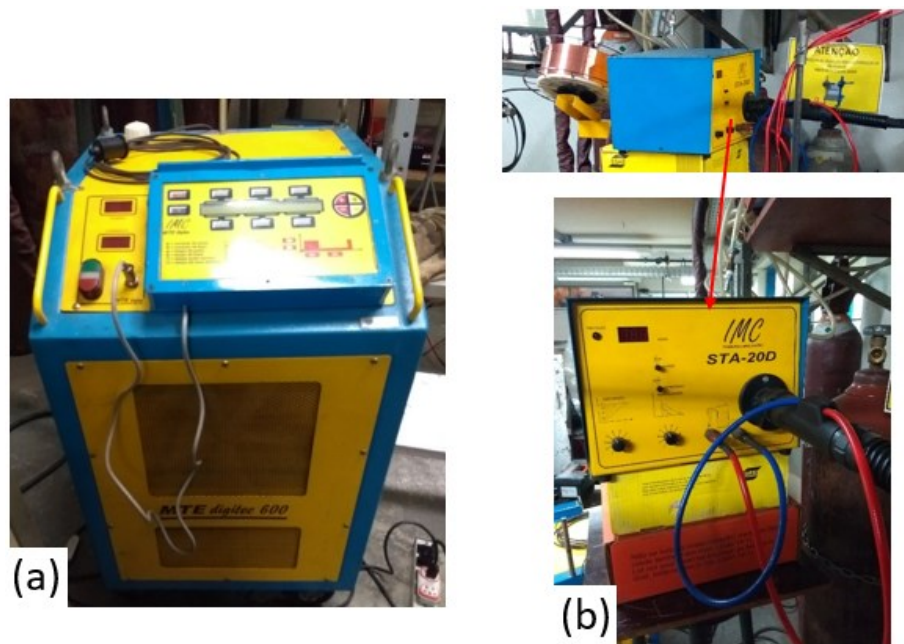
Para as soldagens GMAW no modo de transferência por curto circuito foi empregada uma fonte de tensão constante do tipo transformador/retificador modelo MotoArc 450 da marca MOTOMAN e um robô antropomórfico com 6 graus de liberdade modelo SK 6 do mesmo fabricante. Este conjunto é mostrado na Figura 3.2.



(a) Painel central, (b) tocha de soldagem GMAW, (c) trocador de calor (refrigeração a água), (d) pendant, (e) alimentador de arame com dupla roldana, (f) manipulador robótico, (g) fonte de tensão constante, (h) magazine para carretel de arame e (i) mesa de trabalho

Figura 3.2: Conjunto, fonte e robô antropomórfico, marca MOTOMAN modelo SK6

As soldagens GMAW pulsada foram realizadas utilizando uma fonte de soldagem multiprocessos da IMC modelo MTE DIGITEC 600 com controle eletrônico podendo ser configurada para trabalhar com imposição de corrente (pulsar a corrente) ou com tensão constante. Com fator de serviço 100% o fabricante deste equipamento informa poder operar com até 350 A, ao pulsar a corrente recomenda não ultrapassar 300 A e no modo tensão constante recomenda utilizar valores superiores a 10 V. Em conjunto com este equipamento foi utilizado um alimentador de arame de duas roldanas STA 20D do mesmo fabricante, Figura 3.3.

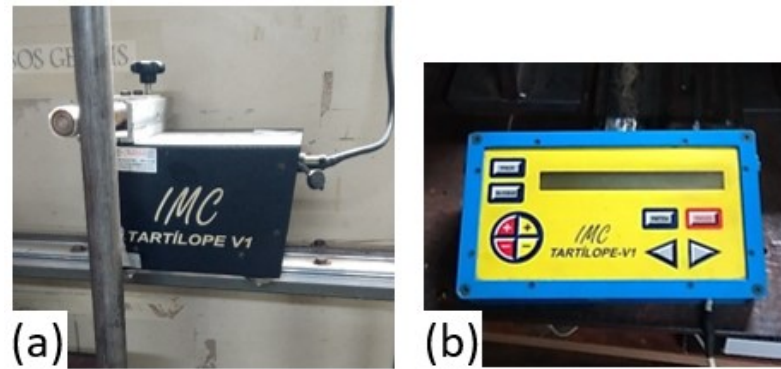


(a) Fonte de soldagem, (b) alimentador de arame

Figura 3.3: Fonte e alimentador de arame utilizados nas soldagens GMAW pulsada

3.2.2. Sistema para deslocamento da soldagem

A mecanização das soldagens GTAW e GMAW pulsada foi feita por meio de um sistema de deslocamento do corpo de prova com velocidade constante, modelo TARTILOPE V1 da IMC, velocidade máxima de trabalho 140,5 cm/min, Figura 3.4.



(a) Carro movimentador e (b) o painel de controle

Figura 3.4: Sistema de deslocamento da tocha com velocidade constante

3.2.3. Eletroímãs para a deflexão do arco de soldagem

Bobinas ATOS com 30W de potência, tensão máxima de alimentação de 24V (contínua) com fator de serviço 100% da ACT Sistemas Hidráulicos foram empregadas como fonte de indução eletromagnética para promover a deflexão do arco, Figura 3.5.

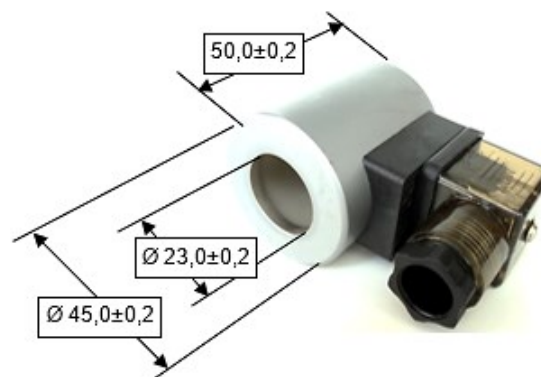


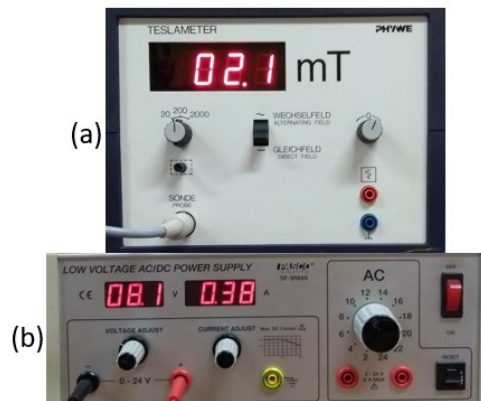
Figura 3.5: Indutores eletromagnéticos, bobinas 24V DC. Dimensões em milímetros

3.2.4. Sistema oscilador magnético

Um sistema de alimentação e controle da tensão que é fornecida para as bobinas foi projetado e construído especialmente para este trabalho com a função de sincronizar o campo magnético que é produzido. Seus módulos de potência e controle, que atuam nos eixos “X” e “Y”, permitem regulagens independentes da frequência (Hz), amplitude (V), fase (rad) e offset (%). Detalhes deste sistema são apresentados da seção 4.1 da Metodologia.

3.2.5. Fonte variável e Teslômetro

Uma fonte variável de dois canais, modelo SF 9584 A, do fabricante PASCO que alimentou as bobinas e um Teslômetro do fabricante PHYWE, com 3 faixas de medições (entre 0-20mT; 0-200mT e 0-2000mT) foram utilizados para as medições dos campos magnéticos e calibração da intensidade do campo magnético gerado pelo sistema de oscilação do arco. Na Figura 3.6 é mostrado o conjunto Teslômetro e fonte de tensão variável.



(a) Teslômetro e (b) fonte de tensão variável

Figura 3.6: Teslômetro e fonte de tensão variável

3.2.6. Osciloscópio

Um osciloscópio de quatro canais modelo TPS 2024B fabricado pela TEKTRONIX foi utilizado para monitorar o padrão de tecimento que foi gerado pelo sistema oscilador magnético, Figura 3.7.

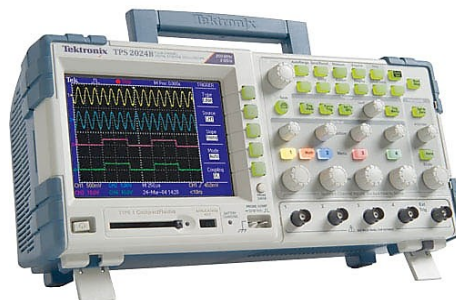
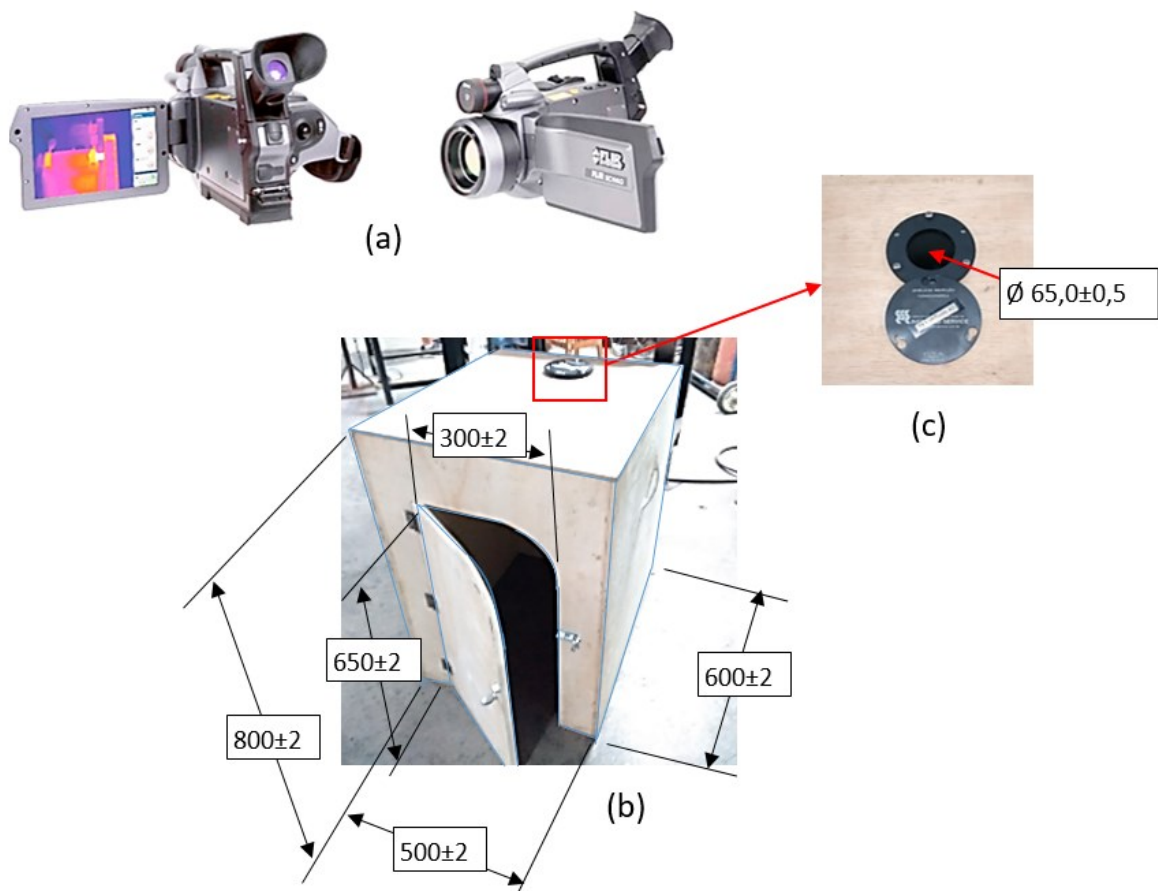


Figura 3.7: Osciloscópio TEKTRONIX modelo TPS 2024B. Fonte site tectronix.com, 2020 Disponível em: <<https://www.tek.com/oscilloscope/tps2000>>, acessado em 23/11/2020

3.2.7. Filmadora Termográfica e Câmara escura

A filmadora termográfica FLIR SC660 - infravermelho, escala de trabalho entre -40°C e $1500^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, resolução de 640×480 pixels, lente de distância focal de 19 mm, campo de visão (FOV) $45^{\circ} \times 34^{\circ}$ e banda do espectro de radiação $7,5$ à $13 \mu\text{m}$ (infravermelho) foi utilizada para registrar os campos de temperatura no reverso dos cordões durante as soldagens GMAW com transferência por curto circuito. Esta filmadora foi devidamente acondicionada dentro de uma câmara escura (construída especialmente para os testes) na qual foi instalada uma janela de inspeção termográfica do fabricante JIT modelo 75-AL, Figura 3.8.



(a) Filmadora termográfica (foto obtida do manual da câmera), (b) câmara escura e (c) janela de inspeção termográfica

Figura 3.8: Filmadora termográfica, câmara escura e janela termográfica

3.2.8. Filmadora para vídeos em alta velocidade

Uma câmera de vídeo de alta velocidade modelo 8002, Miro LAB 110 da PHANTOM e uma lente macro série INFINITY, modelo KC da Boulder, foi empregada para serem obtidas imagens durante as soldagens GMAW no modo de transferência pulsada, Figura 3.9.



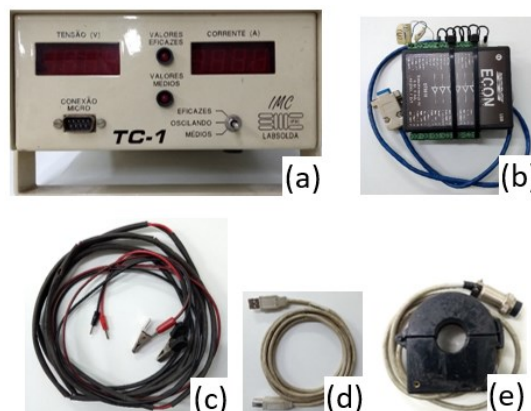
(a) Câmera PHANTON e (b) lente INFINITY

Figura 3.9: Câmera PHANTOM para filmagens de alta velocidade e lente macro INFINITY.

Fonte: (a) site phantomhighspeed.com, disponível em: <<https://elma-instruments.no/produktter/phantom-lab-310-2.aspx>>, acessado em 23/11/2020 e (b) foto do produto tirada pelo próprio autor

3.2.9. Sistema de aquisição de dados

Um sistema aquisição de dados composto, basicamente, por um medidor de tensão e corrente modelo TC-1 da IMC, um Data Logger modelo DT 9816 da ECON e um sensor Hall foram utilizados para monitorar a corrente, a tensão de soldagem e as tensões de alimentação das bobinas nas soldagens GMAW pulsado, Figura 3.10.



(a) Medidor de tensão e corrente de soldagem, (b) Data Logger, (c) cabo de tensão, (d) cabo de transferência de dados e (e) sensor Hall

Figura 3.10: Sistema de aquisição de dados

4. Metodologia

4.1– Desenvolvimento do sistema para deflexão magnética do arco

4.1.1– Fonte de alimentação e controladores

4.1.2– Direcionadores de fluxo magnético

4.1.3– Calibração do sistema

4.2– Testes de soldagem em caráter exploratórios.

4.2.1– Soldagem GTAW autógeno sobre chapa

4.2.2– Soldagem GMAW com transferência por curto circuito sobre chapa

4.2.3– Soldagem GMAW pulsado sobre chapa

4.3– Soldagem GMAW pulsado em corpos de prova chanfrados

4.1. Desenvolvimento do sistema para deflexão magnética do arco

Para este estudo, um equipamento controlador de fluxo magnético precisou ser especialmente projetado e construído para defletir e orientar o arco de soldagem. Resumidamente, este protótipo é constituído por fontes e controladores da tensão elétrica que alimentam dois pares de bobinas. Cada par compõe um eixo de uma disposição ortogonal, onde, no eixo “X” estão os eletroímãs responsáveis pelo campo magnético que atua transversalmente ao sentido de soldagem e em “Y” estão aqueles que atuam longitudinalmente.

4.1.1. Fonte de alimentação e controladores

O sistema oscilador magnético é apresentado na Figura 4.1 por meio de um diagrama de blocos. Os componentes que integram o módulo de potência e controle do aparelho permitem alimentar cada eletroímã com tensão variável segundo ondas de formato senoidal, triangular ou quadrada. Este módulo também permite especificar a frequência das ondas (de 0,1 Hz até 4,5 Hz), suas amplitudes (até 24 V) e ângulo de fase (de zero até π rad). Além disso, é possível atuar na simetria (até 90% em intervalos de 10%) e offset (deslocamentos relativos entre os eixos) de até 12V em cada eixo. É importante salientar que, cada um desses

parâmetros pode ser alterado independentemente para cada eixo e, com este sistema, é possível alimentar as bobinas de forma a produzir campos magnéticos variáveis que atuam no arco elétrico.

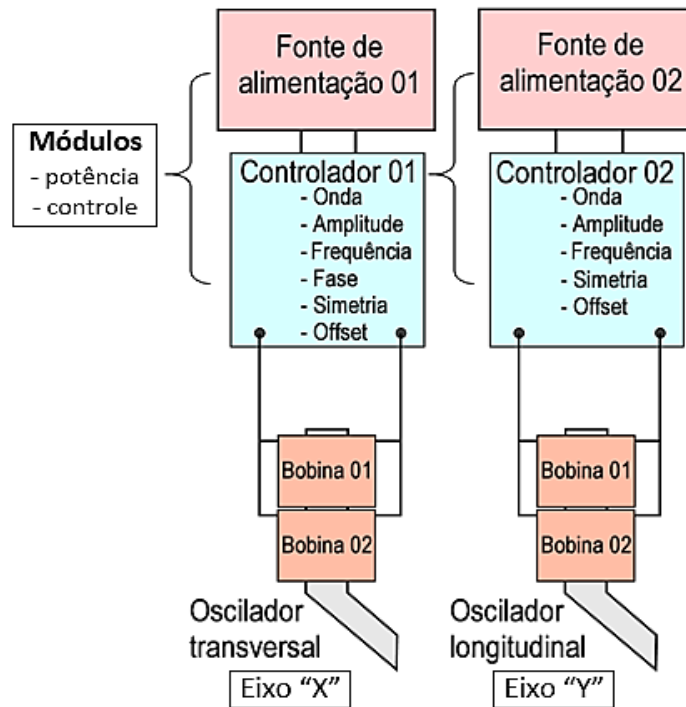


Figura 4.1: Diagrama do equipamento de oscilação magnética do arco

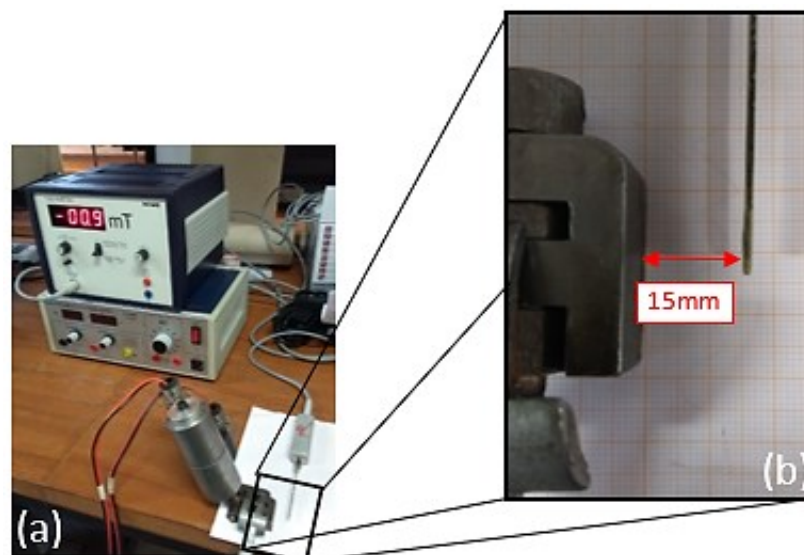
4.1.2. Direcionadores de fluxo magnético

O componente denominado direcionador de fluxo magnético, que também foi projetado e construído especialmente para este trabalho, é um conjunto de peças que se articulam entre si. Este conjunto é formado por um núcleo ferromagnético (instalado no interior de um par de bobinas), um direcionador de fluxo e um painel frontal. Cada conjunto desses corresponde a um respectivo eixo (“X” ou “Y”), portanto, dois conjuntos completos foram fabricados. Conforme relatado na Seção 2.4.1, o núcleo ferromagnético de um eletroímã é capaz de conduzir energia eletromagnética para uma região afastada da bobina. Então, o objetivo deste componente foi direcionar a maior quantidade possível de fluxo magnético para a região do arco.

Conforme foi relatado ao longo da Revisão Bibliográfica, o material mais indicado para este fim é o aço silício, contudo, fabricar um núcleo artesanalmente, estimando-se conter aproximadamente 78 lâminas não foi viável. Sendo assim, o conjunto de peças que formaram os respectivos núcleos foram fabricadas em unidades maciças de aço carbono ASTM A36.

4.1.3. Calibração do sistema

Para a calibração do sistema, foi usado o Teslômetro com o qual foram medidas as densidades de campo magnético produzidos por cada eletroímã do oscilador com diferentes níveis de tensão constante de alimentação. Primeiramente, a tensão de alimentação nos eletroímãs foi produzida pela fonte variável PASCO e para cada valor aplicado efetuou-se a medição do campo gerado por cada bobina. Em uma segunda etapa procedeu-se da mesma forma, porém, alimentando-se duas bobinas (em paralelo) com os mesmos valores de tensão constante e mediu-se os campos magnéticos produzidos. Na terceira etapa de medição, estes procedimentos foram executados empregando o próprio sistema oscilador que foi criado para comparar o seu desempenho com o obtido utilizando a fonte de laboratório. Com estes dados foram produzidos os gráficos de calibração que são apresentados na seção 5.1.3 do Resultados e Discussões. As medições foram feitas posicionando-se a ponta de prova do Teslômetro a 15 mm de distância do painel frontal do núcleo de cada eletroímã conforme é mostrado na Figura 4.2. A mesma distância foi usada entre os eletroímãs e o arame eletrodo nas soldagens GMAW. Para os ensaios exploratórios que foram realizados no processo GTAW, os eletroímãs foram posicionados a uma distância de 23 mm do eletrodo no sentido do eixo “X” e/ou no sentido do eixo “Y” ao invés de 15 mm. As medições do campo com distância de 23 mm não foram realizadas por se tratar da aplicação em soldagens GTAW a qual não é o contexto principal desta tese.



(a) Medidor de densidade de fluxo magnético (Teslômetro) e em (b) ampliação da região de medição

Figura 4.2: Bancada de testes para a medição da densidade de fluxo

4.2. Testes de soldagem em caráter exploratórios

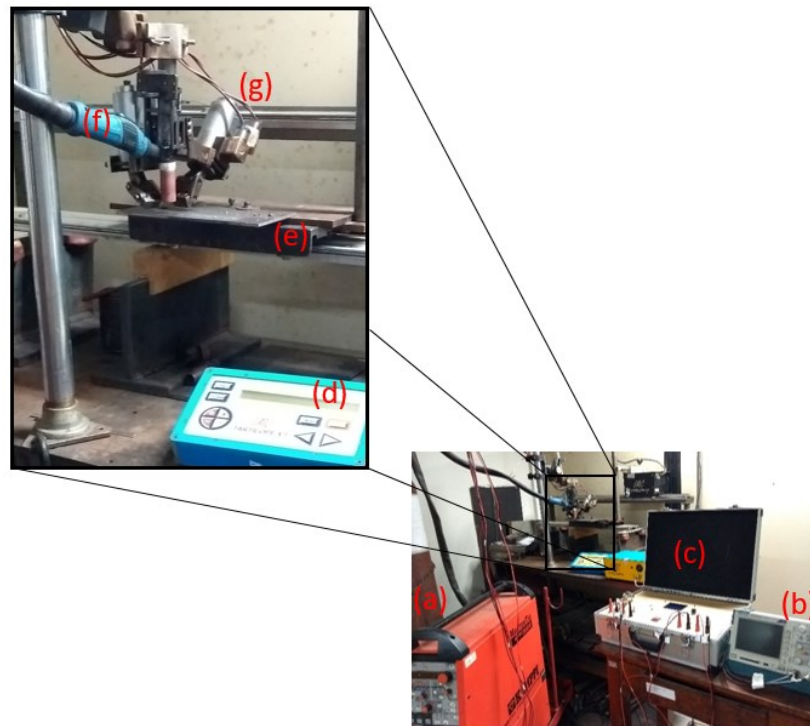
Antes da execução dos cordões em chanfro, como é a proposta desta tese, buscou-se melhor entendimento sobre as interações entre a imposição de fluxo magnético externo na soldagem e fatores como: amplitude, frequência, velocidade de soldagem, formação do cordão, influência do gás de proteção sob efeito de fluxo magnético externo e gradientes térmicos conforme o padrão de tecimento aplicado. Nesta etapa estudou-se, em caráter inteligível, os efeitos da oscilação magnética quando aplicada em diferentes processos, visto que, ao longo da Revisão Bibliográfica, foram relatados resultados diversos envolvendo a imposição de fluxo magnético em soldagens.

Para estes ensaios utilizou-se tecimentos seguindo Figuras de Lissajous “Meia Lua”, “Circular” e “Deslocamento Lateral” as quais entende-se como sendo formas geométricas comumente aplicadas por soldadores. Esta prática também serviu para comprovar que foi possível atender a uma das premissas deste trabalho que é a de se reproduzir padrões de tecimento semelhantes aos que soldadores praticam.

4.2.1. Soldagem GTAW autógeno sobre chapa

Estes testes foram realizados para se avaliar a capacidade do sistema em oscilar o arco em condições simples, isto é, sem transferência de metal e com distância da ponta do eletrodo à peça mantida constante. As soldagens GTAW foram produzidas sobre chapa, na posição plana, de forma autógena, com vazão de gás de proteção (Argônio puro) de $10 \pm 0,5$ l/min, corrente de 120 A, distância entre a ponta do eletrodo e metal base com 7 ± 1 mm, velocidade de soldagem de 1,4 mm/s e com a tocha posicionada verticalmente em relação à superfície do cordão. Estas foram realizadas em placas de teste com largura de 100 ± 5 mm, comprimento de 230 ± 5 mm e espessura de $5,0 \pm 0,5$ mm. Após a obtenção de 3 cordões sem e mais 3 com cada um dos padrões de oscilação magnética que são apresentados na Tabela 5.1 da seção Resultados e Discussões, foram feitas comparações visuais, registros fotográficos da superfície dos cordões contendo uma escala e macrografias. Com estes registros foram feitas 3 medições de largura, intervalos das frentes de solidificação e profundidade de penetração de cada uma das soldas. Estas medições serviram para revelar os efeitos do movimento imposto ao arco elétrico seguindo características geométricas das Figuras de Lissajous que foram aplicadas nos testes.

As soldagens GTAW foram realizadas utilizando a bancada de testes conforme é apresentado na Figura 4.3. Os testes foram feitos mantendo-se a tocha fixa e deslocando-se a placa de teste com velocidade constante. Este procedimento teve a intenção de evitar interferências mecânicas no processo, tais como vibrações, angulações indesejadas da tocha ou desalinhamentos, as quais poderiam influenciar nos resultados do estudo da oscilação magnética controlada imposta ao arco.



(a) Fonte eletrônica KEMPPI, (b) osciloscópio, (c) sistema “Oscilador Magnético”, (d) sistema deslocamento TARTÍLOPE V1, (e) placa de teste, (f) tocha para processo GTAW e (g) eletroímãs

Figura 4.3: Arranjo físico da bancada de testes para as soldagens GTAW

4.2.2. Soldagem GMAW com transferência por curto circuito sobre chapa

Nesta etapa de testes exploratórios aplicou-se a oscilação magnética controlada no processo GMAW com transferência por curto circuito. Por meio destes ensaios avaliou-se o desempenho do sistema de oscilação nessa forma de transferência de metal que é caracterizada por comprimento de arco variável e em média, curto. Essa forma de transferência metálica ainda é a mais usada na indústria, sendo comum, por exemplo, durante a realização do passe de raiz em tubulações.

As soldagens foram realizadas sobre chapa, utilizando o robô e a fonte MOTOMAN, placas de teste com largura de 100 ± 5 mm, comprimento de 230 ± 5 mm, espessura de $5,0\pm 0,5$ mm e na posição plana.

Diversos ensaios foram realizados sem a aplicação da oscilação magnética até serem adotados parâmetros que resultaram em soldagens estáveis. Considerou-se como critério avaliativo de estabilidade do processo, a obtenção de cordões com largura uniforme de aproximadamente 8,0 mm, baixa quantidade de respingos e nenhuma interrupção no processo ao longo de 150 ± 5 mm. Esta condição foi alcançada com os seguintes parâmetros: distância do bico de contato à peça (DBCP) de 17 mm, tensão e correntes médias de operação de aproximadamente 18 V e 165 A, respectivamente, velocidades de soldagem de 4,2 mm/s e vazão da mistura do gás de proteção Ar-20%CO₂ a 15 ℓ /min.

Posteriormente, com estes parâmetros, introduziu-se um padrão de oscilação ao processo. Desta forma, foram produzidos novos cordões buscando-se identificar nas superfícies destes indícios do efeito do movimento imposto ao arco elétrico comparando-se as soldas produzidas com e sem oscilação do arco. As comparações foram realizadas por meio de medições de largura e características geométricas.

O padrão de oscilação que foi utilizado é apresentado na Tabela 5.3 da seção Resultados e Discussões.

Com este mesmo modo de transferência foram feitos outros 4 testes exploratórios com os mesmos parâmetros (DBCP=17 mm, 18 V, 165 A, proteção Ar-20%CO₂ a 15 ℓ /min), porém, alterando a velocidade de soldagem para 4,8 mm/s e impondo-se outros padrões de oscilação ao arco, ver a Tabela 5.5 na seção Resultados e Discussões. Basicamente, alterar a velocidade de soldagem de 4,2 mm/s para 4,8 mm/s objetivou analisar, não apenas características visuais ou dimensionais presentes na superfície dos cordões, mas também evidências térmicas relacionadas à poça de fusão e comprovações da eficiência da oscilação magnética imposta ao processo.

Por meio de filmagens com uma câmera termográfica registrou-se as medições das médias das máximas temperaturas encontradas nas regiões dos cordões. Também, maiores ou menores áreas de concentração de calor, ambas no verso da chapa onde foram depositadas as soldas produzidas sem e com oscilação magnética do arco.

Cada teste foi filmado durante aproximadamente 35 segundos a uma taxa de 5 quadros por segundo mantendo a lente da câmera a 300 mm de distância da placa de teste. Dentro deste período de tempo, previamente foram consideradas 120 imagens termográficas (24

segundos) obtidas ao longo da soldagem em regime estabilizado, ou seja, desconsiderou-se os trechos iniciais e finais de cada cordão. Além disso, como a janela termográfica possui diâmetro útil de 65mm, somente as 90 imagens registradas dentro deste percurso diametral (contidas entre os pontos de nº12 até nº101) foram consideradas para as análises das temperaturas médias e áreas com maior ou menor concentração de calor, Figura 4.4. Para as termografias foi utilizada a câmera termográfica FLIR SC660. O tratamento dos dados termográficos foi realizado com o *software* da própria câmera, chamado *FLIR Quick Report* que converte as imagens em valores numéricos que, por sua vez, foram transferidos para uma planilha de EXCEL na qual foi possível identificar em qual(is) PIXEL(s) está(ão) localizado(s) a(s) maior(es) temperatura(s) registrada(s) naquela termografia. As áreas foram analisadas por meio do *software Image J* aplicando-se o recurso de identificar os pontos pertencentes à faixa entre 450°C e 560°C.

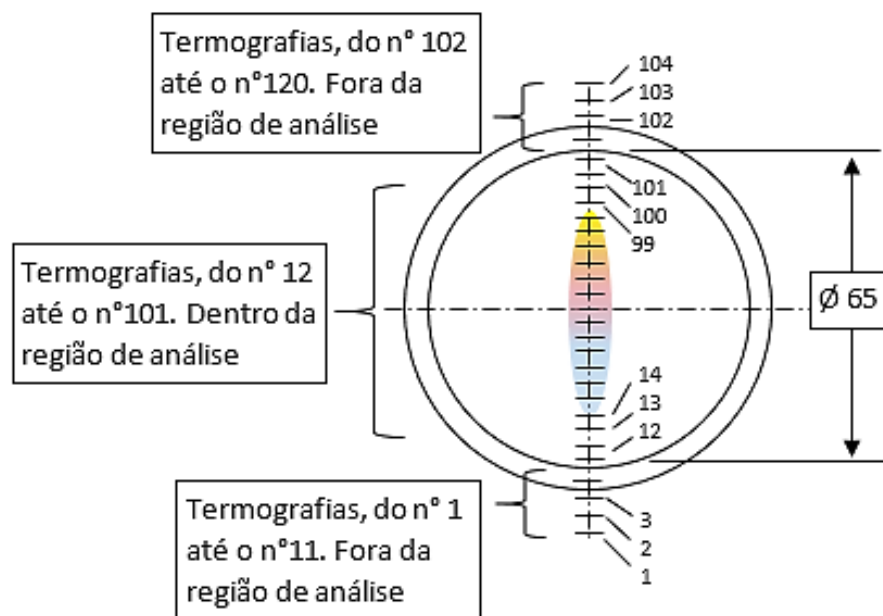
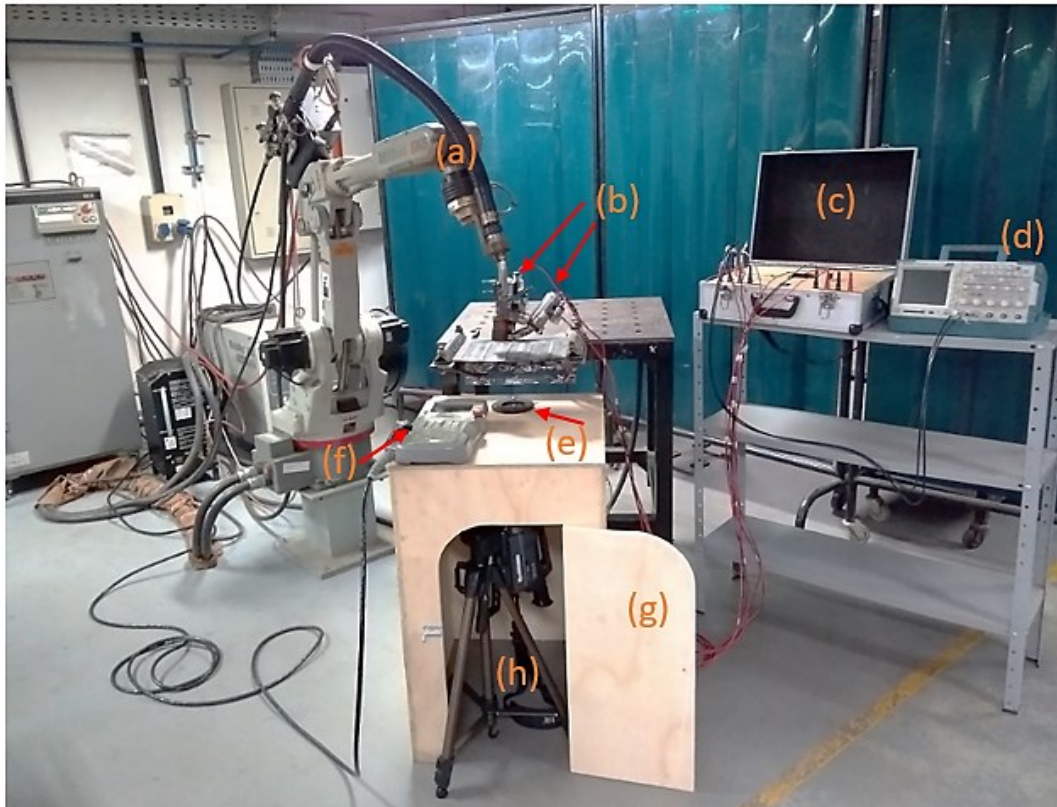


Figura 4.4: Termografias dentro do percurso diametral de 65mm, de nº12 até nº101

As soldagens GMAW por curto circuito foram realizadas utilizando a bancada de testes mostrada na Figura 4.5. Estes testes foram realizados mantendo a placa de teste fixa e deslocando a tocha com velocidade constante.



(a) Robô antropomórfico MOTOMAN modelo SK6, (b) conjunto bobinas/direcionadores de fluxo magnético, (c) sistema “Oscilador Magnético”, (d) osciloscópio, (e) janela de inspeção termográfica, (f) pendant do robô MOTOMAN, (g) câmara escura para a câmera termográfica e (h) câmera termográfica FLIR SC660

Figura 4.5: Arranjo físico da bancada de testes para as soldagens GMAW por curto circuito e filmagens termográficas abaixo das chapas

4.2.3. Soldagem GMAW pulsada sobre chapa

Após os testes realizados com transferência por curto circuito, outros ensaios foram feitos e, desta vez, com transferência pulsada. Este modo de operação permite trabalhar com valores médios de corrente similares aos do teste anterior usando maiores comprimentos de arco e com uma transferência de metal tipo spray (voo livre).

Conforme foi visto na revisão bibliográfica [47-49], também por serem recomendadas pelos fabricantes de consumíveis para o processo com modo de transferência por voo livre em soldagens de aços em geral e comumente encontradas no mercado, utilizou-se misturas de gás de proteção com concentrações inferiores a 20%CO₂.

Sendo assim, esta etapa dos estudos foi dividida em dois subgrupos, são eles:

4.2.3.1 – Seleção de uma mistura de gás de proteção

4.2.3.2 – Aplicação de diferentes padrões e amplitudes de oscilação magnética ao processo

4.2.3.1. Seleção de uma mistura de gás de proteção

Para as soldagens GMAW pulsadas, foi utilizada a fonte DIGITEC 600 e testou-se duas diferentes proteções gasosas; uma contendo Ar-18%CO₂ e a outra contendo Ar-4%CO₂. Com esses gases, previamente, algumas soldagens foram feitas no modo sinérgico do equipamento, porém quando foi aplicada a oscilação magnética ao processo este passou a apresentar instabilidades e alta frequência de extinção do arco dificultando assim a continuidade dos estudos com esta configuração na fonte.

Soldagens mais estáveis foram obtidas com a fonte regulada para trabalhar no modo corrente (imposição da corrente, ou seja, corrente de pico “Ip”, corrente de base “Ib”, tempo de pico “tp”, tempo de base “tb” e velocidade de alimentação de arame “Va”). Para se conseguir boa estabilidade do processo utilizou-se as informações fornecidas pelo fabricante da fonte referentes a arame AWS ER70S-6 diâmetro de 1,0 mm. Contudo, ajustes foram necessários para se trabalhar com arame AWS ER70S-6 diâmetro de 1,2 mm. O comprimento do arco foi mantido em aproximadamente 5 mm em ensaios sem e com aplicação da oscilação magnética. Nestas condições, foi analisada a transferência metálica mantendo-se um comprimento de arco relativamente constante para definir qual gás de proteção ofereceria melhor estabilidade ao processo aplicando-se a oscilação magnética nas características operacionais deste trabalho. Os ensaios neste modo de transferência foram realizados na posição plana, sobre chapa de aço carbono ASTM A36. O metal de adição utilizado foi especificado na seção 3 Materiais e Equipamentos e, a fonte de soldagem foi a IMC eletrônica, configurada para GMAW pulsado com imposição de corrente. O processo foi mecanizado utilizando o sistema de deslocamento com velocidade constante, modelo TARTILOPE V1 do mesmo fabricante. Tanto para as soldagens como para as filmagens do arco foi determinado manter a tocha fixa e na posição vertical referente à superfície de soldagem enquanto a peça era deslocada. A corrente, a tensão de soldagem e as tensões de alimentação das bobinas foram registradas por meio do sistema de aquisição de dados modelo TC-1 da IMC. Os arquivos de dados obtidos foram analisados usando o programa SINAL desenvolvido no LRSS. Mediu-se, entre outros parâmetros, os valores médios de corrente e tensão de soldagem, os parâmetros de pulsação, a duração e

frequência das extinções do arco e a sua relação com a oscilação do arco elétrico. O osciloscópio da TEKTRONIX monitorou o padrão de tecimento aplicado.

Para algumas das condições avaliadas nos testes exploratórios, sem e com aplicação de oscilação magnética, foram feitas filmagens da região do arco utilizando a câmera de vídeo de alta velocidade da PHANTOM nas condições relatadas mais adiante nesta mesma seção.

Com estes recursos, além da transferência metálica, foi possível visualizar e medir o comprimento do arco que, conforme as referências bibliográficas [33-35], é uma das variáveis importantes a serem controladas no processo.

A tomada de decisão quanto ao gás de proteção a ser utilizado nas soldagens baseou-se nas informações adquiridas e analisadas conforme segue:

- Pouca ou nenhuma interferência no processo pulsado por conta de eventos de curto circuito e/ou extinção do arco, seção 5.4 dos Resultados e Discussões.

- Visualização das características gerais da deflexão do arco e o momento da transferência metálica para fora do eixo vertical do eletrodo por conta da ação da oscilação magnética, seção 5.4 dos Resultados e Discussões. Neste contexto, foram realizados aproximadamente 9 experimentos de caráter exploratórios com cada uma das misturas (18% de CO₂ e 4% de CO₂) e seus respectivos parâmetros constam na Tabela 5.6 da seção Resultados e Discussões, totalizando aproximadamente 36 testes.

Na primeira etapa de testes a oscilação magnética do arco foi produzida por sinais senoidais de tensão capazes de produzir uma Figura de Lissajous com formato de meia elipse vertical ("Meia Lua"), ver Figura 4.6. Para gerar tal Figura, as alimentações das bobinas foram mantidas em fase com uma relação entre as frequências (F_x/F_y) igual a 1/2 em que F_x é a frequência da alimentação do eletroímã responsável pela oscilação transversal do arco e F_y é a responsável pela oscilação longitudinal. A frequência de oscilação aplicada durante as soldagens foi de 0,5Hz. Para esta fase do trabalho foi mantida uma relação entre os valores médios quadráticos das tensões de alimentação dos eletroímãs (U_x/U_y) aproximadamente igual a 2, ou seja, a tensão aplicada no eixo "X" corresponde aproximadamente ao dobro daquela aplicada ao eixo "Y".

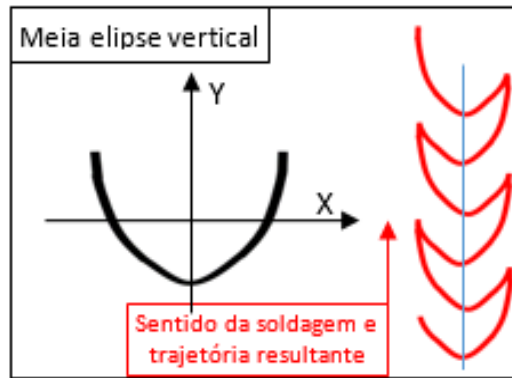
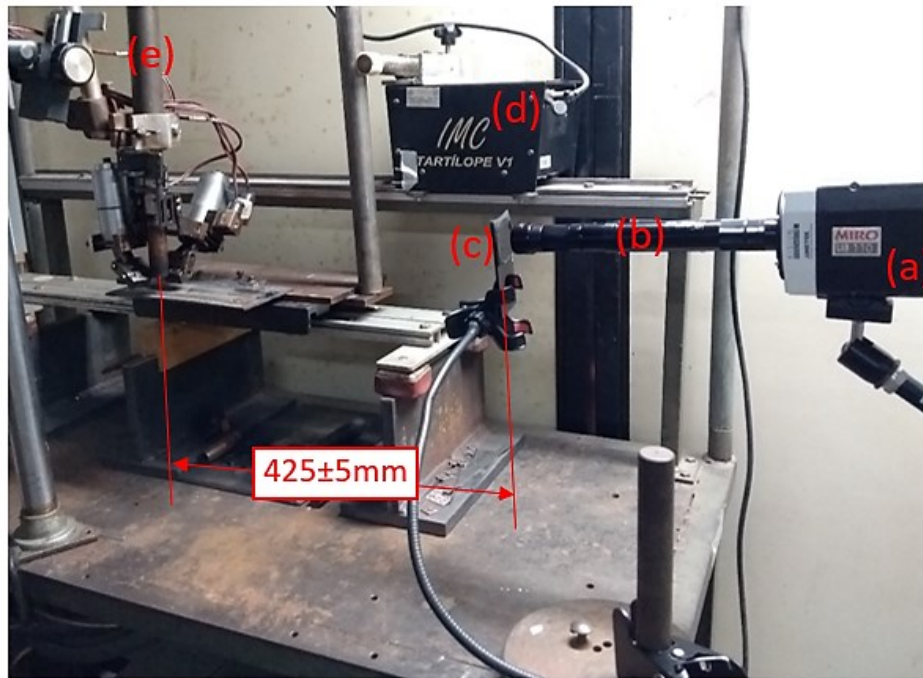


Figura 4.6: Figura de Lissajous em forma de meia elipse vertical (“Meia Lua”). Padrão de tecimento utilizado nos testes para selecionar uma das proteções gasosas, Ar-18%CO₂ ou Ar-4%CO₂

Os cordões também foram analisados visualmente buscando-se identificar em suas superfícies indícios do efeito do movimento imposto ao arco. As características geométricas na superfície dos cordões foram medidas em fotografias desses. Além disso, foi feita a aquisição de sinais elétricos com uma taxa de 3,6 kHz. Foram registrados os dados de corrente e tensão de soldagem e, também foram medidas as tensões de alimentação das bobinas dos dois eletroímãs. Os arquivos de dados obtidos foram analisados usando o programa SINAL desenvolvido no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulações - LRSS da UFMG.

Para auxiliar a tomada de decisão quanto ao gás de proteção a ser utilizado, foram feitas filmagens da região do arco estes sendo influenciados e não pela aplicação de oscilação magnética ao processo. Para tanto, foi usada a câmera de vídeo de alta velocidade da PHANTOM. A câmera e um filtro de proteção em soldagem n°10 foram posicionados a 425 ± 5 mm à frente da tocha, conforme é mostrado na Figura 4.7. Para manter a distância focal constante e também minimizar vibrações indesejadas durante as soldagens a tocha foi mantida fixa e a placa de teste foi deslocada com velocidade constante. As filmagens foram realizadas durante aproximadamente 3 segundos, com velocidade de filmagem 2100 quadros por segundo e tempo de exposição de $470 \mu\text{s}$ sem qualquer iluminação especial. Os vídeos foram obtidos com resolução de 1024x768 pixels e foram analisados com o programa PCC versão 2.7 da própria PHANTOM. Nas filmagens foi possível visualizar a pulsação de corrente, eventos de extinções do arco (quando aconteceram) e o direcionamento de gotas de metal fundido conforme a deflexão do arco.



(a) Câmera PHANTOM, (b) lente INFINITY, (c) filtro n°10, (d) sistema deslocamento TARTÍLOPE V1 e (e) tocha para processo GMAW

Figura 4.7: Montagem da bancada para as filmagens em alta velocidade dos testes GMAW pulsado

4.2.3.1. Aplicação de diferentes padrões e amplitudes de oscilação magnética ao processo

Uma vez definido o gás de proteção a ser utilizado iniciou-se uma segunda etapa de ensaios para analisar os efeitos da aplicação de diferentes padrões e amplitudes de oscilação magnética ao processo antes do seu emprego nas soldagens em chanfro. As informações foram registradas e analisadas conforme segue:

- Identificação de deposição localizada de metal de adição, existência de indícios da movimentação da poça de fusão, comparação da largura e análise visual da aparência externa dos cordões de solda. Os experimentos foram realizados sem e com a aplicação da oscilação magnética, seções 5.4.3 dos Resultados e Discussões.

As Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento e amplitudes utilizados nesta segunda etapa de testes constam na Tabela 5.8 da seção Resultados e Discussões.

Com estes ensaios foi possível identificar desvios na trajetória retilínea do cordão quanto à movimentação da poça de fusão combinando o padrão de oscilação somado ao deslocamento linear da soldagem. Adicionalmente, foram feitos testes no qual o arco foi defletido, com o campo magnético, apenas transversalmente ao sentido de soldagem. Com isso foi possível fazer uma comparação entre dois cordões com padrões de oscilação diferentes e avaliar efeitos dinâmicos do tecimento relacionados com a deposição localizada de metal de adição na formação de um cordão na soldagem GMAW pulsada. Para cada condição de teste foram feitos entre 3 e 5 ensaios de soldagem, totalizando aproximadamente 20 ensaios.

4.3. Soldagem GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados

Nesta etapa, foram realizados ensaios com o processo GMAW pulsado sem e com a aplicação da oscilação magnética controlada na realização do passe de raiz em peças chanfradas e acomodadas na posição plana. Para melhor organização dos testes que se seguiram esta etapa foi dividida em três subgrupos, são eles:

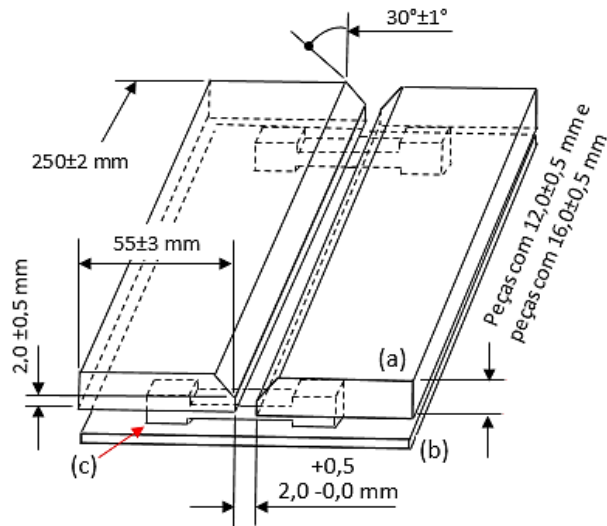
- 4.3.1 – Preparação e montagem de corpos de prova chanfrados
- 4.3.2 – Realização dos testes de soldagem
- 4.3.3 – Avaliação dos cordões obtidos

4.3.1. Preparação e montagem de corpos de prova chanfrados

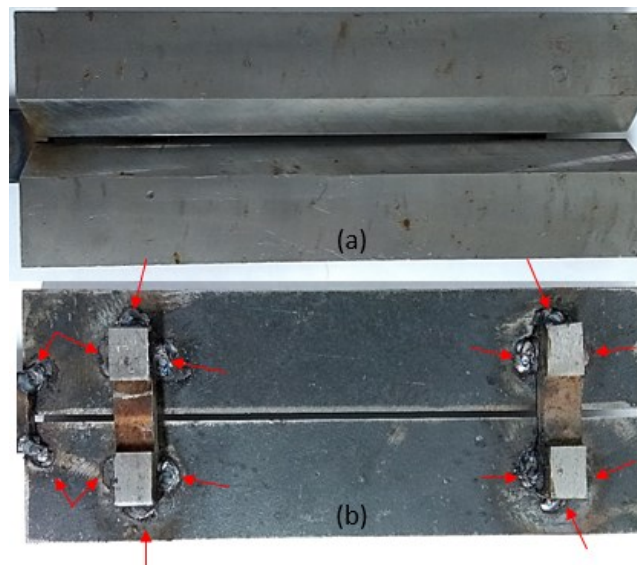
Corpos de prova foram preparados e montados de forma a simular duas situações práticas para este tipo de soldagem. A primeira delas seguindo as diretrizes das Normas AWS D1.1 (American Welding Society) e ANSI B31.4 (*American National Standards Institute*) as quais indicam afastamento com dimensão constante entre as faces de topo de uma junta e determinados ângulos de bisel.

Em síntese, o afastamento recomendado é de 1,2 a 1,6 mm e o ângulo do bisel (ângulo da usinagem em um lado de uma das peças que compõe a junta) para as uniões de topo é de 30° a 37°. Porém, fabricantes de consumíveis para soldagem, em determinados casos, informam sobre afastamentos com 2,0+0,5 mm ou mesmo maiores, conforme sejam as orientações da EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) e RQPS (Registro de

Qualificação de Procedimento de Soldagem). Para estas especificações e registros seguem-se recomendações, por exemplo, das Normas API STD 1104 (*American Petroleum Institute*) e ASME IX (*American Society of Mechanical Engineers*). Baseado nestas informações os corpos de prova foram montados conforme é apresentado na Figura 4.8 e Figura 4.9. Nestas figuras notam-se dois suportes travadores que serviram como elementos de fixação sendo eles soldados na face inferior do conjunto para garantir o distanciamento pretendido. Foram preparados conjuntos com espessuras iguais de $12,0 \pm 0,5$ mm e também com $16,0 \pm 0,5$ mm.



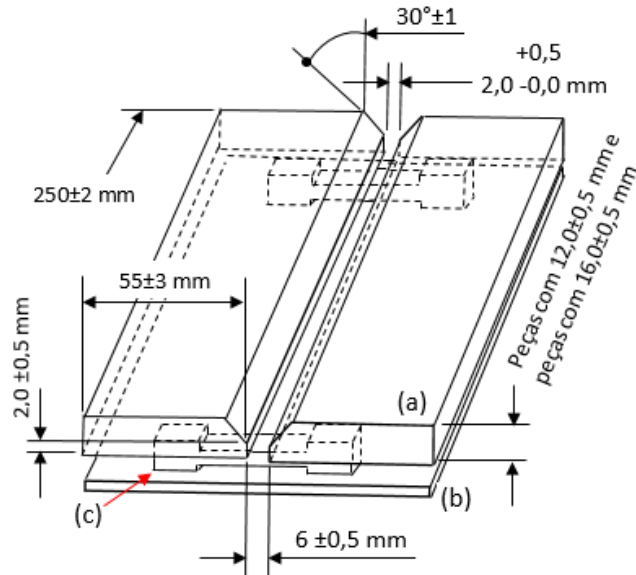
(a) Corpo de prova chanfrado, (b) base do dispositivo TARTÍLOPE V1 e (c) suporte travador
 Figura 4.8: Características dos corpos de prova para os testes do passe de raiz simulando afastamento constante entre as faces.



(a) Vista da face superior e (b) vista da face inferior dos corpos de prova

Figura 4.9: Detalhe dos suportes travadores que foram soldados na face inferior dos corpos de prova. As setas indicam os pontos de solda

Em outra condição, particularmente a que melhor representa o que acontece na prática, foram montados conjuntos que simularam o afastamento progressivo entre as faces da junta. Tal condição foi preparada de forma a posicionar as faces das peças com afastamento progressivo da abertura a qual iniciou com $2,0+0,5$ mm e finalizou com $6,0\pm 0,5$ mm. Nesta condição também foram preparados conjuntos com espessuras iguais de $12,0\pm 0,5$ mm e também com $16,0\pm 0,5$ mm, Figura 4.10.



(a) Corpo de prova chanfrado, (b) base do dispositivo de deslocamento, TARTÍLOPE V1 e (c) suporte travador

Figura 4.10: Características dos corpos de prova para os testes do passe de raiz simulando a abertura progressiva entre as faces

4.3.2. Realização dos testes de soldagem

As soldagens sem e com oscilação foram realizadas utilizando-se os parâmetros que constam na Tabela 5.6 (coluna $4CO_2 - 85 A$) da seção Resultados e Discussões.

Durante ensaios prévios que foram realizados, notou-se que as variáveis: ângulo do chanfro, espessura dos corpos de prova que estavam sendo utilizados nos testes, amplitudes de oscilação, e afastamento constante ou progressivo entre o topo das peças que estavam sendo unidas, tiveram influência nos resultados das soldagens em peças chanfradas. Estas influências são apresentadas e discutidas na seção Resultados e Discussões. Sendo assim, esta etapa necessitou ser dividida em outros subgrupos de estudos antes de se aplicar o tecimento ao processo seguindo quatro diferentes Figuras de Lissajous. Tais subgrupos são:

4.3.2.1 – Espessura dos corpos de prova e ângulo do chanfro

4.3.2.2 – Amplitude de oscilação

4.3.2.3 – Padrão de tecimento seguindo diferentes Figuras de Lissajous

4.3.2.1. Ângulo do chanfro e espessura dos corpos de prova

Inicialmente, estudou-se dois diferentes ângulos de chanfro na soldagem GMAW pulsada para passe de raiz sem e com atuação da oscilação magnética do arco. Estes foram formados com biseis de $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$ (iguais para cada face da junta) e também com $45^{\circ} \pm 1^{\circ}$, ambos com afastamento constante de $2+0,5$ mm entre as faces de topo. Para aquelas realizadas com oscilação magnética externa, adotou-se como tecimento a Figura de Lissajous “Meia Lua” (porque entende-se que esta é uma forma de tecimento comumente aplicada por soldadores) e espessura do corpo de prova com $12,0 \pm 0,5$ mm. A utilização dos ângulos dos biseis terem sido de 45° ao invés de 37° (como recomendam as normas) são melhor explicados na seção 5.5 dos Resultados e Discussões.

Posteriormente, neste mesmo subgrupo, foram ensaiados os corpos de prova com espessura de $16,0 \pm 0,5$ mm. A razão destes testes, basicamente, foi para identificar variações visivelmente significativas quanto ao preenchimento da junta e penetração do cordão para então ser definido uma das espessuras como padrão para a realização dos testes que se seguiram.

4.3.2.2. Amplitude de oscilação

Nestes ensaios, aplicou-se três valores diferentes de amplitudes. Os parâmetros de oscilação constam na Tabela 5.16 da seção Resultados e Discussões. Nas condições da referida tabela e tendo como base as referências bibliográficas [3] e [4] uma série de testes exploratórios variando-se as amplitudes dos eixos “X” e “Y” objetivaram evidenciar a deposição de metal de solda nas paredes laterais do chanfro e também identificar “uma certa proporção” entre as oscilações transversal e longitudinal para se produzir cordões contínuos ao longo do maior percurso possível de soldagem até que o processo fosse interrompido devido à extinção do arco ou ocorrência do furo na raiz.

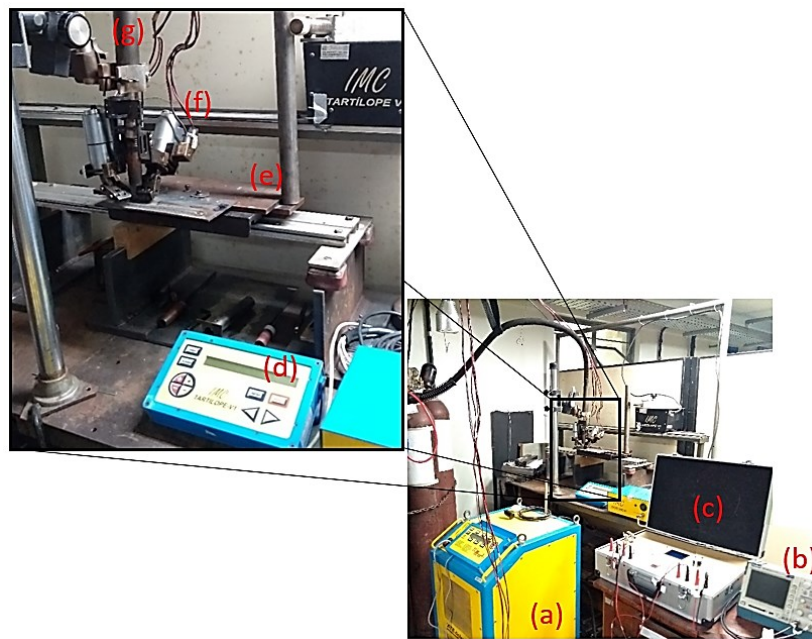
A grande quantidade de combinações possíveis para as amplitudes “X” e “Y” faria com que este estudo se estendesse demasiadamente, portanto, adotou-se duas relações como

estudo para se determinar, previamente, algumas dimensões de abertura de raiz que poderiam ser alcançadas. Estas relações de amplitude foram aproximadamente 2 para 1, ou seja, a oscilação transversal foi praticamente o dobro da longitudinal e a outra relação foi de aproximadamente 1 para 1.

4.3.2.3. Padrão de tecimento seguindo diferentes figuras de Lissajous

Após terem sido definidos ângulo do bisel, espessura do corpo de prova e uma determinada proporção de amplitude de oscilação, os ensaios finais foram feitos aplicando-se quatro diferentes Figuras de Lissajous como forma de tecimento (oscilação). Estas constam na Tabela 5.18 da seção Resultados e Discussões. Com cada um dos quatro padrões de oscilação aplicados foram produzidos três cordões e mais três sem oscilação, totalizando 15 testes.

Antes de cada soldagem os conjuntos que foram preparados eram simplesmente acomodados sobre a base do dispositivo de deslocamento TARTÍLOPE V1 o qual, durante a execução dos cordões, conduzia os corpos de prova com velocidade constante. Na Figura 4.11 é apresentada a fotografia da montagem da bancada de testes onde foram efetuadas as soldagens.



- (a) Fonte eletrônica IMC, (b) osciloscópio, (c) sistema "Oscilador Magnético", (d) sistema de deslocamento, TARTÍLOPE V1, (e) base do dispositivo de deslocamento, TARTÍLOPE V1, (f) eletroímãs e (g) tocha de soldagem para processo GMAW

Figura 4.11: Montagem da bancada de testes para as soldagens GMAW pulsado

4.3.3. Avaliação dos cordões obtidos

Os cordões foram produzidos na posição plana e somente eram interrompidos quando a união era transpassada completamente (ocorrência do furo da raiz) ou com a ocorrência da extinção do arco durante um intervalo de tempo igual ou maior que 0,5 s. Este intervalo de tempo foi especificado devido a registros obtidos em testes exploratórios, por meio da coleta de sinais elétricos, onde observou-se ser este um período médio para o reestabelecimento do arco, caso ocorresse.

Os resultados dos testes foram quantificados em termos do maior comprimento contínuo de soldagem percorrido e, conseqüentemente, que preencheram a maior abertura possível da raiz em corpos de prova montados com afastamento progressivo entre as faces da junta.

As análises foram realizadas de forma visual, por fotografias dos cordões, identificação de ocorrência ou não de furo na raiz, aquisição de sinais elétricos ao longo da execução do cordão e macrografias de seções transversais dos cordões produzidos sem e com oscilação magnética identificando maiores e/ou menores penetrações na raiz ao longo das soldagens. Vale ressaltar que, com os sinais elétricos, foi possível identificar maior ou menor estabilidade no processo tendo como parâmetro a classificação “mais estável” a soldagem que apresentou menor “ β ” (Taxa de crescimento da tensão elétrica do arco) que será melhor explicado na seção 5.4.2 dos Resultados e Discussões e o menor número possível de eventos de interrupções do arco, fossem eles decorrentes de curtos circuitos ou extinções.

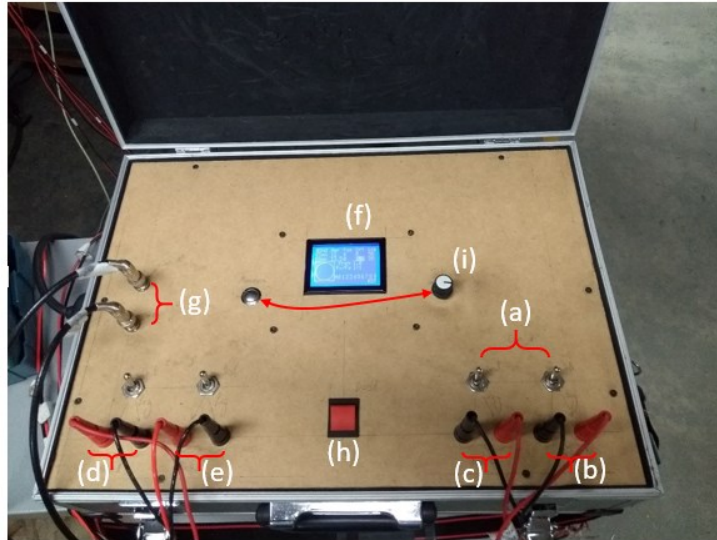
5. Resultados e discussões

5.1. Desenvolvimento do sistema para deflexão magnética do arco

Por motivo da possibilidade de, futuramente ser adquirido uma propriedade industrial a título de modelo de utilidade, na

Figura 5.1 é mostrada apenas a aparência externa do equipamento controlador de fluxo magnético (protótipo) que foi projetado e construído especialmente para este estudo. Descrevendo resumidamente o sistema, ele possui 8 terminais para a alimentação de dois eletroímãs com uma tensão de até 24 V. Cada eletroímã é composto por duas bobinas ligadas em paralelo, sendo um deles responsável pelo campo magnético no sentido transversal (“X”) de soldagem e o outro responsável pelo campo no sentido longitudinal (“Y”). As variáveis referentes às características da geração das ondas (amplitude, frequência, offset, tipo de onda e simetria) em “X” e em “Y” para a formação das figuras de Lissajous, podem ser visualizadas e selecionadas no painel mostrador. Seletores de comando têm a função de percorrer os menus das variáveis mencionadas acima e habilitar cada uma das opções desejadas e seus respectivos valores. Conexões de saída de sinais elétricos podem ser ligadas a um osciloscópio para a aferição quanto à geração das Figuras de Lissajous.

Como mencionado na seção 4.1.1 da Metodologia o sistema é composto por fontes de alimentação e controladores que permitem alimentar cada eletroímã com tensão variável segundo ondas de formato senoidal, triangular ou quadrada, ver Figura 4.1.



- (a) Chaves liga/desliga para cada bobina, (b) e (c) terminais, polos positivo e negativo das bobinas do eixo “X”, (d) e (e) terminais, polos positivo e negativo das bobinas do eixo “Y”, (f) painel mostrador do sistema, (g) conexões de saída para serem ligadas a um osciloscópio, (h) chave geral liga/desliga e (i) seletores de comandos

Figura 5.1: Equipamento controlador de fluxo magnético

5.1.1. Fonte de alimentação e controladores

Os transformadores internos do equipamento em conjunto com suas fontes retificadoras convertem a tensão de alimentação de 127 V (padrão da rede pública de energia) em 2 canais de 24 V sendo um para o eixo “X” e o outro para o eixo “Y” de soldagem. Em cada canal encontram-se 4 terminais onde são ligadas as bobinas. A cada 2 terminais uma bobina é conectada podendo ser ligadas ou desligadas independentemente ou combinadas uma das outras. O hardware e software que foram desenvolvidos trabalham para a formação das Figuras de Lissajous por meio da combinação de valores de razão de frequências (F_x / F_y) e ângulos de fase (ϕ). Na Figura 5.2 são mostrados alguns dos vários padrões que podem ser formados, dos quais, por exemplo, $F_x / F_y = 1/1$, $\phi = \pi/2$ e $A_x = A_y$ forma uma Figura de Lissajous com formato circular.

Essas figuras são geradas por curvas paramétricas traçadas em um plano por pontos $\{x(t), y(t)\}$ determinados por equações do tipo senoidal [54], ver Equação 5.1 e Equação 5.2.

$$x(t) = A_x * \text{Sen}(2\pi F_x(t) + \phi) + O_x \quad \text{Equação 5.1}$$

$$y(t) = A_y * \text{Sen}(2\pi F_y(t)) + O_y \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde A_x e A_y são as amplitudes, em Volts, das curvas nas direções “X” e “Y”, respectivamente, F_x e F_y são as frequências das funções geradoras, em Hertz, ϕ é a ângulo de fase entre elas, em radianos, e O_x e O_y são os offsets, em Volts. Variando esses parâmetros, diferentes curvas podem ser geradas.

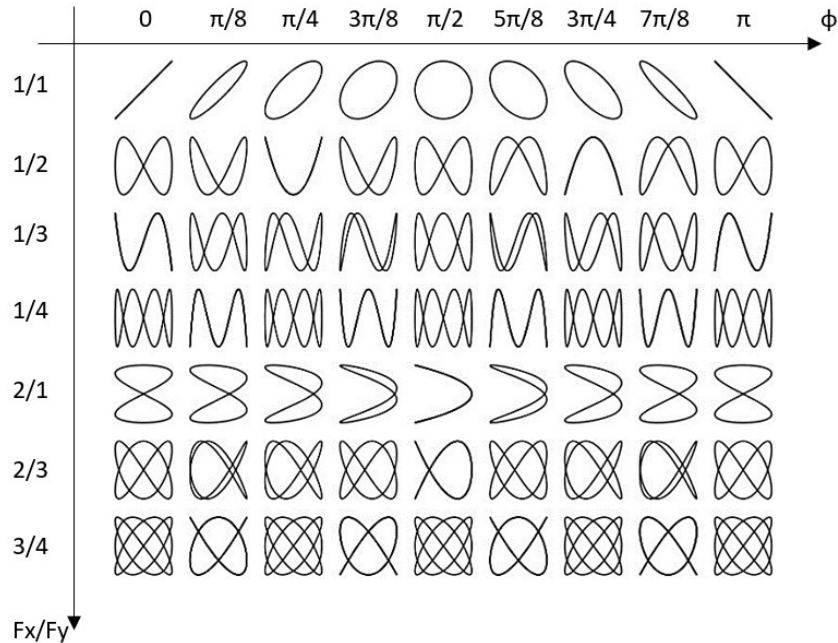


Figura 5.2: Exemplo de Figuras de Lissajous. Fonte: modificado de:

<<https://benebellwen.files.wordpress.com/2017/09/table-of-lissajous-figures-source-steven-lehar.jpg>>, acessado em 23/11/2020

Observa-se ainda que, substituindo as senoides por outras funções periódicas, novas curvas podem ser formadas. Sendo assim, combinando-se uma onda quadrada no eixo “X” e uma triangular no “Y” com F_x / F_y igual a 1/2 e $\phi = \pi/4$, obteve-se uma Figura de Lissajous com formato especial. Esta também foi explorada nos testes realizados nesta tese, ver a Figura 5.3.

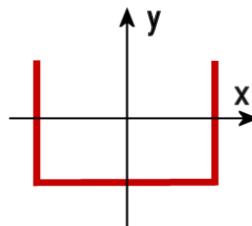
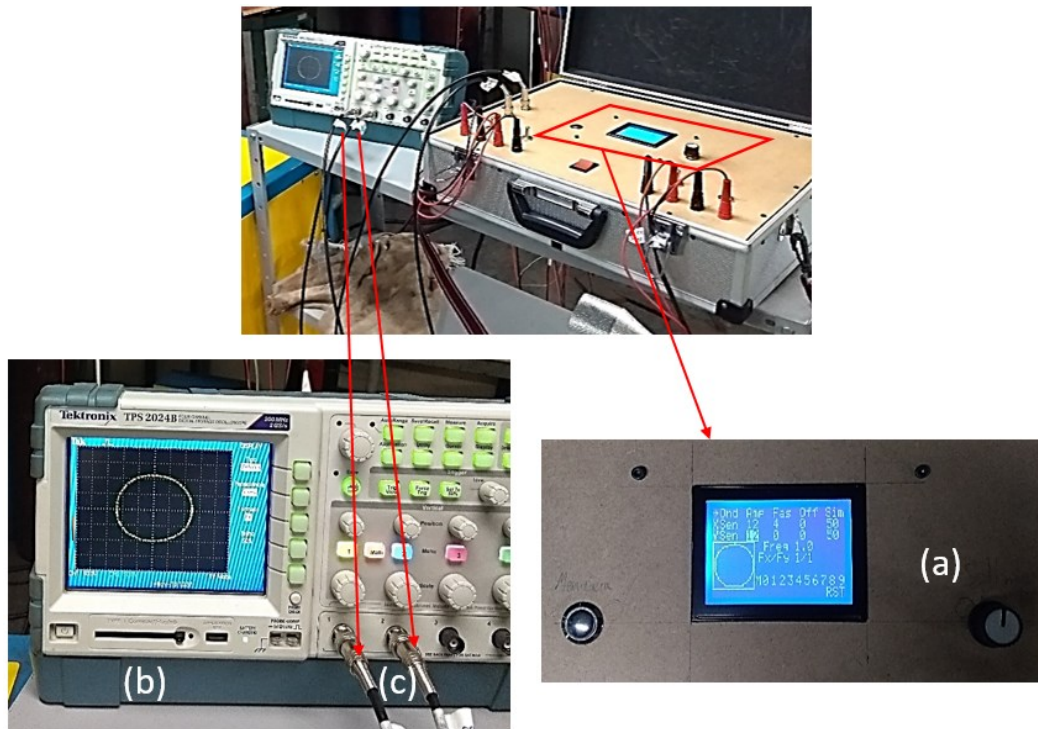


Figura 5.3: Figura de Lissajous (aquí denominada “Deslocamento lateral”) obtida com aplicação de uma onda quadrada no eixo “X” e uma onda triangular no eixo “Y”

Conforme foi relatado na seção 5.1 o sistema oscilador magnético pode ser conectado a um osciloscópio. Isso possibilita monitorar o padrão de tecimento gerado antes e durante os testes de soldagem, ver a Figura 5.4.



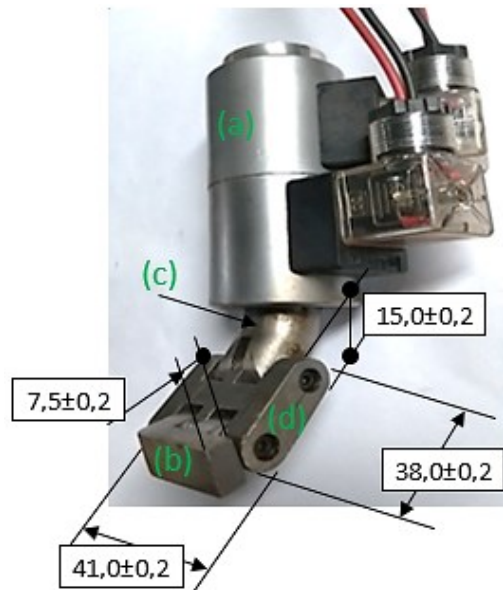
(a) Painel do oscilador, (b) osciloscópio e em (c) cabos de comunicação entre oscilador e osciloscópio

Figura 5.4: Osciloscópio e painel do equipamento oscilador

5.1.2. Direcionadores de fluxo magnético

O projeto e construção dos direcionadores de fluxo magnético foram baseados nas referências bibliográficas [31] e [32]. Nestes trabalhos, os autores relataram sobre a importância de a face do núcleo da bobina apontar para a região de soldagem e que a extremidade do direcionador deve ter um formato geométrico favorável para que a maior densidade possível de linhas de fluxo possa seguir diretamente para o arco. Como resultado do presente trabalho, nesta tese os componentes foram construídos conforme é mostrado na Figura 5.5. Observar que a união formada entre as peças (b), (c) e (d) permite o ajuste do painel frontal para se conseguir uma maior eficiência quanto ao alinhamento de fluxo em direção ao arco.

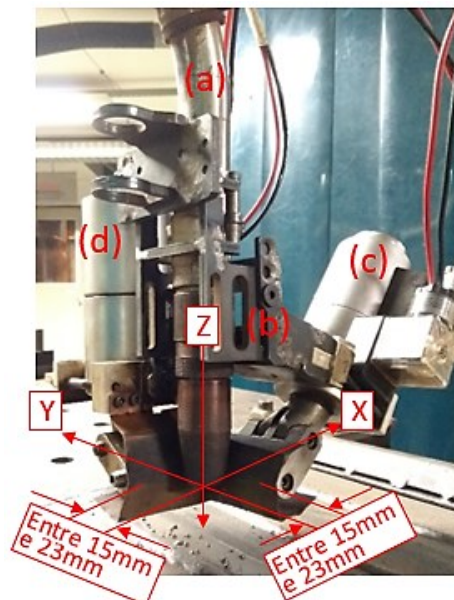
Embora a literatura recomende, em geral, o uso de lâminas de aço silício para a construção de núcleos para bobinas (ver seção 2.4.2), no presente trabalho devido a limitações de ferramental disponível, optou-se por fabricar os núcleos e suas partes constituintes com material maciço utilizando aço carbono ASTM A36. Nota-se além disso, que a forma construtiva do direcionador de fluxo, aqui apresentado, seria de difícil obtenção artesanal utilizando lâminas, inclusive pelo agravante de existirem articulações na parte inferior do conjunto. As referências bibliográficas [27-29] fazem comparações entre núcleos fabricados com componentes maciços e laminares.



(a) Bobina (eletroímã), (b) painel frontal, (c) núcleo e (d) articulador

Figura 5.5: Bobinas e direcionador de fluxo magnético. Dimensões em "mm"

Após terem sido feitas as montagens em suas respectivas bobinas, os conjuntos direcionadores de fluxo foram acoplados em um suporte (também projetado e construído especificamente para este trabalho), com isso, foi possível posicioná-los em seus respectivos eixos de atuação "X" e "Y". Adicionalmente, os suportes permitem ajustes quanto ao afastamento e aproximação dos painéis frontais com relação ao arco. A Figura 5.6 mostra o suporte, as bobinas e os direcionadores montados em uma tocha GMAW.



(a) Tocha GMAW, (b) suporte, (c) bobinas geradoras de campo em "Y" e seu direcionador de fluxo, (d) bobinas geradoras de campo em "X" e seu direcionador de fluxo

Figura 5.6: Suporte posicionador das bobinas

5.1.3. Calibração do sistema

Anteriormente às soldagens, uma série de atividades foram necessárias. A começar pelo sistema oscilador que foi construído o qual passou pela etapa de calibração na qual tornou-se conhecida uma variação média de 0,5 mT entre as medições dos campos magnéticos produzidos utilizando-se a fonte variável PASCO e as produzidas pelo oscilador magnético que foi criado. Os resultados das medidas dos campos magnéticos produzidos pelos eletroímãs seguindo a metodologia apresentada na seção 4.1.3 são mostrados no Gráfico 5.1 e Gráfico 5.2, juntamente com as linhas de tendência obtidas pelas regressões, linear (Equação 5.3) e polinomial de grau 2 (Equação 5.4).

O Gráfico 5.1 corresponde à condição em que apenas uma das bobinas de cada eletroímã foi energizada, resultando em menores campos magnéticos. Já os resultados do Gráfico 5.2 foram obtidos com as duas bobinas energizadas.

Os modelos de regressão linear, obtidos por meio das ferramentas de aplicação do software EXCEL para alimentação com uma e duas bobinas, foram:

$$B = 0,1756 * U_{1B} \quad \text{Equação 5.3}$$

$$B = 0,7797 * U_{2B} - 9,88 * 10^{-3} * U_{2B}^2 \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde “B” é o campo magnético estimado (mT) e U_{1B} e U_{2B} são as tensões (V) de alimentação com uma e duas bobinas, respectivamente.

A possibilidade de atuar com uma ou duas bobinas aumentou a faixa de variação do campo magnético gerado pelos eletroímãs de forma a atender demandas de diferentes processos e condições de soldagem. Observa-se que, no caso da alimentação com duas bobinas, os dados experimentais foram melhor modelados pela equação polinomial de grau 2. A falta de linearidade observada nesse caso pode estar ligada à saturação magnética parcial do núcleo de aço baixo carbono usado para a construção dos direcionadores de fluxo dos eletroímãs ou ter sido atingido o limite de densidade de campo produzido pelas bobinas.

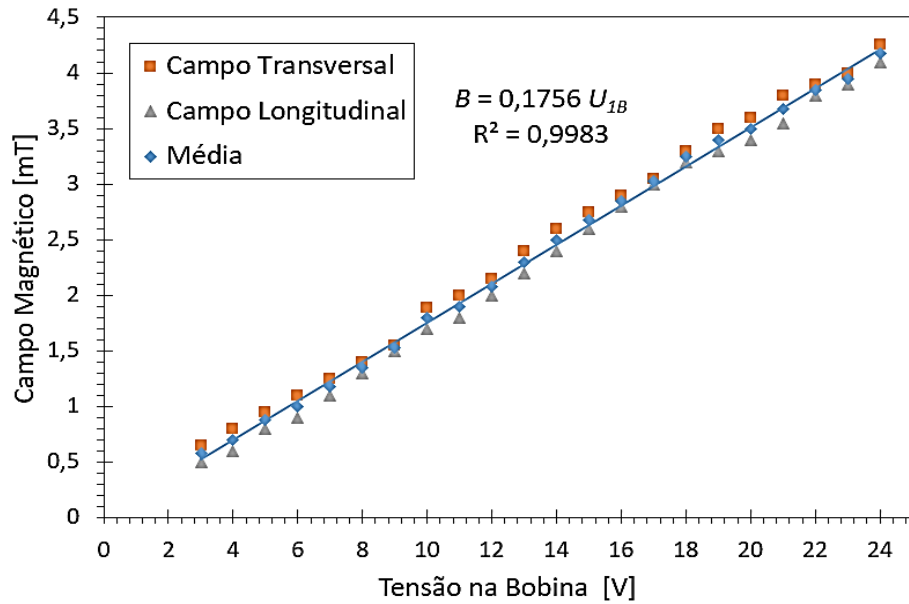


Gráfico 5.1: Medições das densidades de fluxo magnético produzidos pelos eletroímãs com apenas uma bobina em operação

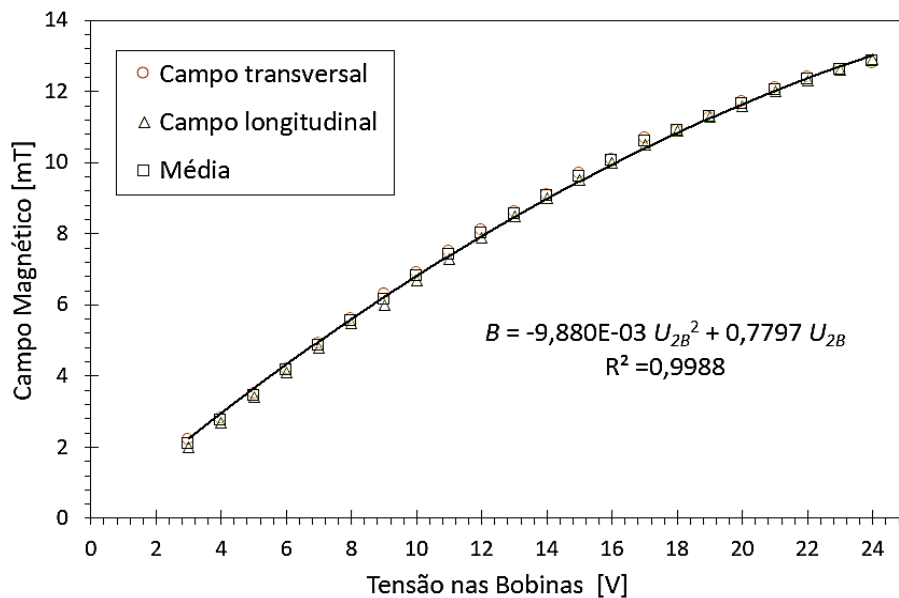
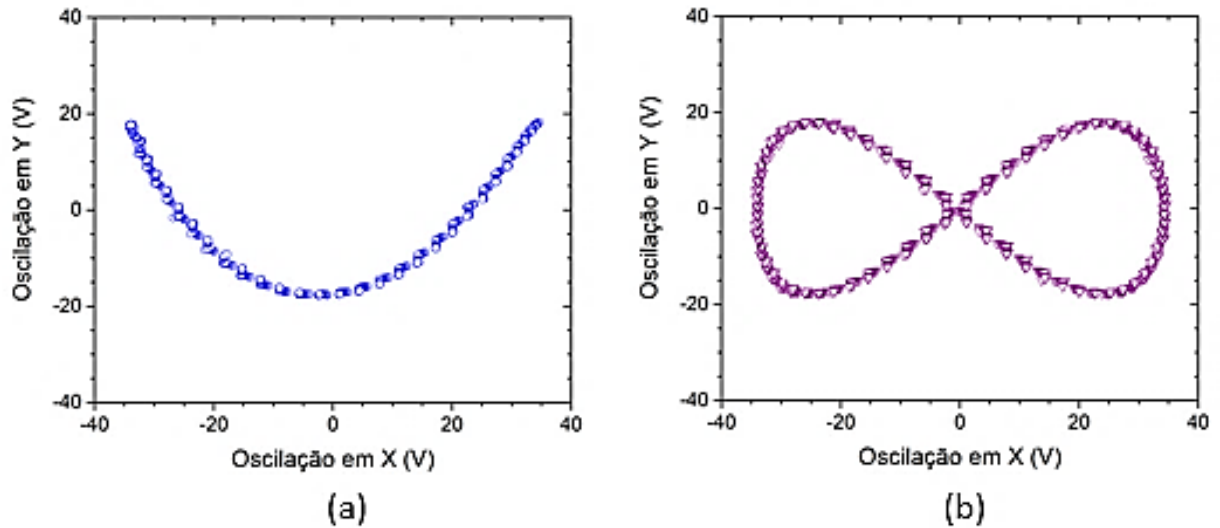


Gráfico 5.2: Medições das densidades de fluxo magnético produzidos pelos eletroímãs com duas bobinas em operação

Colocando o oscilador à prova em uma das soldagens exploratórias sobre chapa, por meio do sistema de aquisição de sinais elétricos foram produzidos os ciclogramas que são mostrados na Figura 5.7. Estes são exemplos da fidelidade com que o sistema oscilador gera padrões de tensão que podem ser aplicados às bobinas geradoras de campo (transversal e

longitudinalmente ao sentido da soldagem). A Figura 5.8 é mais um exemplo de padrão de tecimento possível de ser conseguido pelo sistema oscilador. Considerando particularmente as condições em que a força magnética é aplicada alternadamente por determinados instantes de tempo apenas no sentido transversal da soldagem (eixo “X”), nota-se que esse padrão de tensão produz uma indução magnética na região do arco capaz de defletir-lo pausadamente para cada um dos lados.



(a) “Meia-lua” ($F_x / F_y = 1/2 - \pi/4$ da Figura 5.2) e em (b) “Lemniscata” ($F_x / F_y = 1/2 - \pi/2$ da Figura 5.2)

Figura 5.7: Exemplos de Figuras de Lissajous que foram geradas pela alimentação de tensão nas bobinas para promoverem a oscilação do arco

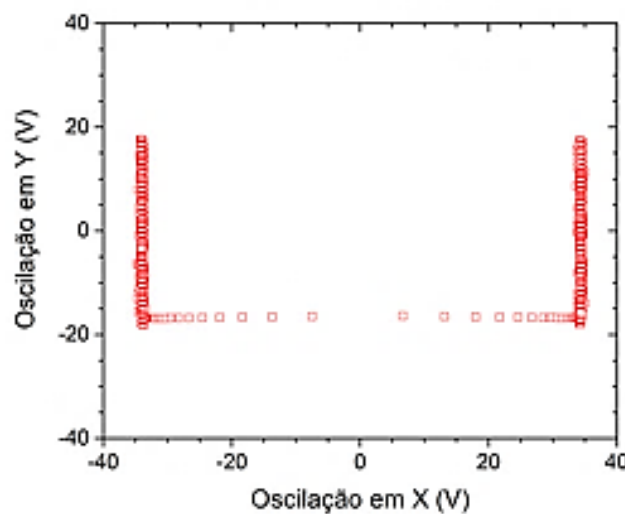


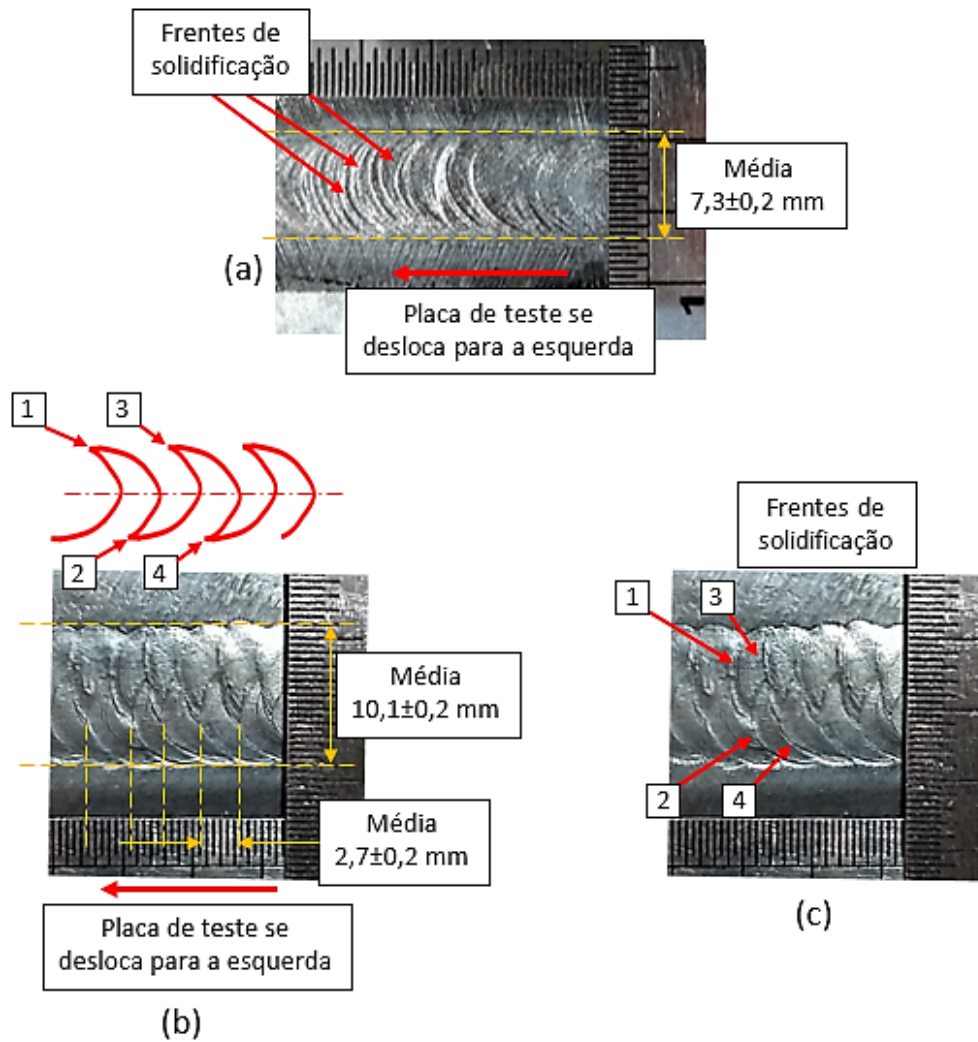
Figura 5.8: Exemplos de padrão de oscilação do arco, “Deslocamento lateral” (Figura de Lissajous mostrada na Figura 5.3)

5.2. Testes de soldagem GTAW autógeno sobre chapa

As soldagens com o processo GTAW foram produzidas aplicando-se os padrões de tecimento especificados na Tabela 5.1. Nessa tabela e nas que se seguem, as amplitudes (em mT) foram calculadas a partir dos valores de tensão selecionados no sistema de oscilação do arco usando as equações 5.3 e 5.4 apresentadas na seção 5.1.3 dos Resultados e Discussões.

Tabela 5.1: Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento para a oscilação do arco na soldagem GTAW autógena

	Condição (a) ∪		Condição (b) ○	
	“X”	“Y”	“X”	“Y”
Tipo de onda	Seno	Seno	Seno	Seno
Amplitude (mT)	9,9	7,9	9,9	2,8
Fx / Fy	1/2		1/1	
Frequência (Hz)	0,5		0,5	
Simetria (%)	50	50	50	50
Offset	0	0	0	0
Ângulo de fase (rad)	$\pi/4$	---	$\pi/2$	---
Obs.: “X” – Oscilação transversal, “Y” – Oscilação longitudinal				
Condições: (a) “meia lua” e (b) “elipse”				



(a) sem oscilação, (b) padrão “meia lua” ($F_x/F_y=1/2$ e $\phi = \pi/4$) com curvas à direita e (c) detalhes de frentes de solidificação

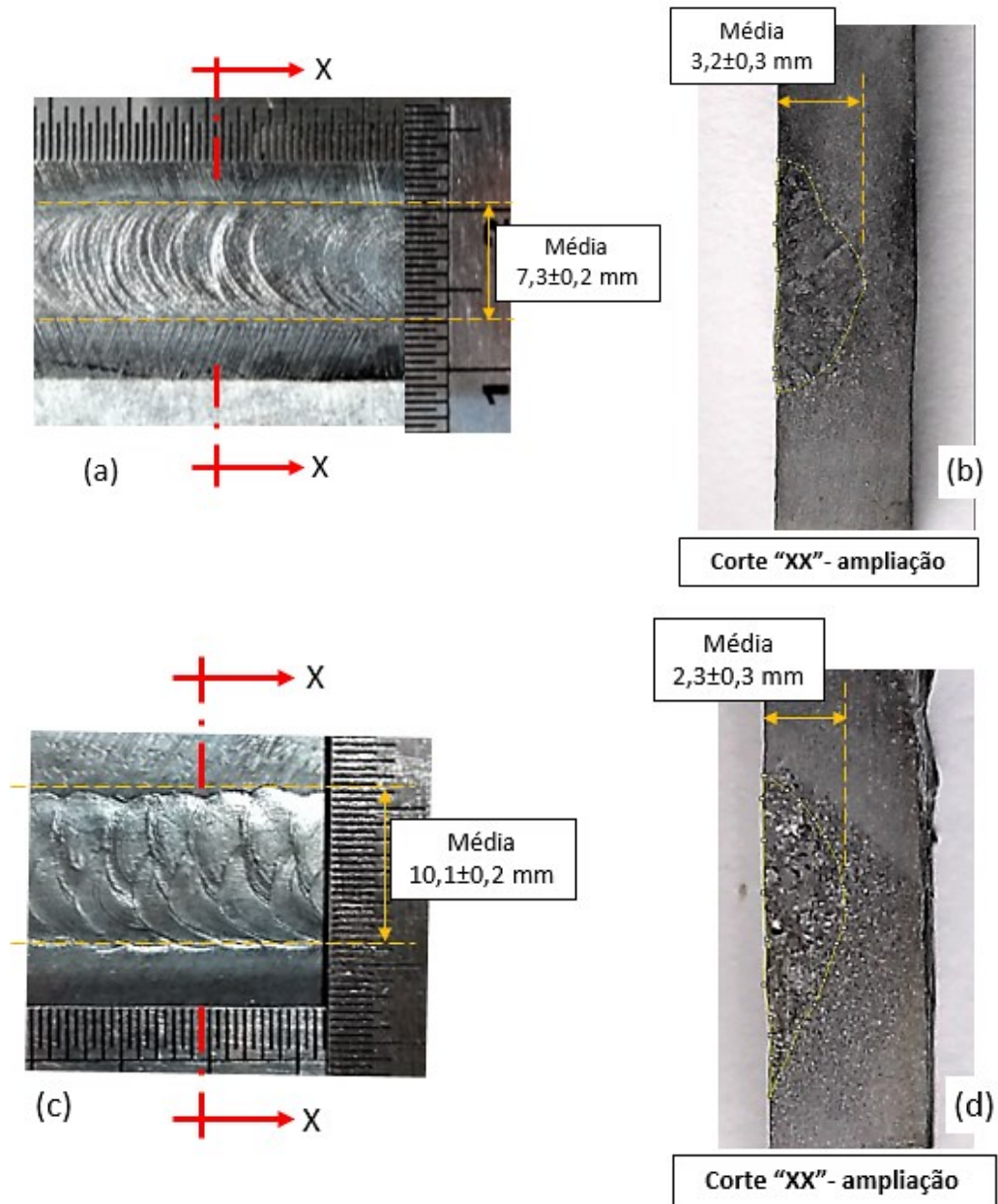
Figura 5.9: Cordões de solda obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de “meia lua” à direita

O padrão correspondente à Figura 5.9(b), somada à translação da placa de teste, resulta no movimento esquematizado na parte superior da mesma. Considerando a velocidade de soldagem (1,4 mm/s) e a frequência de oscilação transversal (0,5 Hz) que foram usadas, obtém-se uma distância esperada de 2,8 mm entre duas frentes de solidificação sucessivas, isto é:

$$Dfs = \frac{Vs}{f} \quad \text{Equação 5.5}$$

Onde “ Dfs ” é a distância entre as frentes de solidificação [mm], “ Vs ” é a velocidade de soldagem [mm/s] e “ f ” é a frequência de oscilação transversal [Hz].

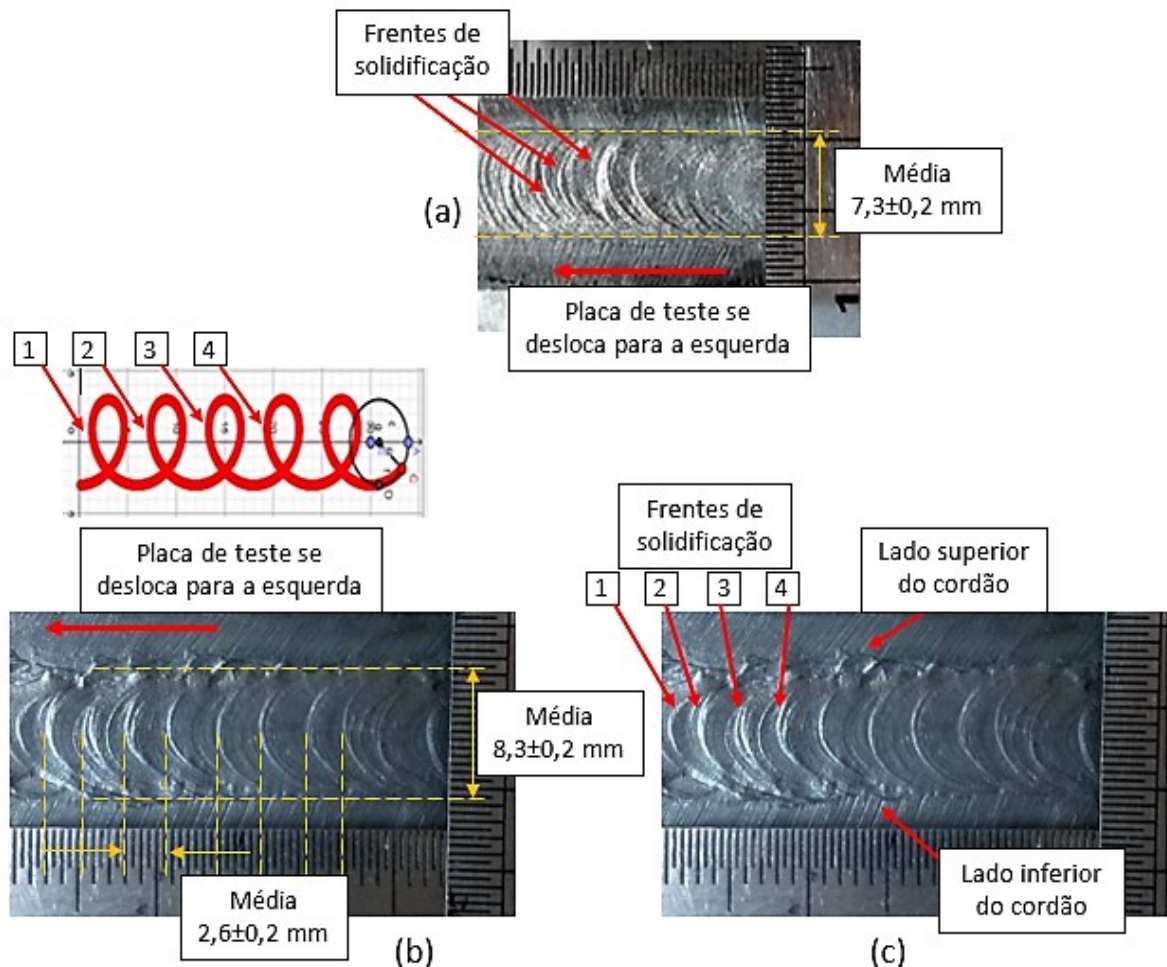
Comparando-se esse valor com a separação média entre as frentes de solidificação medidas na superfície do cordão ($2,7\pm 0,2$ mm), observa-se que a movimentação lateral do arco está sincronizada com o deslocamento linear da soldagem. O movimento resultante também mostra as solidificações periódicas da poça de fusão conforme a deflexão do arco para as laterais do cordão (sinalizados com os números 1, 2, 3 e 4). Isso que pode explicar o aspecto característico da sua superfície conforme o padrão de tecimento que foi aplicado.



(a) e (b) sem oscilação, (c) e (d) padrão “meia lua” ($F_x/F_y=1/2$ e $\phi = \pi/4$) com curvas à direita
 Figura 5.10: Penetrações dos cordões de solda obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de “meia lua” à direita

Na Figura 5.11 também é apresentada uma comparação entre soldas realizadas sem e com oscilação. Nas imagens (a), (b) e (c) notam-se as diferenças visuais entre os cordões, suas larguras, e seus respectivos padrões de frentes de solidificação.

Na Figura 5.11(b), igualmente ao que foi apresentado na Figura 5.9, a separação média entre as frentes de solidificação medidas na superfície do cordão (sinalizados com os números 1, 2, 3 e 4) indica que a movimentação do arco está sincronizada com o deslocamento linear da soldagem e com as variações impostas ao arco pelo sistema de oscilação magnética. O movimento resultante esperado está esquematizado na parte superior da mesma e mostra as solidificações periódicas da poça de fusão conforme a deflexão do arco. Isto pode explicar o aspecto característico do cordão conforme o padrão de tecimento que foi aplicado. Considerando-se, novamente, a velocidade de soldagem e a frequência de oscilação transversal usadas, as medições apontaram o valor médio de $2,6 \pm 0,2$ mm, o qual é aproximado aos 2,8 mm esperado.

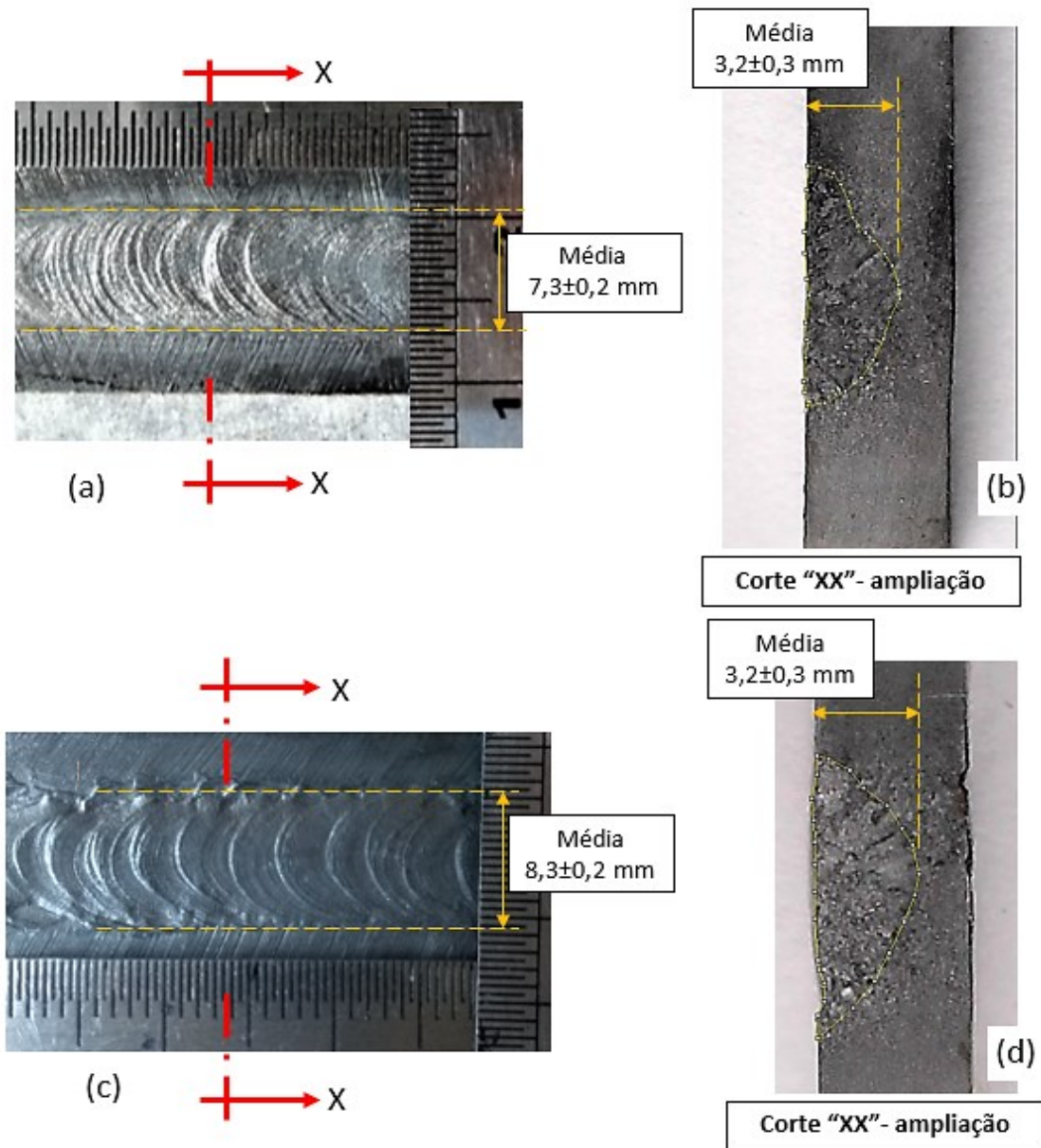


(a) sem oscilação, (b) padrão "elipse" ($F_x/F_y=1/1$ e $\phi = \pi/2$) anti-horário e (c) detalhes de frentes de solidificação

Figura 5.11: Cordões de soldagem obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de "círculo" anti-horário

A trajetória esperada do arco também indica que esse deve ter passado com uma maior velocidade do lado inferior conforme está indicando a seta na Figura 5.11(c). Por outro lado, periodicamente o arco deve ter permanecido relativamente estático do lado superior. Aparentemente, a maior velocidade de translação do arco no lado inferior do cordão, poderia ser o fator que explica a formação do cordão com aspecto mais linear nesta lateral em comparação com as frentes de solidificação intermitentes no lado superior do cordão (onde a seta indica).

Na Figura 5.12 nota-se que a deflexão do arco em forma “Circular”, na característica como foi imposta ao processo, associou uma maior largura ao cordão com igual penetração comparativamente ao realizado sem oscilação. Com este fato, presume-se que uma maior ou menor distribuição de calor na região da solda está relacionado não só das amplitudes “Bx” e “By”, mas também à frequência e de qual Figura de Lissajous atuou no processo. Observa-se que, mesmo tendo sido aplicada amplitude $B_x=9,9$ mT (igual à oscilação “Meia Lua”), na oscilação “Circular” a amplitude longitudinal ($B_y=2,8$ mT) foi a que favoreceu o arco passar várias vezes consecutivas em uma mesma região do cordão. Com isso, o calor distribuído longitudinalmente produziu a mesma penetração de uma soldagem sem oscilação. Na Figura 5.12 é apresentado comparações entre as respectivas penetrações.

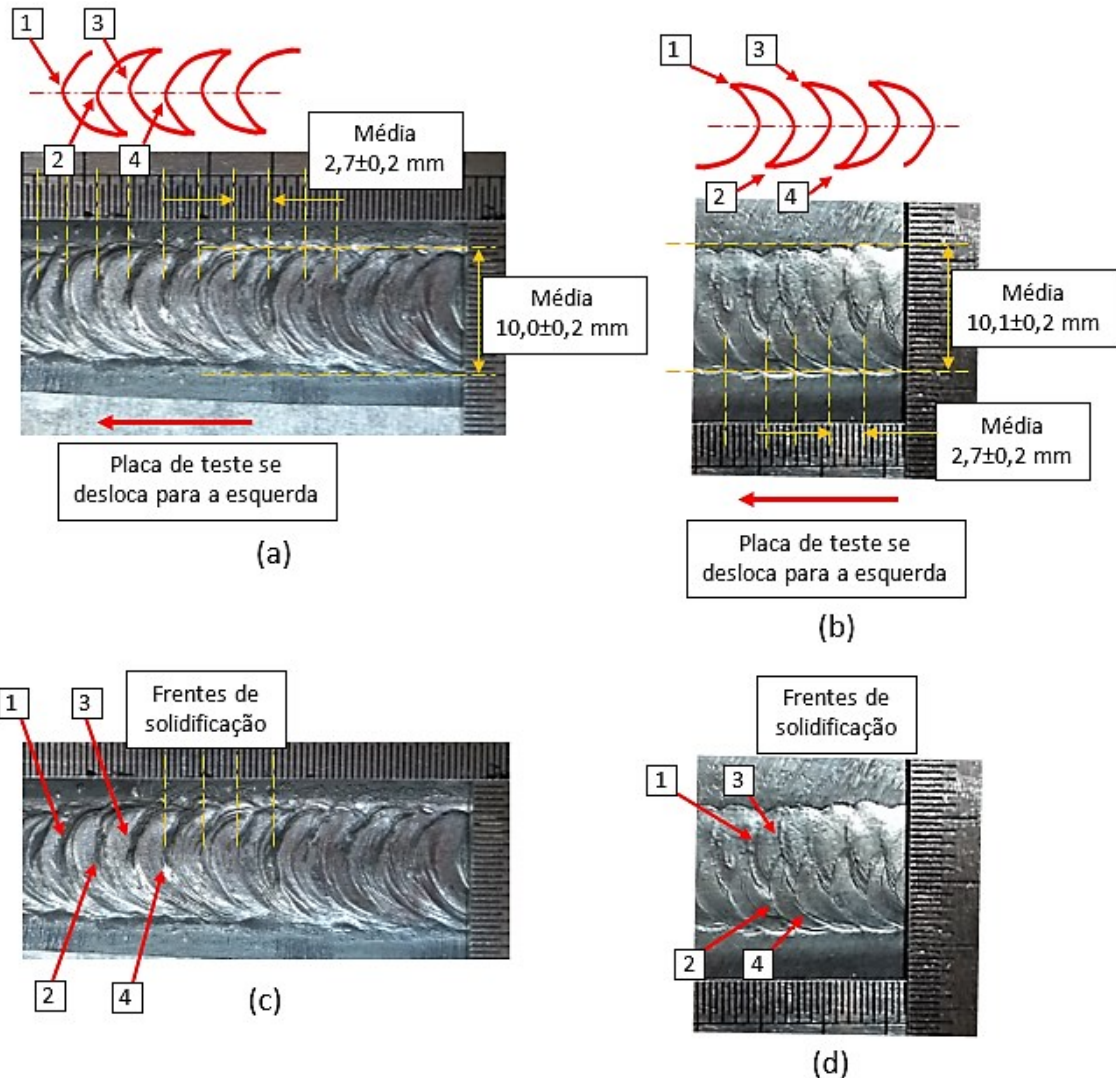


(a) e (b) sem oscilação, (c) e (d) padrão "elipse" ($F_x/F_y=1/1$ e $\phi = \pi/2$) anti-horário

Figura 5.12: Penetrações dos cordões de soldagem obtidos com o processo GTAW autógeno sem oscilação e com oscilação em padrão de "círculo" anti-horário

Na Figura 5.13 é apresentada uma comparação entre soldas realizadas com padrões de oscilação "meia lua" para a esquerda e para a direita. Observando-se as imagens (a) e (b) nota-se diferenças visuais entre os cordões e seus respectivos padrões de frentes de solidificação (sinalizadas com os números 1, 2, 3 e 4). As larguras não apresentaram variações significativas visto que as amplitudes "Bx" aplicadas foram as mesmas.

Mais uma vez, para a velocidade de soldagem e a frequência de oscilação transversal usadas, as medições apontaram os valores médio iguais a $2,7\pm 0,2$ mm, o qual é aproximado aos 2,8 mm esperado.



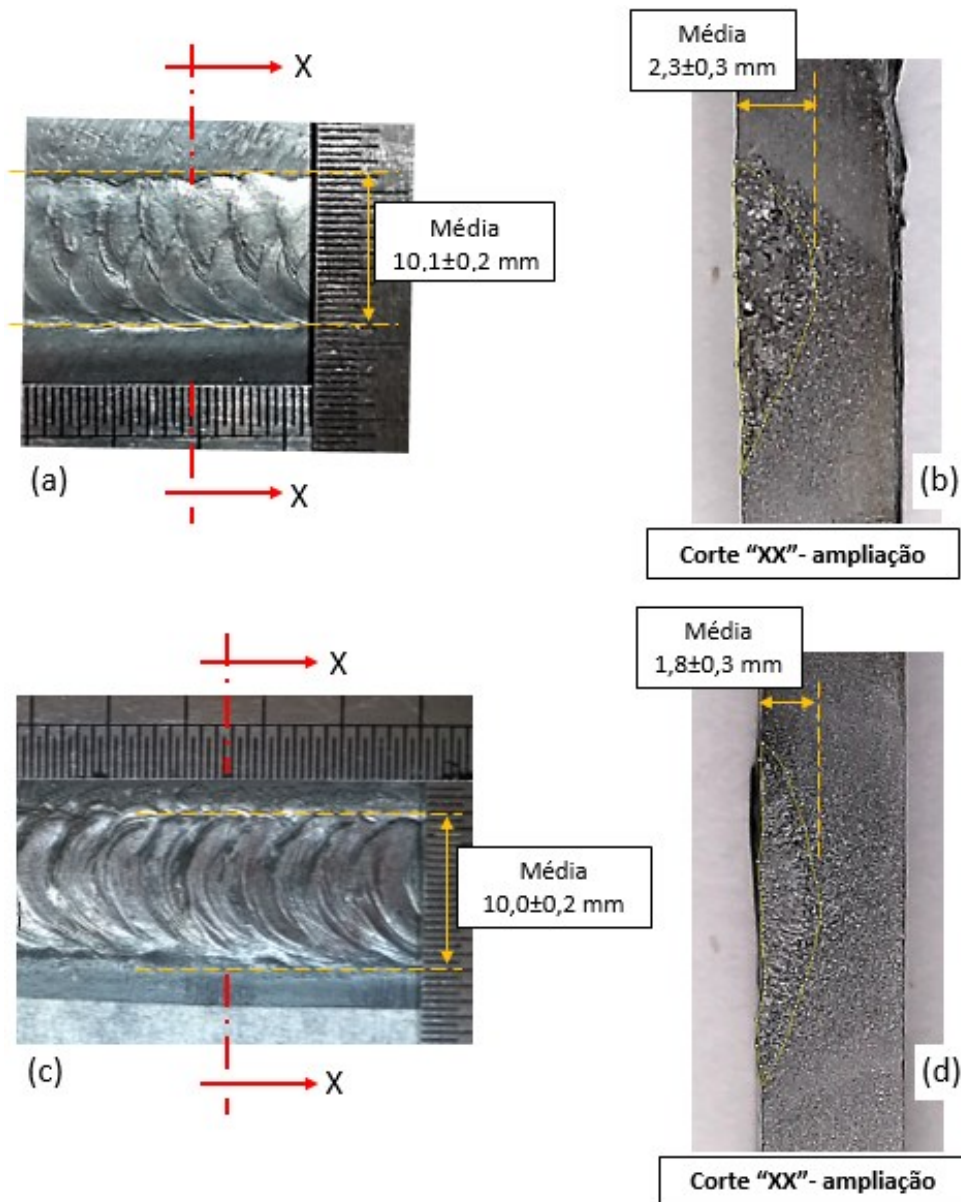
(a) padrão "meia lua" ($F_x/F_y=1/2$ e $\phi = \pi/4$) com curvas à esquerda, (b) padrão "meia lua" ($F_x/F_y=1/2$ e $\phi = \pi/4$) com curvas à direita, (c) e (d) respectivos detalhes de frentes de solidificação

Figura 5.13: Cordões de soldagem obtidos com o processo GTAW autógeno com oscilação em padrão de "meia lua" à esquerda e à direita

As imagens apresentadas na Figura 5.14 ratificam a afirmativa de que uma maior ou menor distribuição de calor na região da solda foi fator dependente das amplitudes "Bx" e "By", frequência e de qual Figura de Lissajous atuou no processo. Observa-se que, mesmo sendo empregadas as mesmas condições de oscilação em ambos os testes, porém, o fato da Figura de Lissajous ter sido aplicada em sentidos específicos ao da soldagem, ocorreram variações

nas respectivas penetrações. Contudo, conforme era esperado, não ocorreu diferenças significativas quanto às larguras dos cordões.

Na Figura 5.14 é apresentado comparações entre as respectivas penetrações.






(a) e (b) padrão "meia lua" ($F_x/F_y=1/2$ e $\phi = \pi/4$) com curvas à direita, (c) e (d) padrão "meia lua" ($F_x/F_y=1/2$ e $\phi = \pi/4$) com curvas à esquerda

Figura 5.14: Penetrações dos cordões de solda obtidos com o processo GTAW autógeno com oscilação em padrão de "meia lua" à direita e à esquerda

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores das medições e suas médias de larguras, penetrações e intervalos entre as frentes de solidificação da poça de fusão nas superfícies dos cordões. Estas soldas foram feitas sem e com aplicação de oscilação magnética ao processo.

Tabela 5.2: Medições dos cordões que foram feitos na soldagem GTAW autógena com e sem a aplicação de diferentes padrões de oscilação ao processo

	sem oscilação											
	Largura	Penetr.	Intervalo	Largura	Penetr.	Intervalo	Largura	Penetr.	Intervalo	Largura	Penetr.	Intervalo
Placa de teste 1	7,0	2,8	n/a	10,2	2,8	2,5	8,2	3,1	2,7	10,2	2,1	2,5
	7,5	3,5		10,5	2,3	2,5	8,0	2,8	3,0	9,7	1,8	3,0
	7,2	3,0		10,2	2,3	3,0	8,2	3,2	2,5	10,0	2,3	2,7
Desvio Padrão	0,2	0,3		0,14	0,24	0,24	0,09	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21
Placa de teste 2	7,5	2,7		10,0	2,2	2,7	8,5	3,3	2,5	10,0	1,5	2,7
	7,2	3,7		10,0	1,8	2,5	8,0	3,5	3,0	10,2	2,2	2,5
	7,5	3,0		10,5	2,2	2,5	8,0	2,5	2,5	10,0	1,7	2,7
Desvio Padrão	0,1	0,4		0,24	0,19	0,09	0,24	0,43	0,24	0,09	0,29	0,09
Placa de teste 3	7,2	3,4		10,0	2,8	3,0	8,7	3,5	2,5	10,0	1,6	3,0
	7,5	3,1		9,5	2,1	2,5	8,5	3,8	2,2	10,2	1,3	2,7
	7,0	3,2		10,0	1,9	2,7	8,2	3,1	2,2	9,7	2,0	2,5
Desvio Padrão	0,2	0,1		0,24	0,39	0,21	0,21	0,29	0,14	0,21	0,29	0,21
Média	7,3	3,2		10,1	2,3	2,7	8,3	3,2	2,6	10,0	1,8	2,7
Media Desv. Padr.	0,18	0,28	0,20	0,27	0,18	0,18	0,30	0,19	0,17	0,26	0,17	

Estes testes exploratórios mostraram que o sistema oscilador foi capaz de defletir o arco elétrico seguindo diferentes Figuras de Lissajous e, nas condições destes ensaios, foi possível realizar soldas com características específicas, tais como:

- Visualmente, observou-se diferentes padrões de frentes de solidificação da poça de fusão conforme os padrões de tecimento impostos ao processo. Isso sugere diferentes características de movimentação da poça e possivelmente diferentes gradientes de distribuição térmica na região do arco.

- Cordões mais largos resultaram em menor penetração comparando-se com aqueles obtidos sem a influência da oscilação magnética externa.

- Conforme o padrão de tecimento aplicado obteve-se cordões mais largos ou mais estreitos mesmo aplicando-se a mesma intensidade de campo magnético no sentido transversal ao da soldagem. Isso pode significar que tecimentos seguindo determinadas Figuras de Lissajous poderiam favorecer a fonte de energia permanecer mais tempo em uma certa região, por exemplo, nas laterais do cordão ou longitudinalmente a este.

5.3. Testes de soldagem GMAW com transferência por curto circuito sobre chapa

Das soldagens realizadas no processo GMAW com transferência por curto circuito, dois exemplos dos testes são apresentados nas Figura 5.15 e Figura 5.16; um obtido sem e o outro com a influência da oscilação magnética controlada. Este último seguindo as diretrizes de oscilação especificadas na Tabela 5.3.

Nota-se que o tecimento em forma de “Elipse” também foi utilizado nesta fase dos estudos o que permitiu certa comparação com as soldagens que foram realizadas no GTAW autógeno.

Tabela 5.3: Figura de Lissajous aplicada como forma de tecimento nos testes com o processo GMAW com transferência por curto-circuito

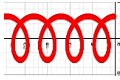
	“X”	“Y”
Tipo de onda	Seno	Seno
Amplitude (mT)	12,9	5,6
F _x / F _y	1/1	
Frequência (Hz)	0,5	
Simetria (%)	50	50
Offset	0	0
Ângulo de fase (rad)	$\pi/2$	---

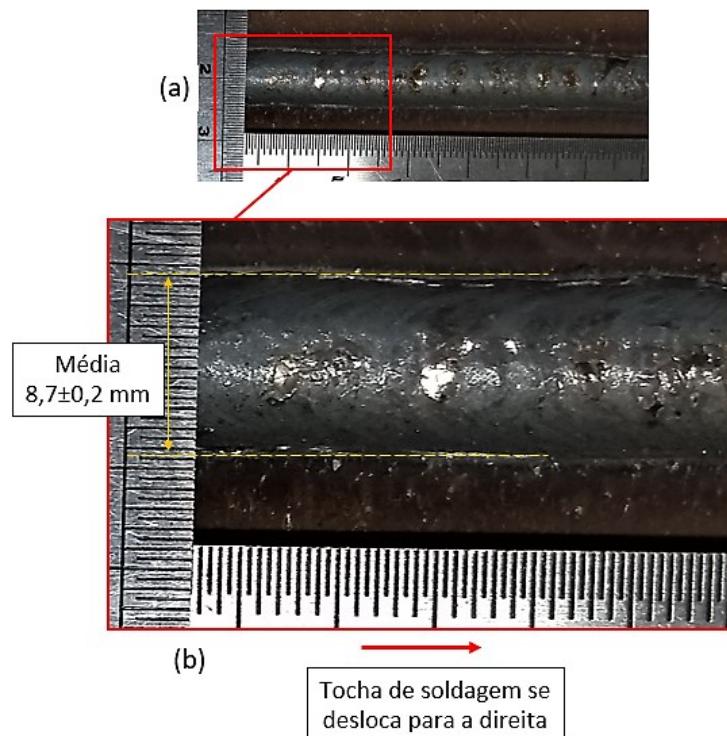
Inicialmente, observa-se que as amplitudes de oscilação dos eixos “X” e “Y” foram ajustadas para 12,9 mT e 5,6 mT respectivamente (no processo GTAW, “X”= 9,9 mT e “Y”= 2,8 mT). Esta ação foi necessária para se evidenciar os efeitos da oscilação magnética aplicada ao processo porque, em testes preliminares utilizando-se os valores de oscilação do GTAW, visivelmente, não se identificou indícios de efeitos da deflexão controlada imposta ao processo GMAW com transferência por curto circuito.

As primeiras análises foram feitas em seis cordões; três produzidos sem e mais três com oscilação magnética. As soldas foram feitas sobre chapa, a placa de teste permaneceu parada e a tocha, posicionada verticalmente com relação à superfície de soldagem, foi conduzida com velocidade constante.

Na Tabela 5.4 consta as medições que foram feitas nos cordões apresentados na Figura 5.15 e na Figura 5.16.

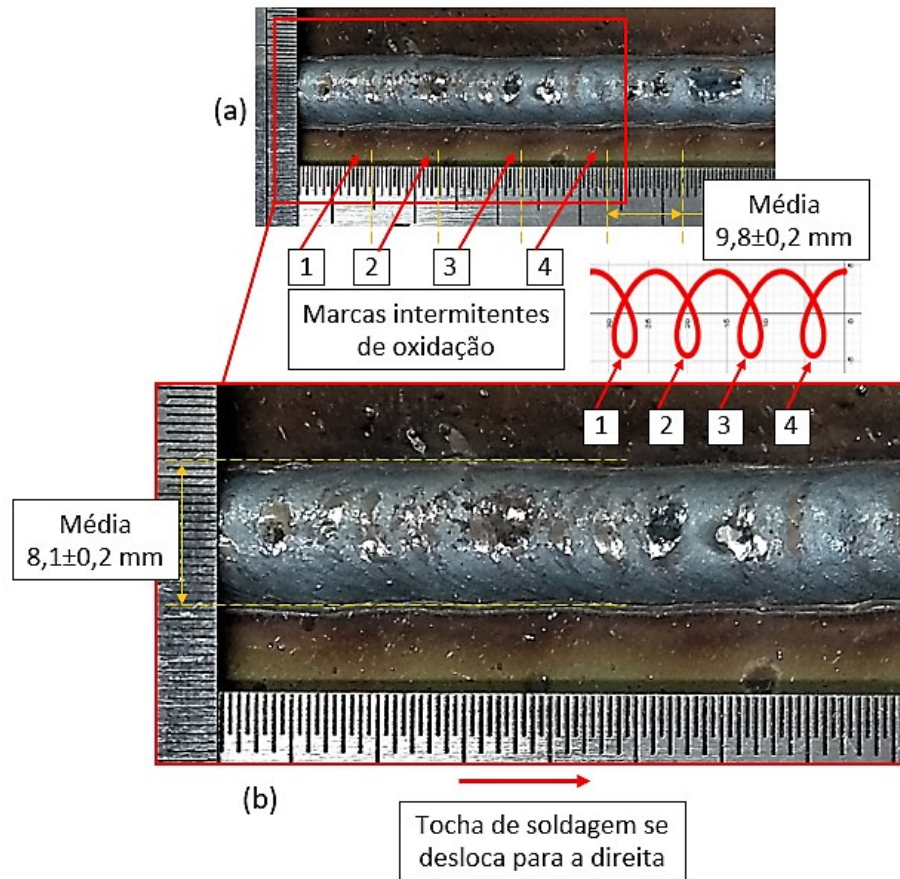
Tabela 5.4: Medições realizadas nos cordões da soldagem GMAW com transferência por curto circuito sem e com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Elipse”

	sem oscilação			
	Largura	Intervalo	Largura	Intervalo
Placa de teste 1	9,0	n/a	8,3	10,0
	8,7		8,0	9,5
	8,7		8,0	9,8
Desvio Padrão	0,1		0,14	0,21
Placa de teste 2	9,0		8,1	9,8
	8,5		7,9	10,2
	8,7		8,4	9,5
Desvio Padrão	0,2		0,21	0,29
Placa de teste 3	8,7		8,2	9,7
	8,5		7,9	9,5
	8,2	8,1	9,5	
Desvio Padrão	0,2	0,12	0,09	
Média	8,7	8,1	9,8	
Média Desvio Padrão	0,18	0,16	0,20	



(a) Cordão em oscilação e em (b) detalhe ampliado

Figura 5.15: Cordão obtido com o processo GMAW com transferência por curto-circuito, sem a atuação da oscilação magnética



(a) Cordão com oscilação e em (b) detalhe ampliado

Figura 5.16: Cordão obtido com o processo GMAW com transferência por curto-circuito, com atuação da oscilação magnéticas seguindo Figura de Lissajous “Elipse”

Uma observação relevante é a pequena diferença na aparência externa dos cordões que foram produzidos. Por exemplo, as larguras médias medidas foram $8,7\pm 0,2$ mm e $8,1\pm 0,2$ mm sem e com oscilação, respectivamente. Pode-se observar, contudo, desvios na margem do cordão que foi feito com oscilação do arco (sinalizados com os números 1, 2, 3 e 4). Embora seja difícil de caracterizar, medidas aproximadas obtidas por meio de fotografias das superfícies das soldas indicam uma amplitude de deslocamento lateral do cordão de 0,2 mm a 0,5 mm ou em média 4,5% da sua largura total. Outro indício de atuação do campo magnético variável durante a soldagem são marcas intermitentes de oxidação em uma das laterais do cordão, ver as setas numeradas de 1 a 4 na Figura 5.16(a). As medidas obtidas indicam uma separação média de aproximadamente 9,8 mm entre os centros dessas marcas. Considerando a velocidade de soldagem (4,2 mm/s) e a frequência de oscilação (0,5 Hz) usadas nos ensaios, a distância esperada entre os centros das marcas de oxidação seria de 8,4 mm desde que estas estivessem rigorosamente associadas com a oscilação do arco. A diferença que foi encontrada entre o sincronismo da movimentação lateral do arco e o

deslocamento linear da soldagem pode ser decorrente da pouca eficiência do sistema oscilador ao trabalhar com comprimento de arco curto e variável. Possivelmente também, nem toda oscilação magnética imposta atuou na existência de um arco elétrico ou quando este estivesse com seu comprimento favorável para ser defletido.

Esses resultados mostram que a aplicação do campo magnético causou um efeito de deflexão do cordão menos intenso em comparação com a soldagem GTAW. Um dos motivos para isso pode ser o pequeno comprimento médio de arco típico do GMAW por curto circuito. Um fator adicional, considerando os resultados de Kang e Na [34] e também de Larquer [35] é o maior valor da corrente média de soldagem comparando-se com o GTAW (nesta tese a corrente média GMAW por curto circuito foi igual a 165 A e GTAW foi igual a 120 A).

Nos experimentos desta etapa e até esta fase dos estudos, observou-se também um maior volume da poça de fusão no processo GMAW resultante da maior corrente usada e da contribuição da fusão do eletrodo. Este maior volume de metal líquido pode ter contribuído para uma maior inércia da poça em acompanhar as mudanças no formato do arco causadas pelo campo magnético.

Tendo em vista que as imagens da superfície dos cordões não apresentaram indícios claramente visíveis da deflexão do arco neste modo de transferência metálica, novos testes foram feitos. Mais uma vez, tratando-se de uma fase exploratória afim de se comprovar os efeitos da oscilação magnética no processo de soldagem alguns ajustes quanto às características do tecimento foram implementadas.

Em ensaios prévios observou-se que a frequência de oscilação e sua amplitude, associadas à velocidade de soldagem, causaram variações térmicas as quais puderam ser identificadas por uma câmera termográfica. Diversas combinações entre estas variáveis poderiam ter sido utilizadas para as análises, porém, devido ao grande número de possibilidades e após uma série de ensaios, adotou-se as frequências de 1,0 Hz e 0,4 Hz. A velocidade de soldagem que inicialmente era de 4,2 mm/s foi ajustada para 4,8 mm/s e adicionalmente, foram feitas soldas com tecimento seguindo Figura de Lissajous em forma de Lemniscata.

Na Tabela 5.5 é apresentado as condições que foram aplicadas às soldagens com oscilações. As filmagens termográficas foram feitas na face oposta da chapa em relação ao cordão depositado. O objetivo foi comparar possíveis efeitos térmicos entre os cordões, efeitos estes, provocados pela deflexão do arco/poça de fusão com transferência por curto circuito em função da amplitude e frequência, mantendo-se fixa uma velocidade de soldagem. Foram feitas

quatro filmagens termográficas; uma com cada característica de oscilação aplicada e mais uma sem a atuação da oscilação magnética no processo.

Tabela 5.5: Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento nos testes com GMAW com transferência por curto-circuito, velocidades de soldagem de 4,8 mm/s

	Teste 1 \circ		Teste 2 \circ		Teste 3 ∞	
	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”
Tipo de onda	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno
Amplitude (mT)	12,9	5,6	12,9	5,6	12,9	5,6
Fx / Fy	1/1		1/1		1/2	
Frequência (Hz)	1		0,4		0,4	
Simetria (%)	50	50	50	50	50	50
Offset	0	0	0	0	0	0
Ângulo de fase (rad)	$\pi/2$	---	$\pi/2$	---	$\pi/2$	---
OBS. - Teste 4, sem oscilação.						

Uma primeira análise foi feita quanto à máxima temperatura registrada na região da solda. A Figura 5.17 é um exemplo de termografias sequenciais realizadas para cada um dos padrões de oscilação testados (descrito na seção 4.2.2 da Metodologia). Nesta figura pode-se observar as regiões de maior concentração de calor (sinalizadas pelas setas). Destas regiões foram extraídas as máximas temperaturas de cada uma das 90 imagens termográficas que compõe a filmagem de cada teste. A média e o desvio padrão destes valores foi a primeira forma utilizadas para caracterizar o ensaio. No Gráfico 5.3 são apresentadas tais médias e na seção 9 do Apêndice constam maiores informações sobre os registros das medições e também como foram obtidos.

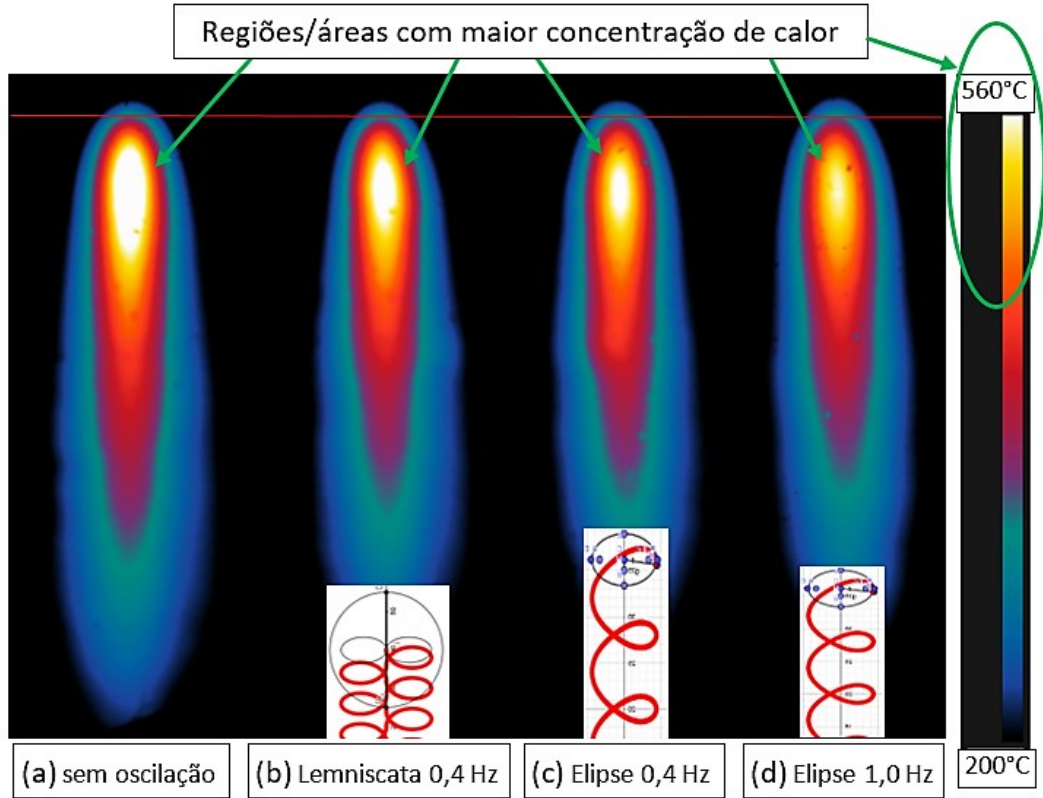


Figura 5.17: Exemplo de imagens termográficas dentro do percurso diametral de 65mm, sem e com atuação da oscilação magnética

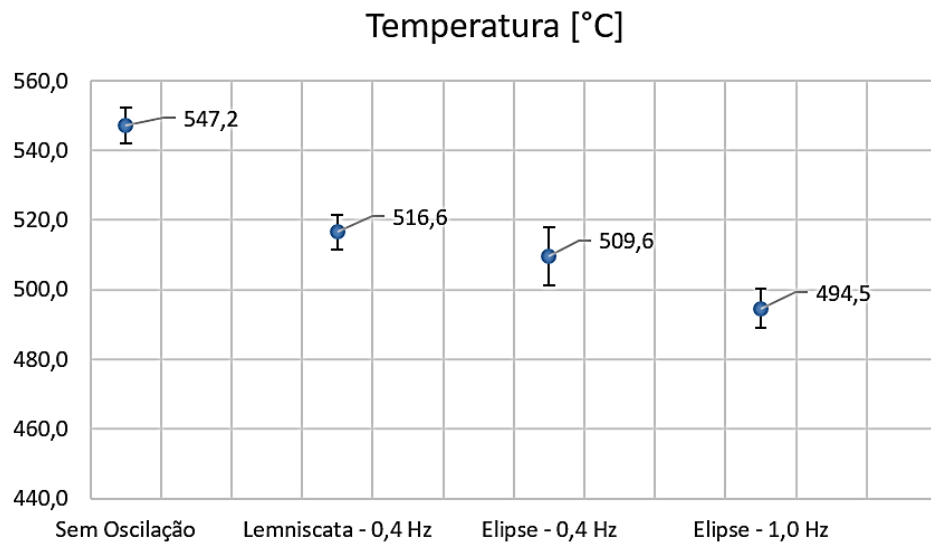


Gráfico 5.3: Médias das temperaturas em função do tipo de oscilação. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão

Nota-se que na Figura 5.17(a) e Gráfico 5.3 (soldagem sem oscilação), o acúmulo de calor na região imediatamente abaixo do arco produziu as maiores temperaturas dentre as analisadas. Esta concentração de energia foi considerada como referência para que, nos testes seguintes, qualquer indício de deflexão do arco com a oscilação imposta, pudesse representar alguma alteração da intensidade de calor localizado. Tal fato ocorreu quando se utilizou tecimento em forma de Lemniscata 0,4 Hz conforme é apresentada na Figura 5.17(b). Ao ser aplicado este padrão pode ser observado ter havido uma característica térmica menos concentrada do que o ocorrido na Figura 5.17(a). Inclusive, as regiões de concentração de calor, indicadas pelas setas, são visivelmente diferentes.

Em outro ensaio, desta vez aplicando-se o tecimento apresentado na Figura 5.17(c) Elipse 0,4 Hz, foi observado maior gradiente de temperatura comparativamente com os ensaios anteriores. Analisando as imagens apresentadas na Figura 5.18 este fato parece ser consequência de o tecimento “Elipse” não passar várias vezes pelo mesmo local, reduzindo assim o acúmulo de calor e refusões. Tomando como referência as circunferências desenhadas (representação do arco elétrico) sobre as trajetórias de oscilação (formada em função da amplitude e frequência de tecimento ambas a uma certa velocidade de soldagem) nota-se que, no padrão Lemniscata, as circunferências se acumulam em maior número sobre a linha central da trajetória de soldagem. De acordo com os dados apresentados no Gráfico 5.3 este pode ter sido um fator causador para que a oscilação “Elipse” produzisse um cordão onde a média das máximas temperaturas foi a menor em comparação com os ensaios anteriores.

Para facilitar a interpretação comparativa entre os padrões de tecimento da Figura 5.18, os números que estão posicionados nas extremidades, superior e inferior das oscilações, representam a contagem de repetições (para 0,4 Hz) durante 10 segundos de simulação.

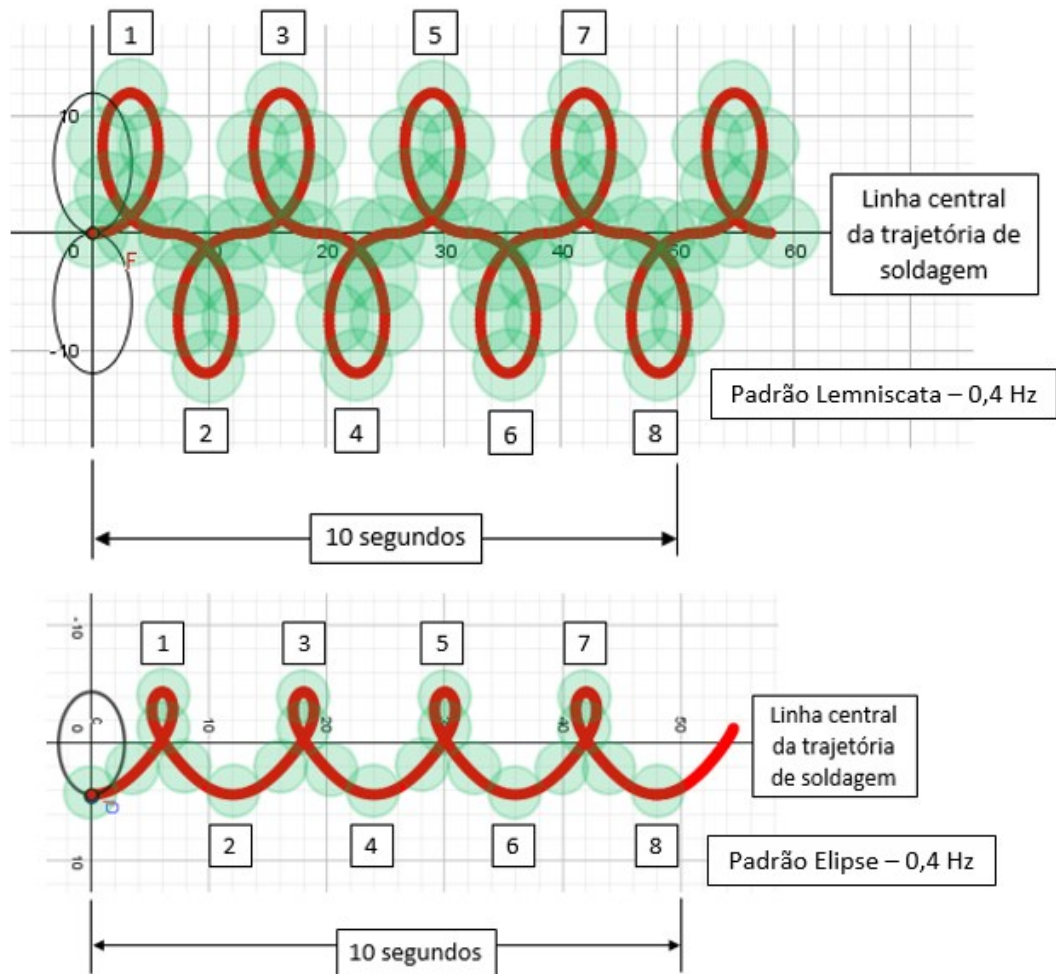


Figura 5.18: Simulação das trajetórias de soldagem seguindo padrões de oscilação somadas à velocidade de deslocamento e frequência

Analisando-se as médias, a redução de temperatura entre os tecimentos, Lemniscata e “Elipse”, não pode ser considerada significativa visto que o desvio padrão entre eles compreendem uma faixa comum de temperatura. Porém, a diferença entre as médias e desvios padrões dos seus respectivos valores, comparativamente com a soldagem sem oscilação, mostra-se expressiva. Nesta comparação, os registros de menores temperaturas concentradas foram considerados um indício de haver movimentação da poça. Como contraprova, mantendo-se as condições de soldagem iguais aos da Figura 5.17(c) e variando-se apenas a frequência de tecimento de 0,4 Hz para 1,0 Hz conforme é mostrado na Figura 5.17(d), novos dados apurados revelaram que as médias das temperaturas localizadas no cordão foram as menores alcançadas dentre todas as anteriores, ver no Gráfico 5.3.

Mais uma vez, tomando como referência as circunferências que representaram o arco elétrico sobre as trajetórias de oscilação, pode ser visto na Figura 5.19 que o padrão de

oscilação “Elipse” 1,0 Hz é aquele onde o arco/poça se alterna maior número de vezes para as laterais. Isso pode ter favorecido ainda mais a distribuição de calor para as margens do cordão e assim ter resultado nas menores temperaturas localizadas na face oposta da chapa entre os quatro ensaios que foram realizados.

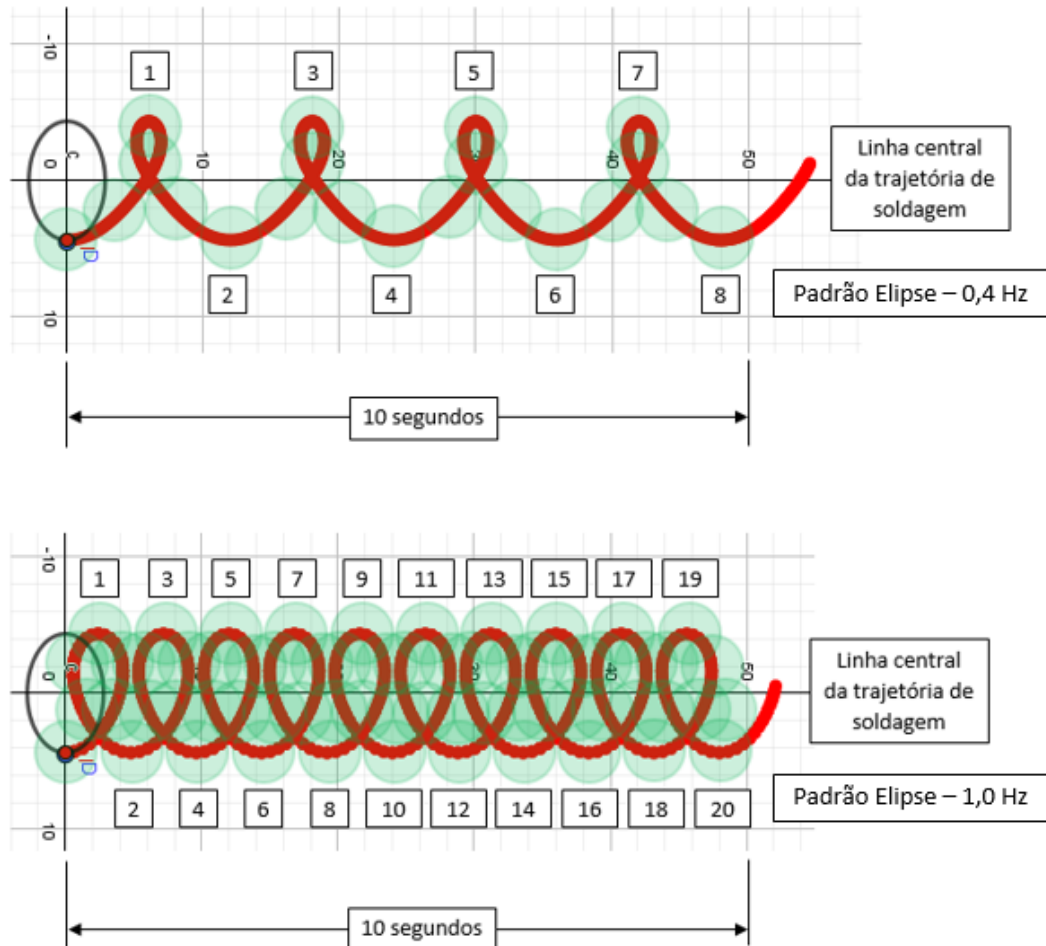


Figura 5.19: Comparação entre frequências para oscilação em forma de Elipse

Baseado nos dados obtidos até esta fase dos estudos foi observado que a oscilação magnética imposta no processo foi um fator influenciador no resultado da soldagem GMAW por curto circuito, pois, tanto o padrão de tecimento como e frequência de oscilação associados à velocidade de soldagem podem ter contribuído com maior ou menor movimentação da poça de fusão.

A segunda forma utilizada para caracterizar os ensaios foram as análises térmicas das áreas. Estas foram obtidas por meio do *software Image J* no qual as temperaturas foram selecionadas entre 450°C e 560°C. A Figura 5.20 é um exemplo de como foram obtidas as medidas de maior concentração de calor conforme o padrão, amplitude e frequência de

oscilação mantendo-se constantes a velocidade de soldagem e o modo de transferência. No canto inferior esquerdo de cada imagem termográfica pode ser visto a região em padrão de cinza que foi formada pelo *software* (as setas indicam as áreas analisadas). No Gráfico 5.4 são apresentadas as médias das áreas. Na seção 9.1 do Apêndice estão as imagens a cada 5 termografias de onde foram obtidas as respectivas áreas e também a tabela onde constam os desvios padrões.

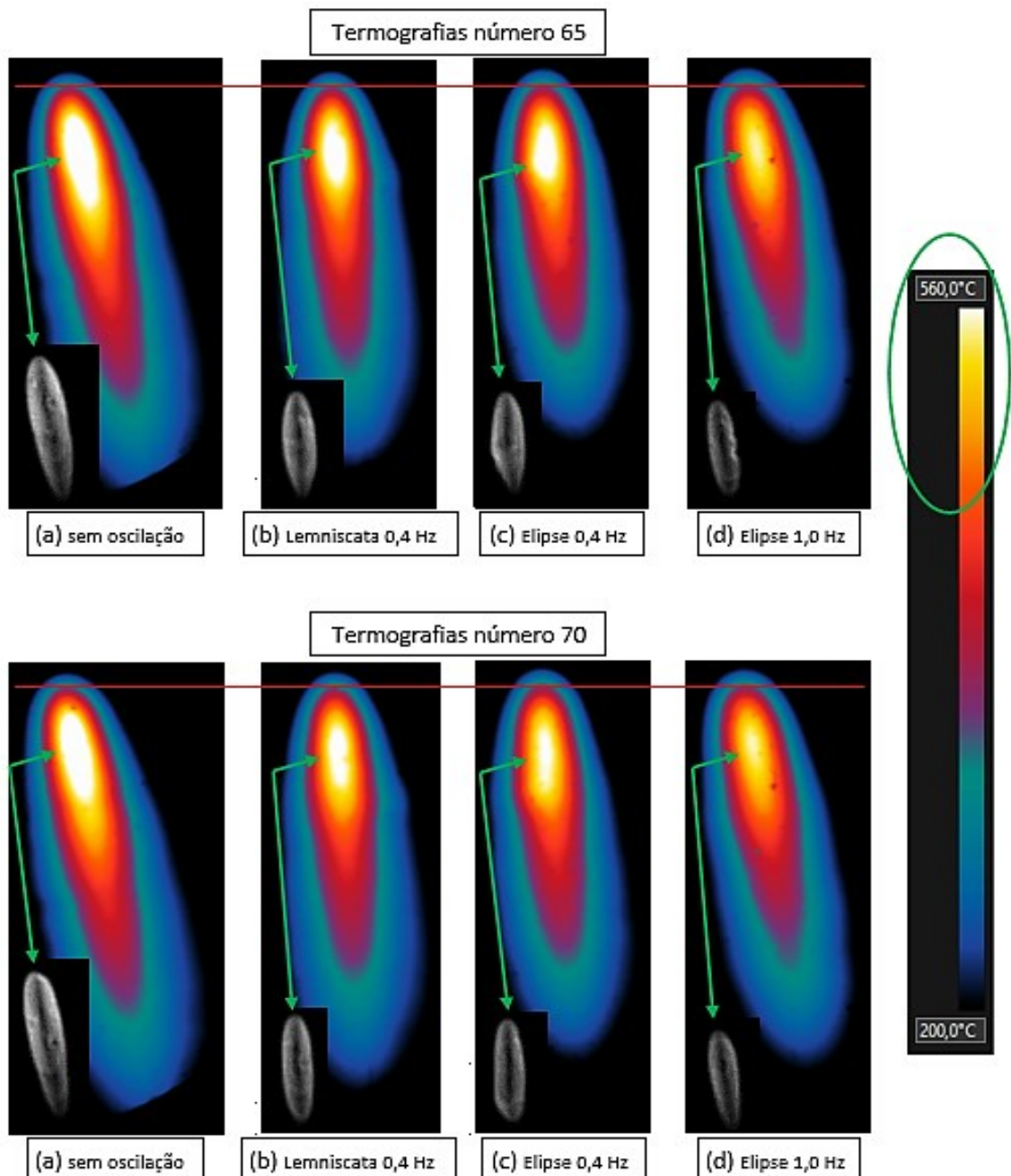


Figura 5.20: Exemplo de imagens termográficas das áreas com maior concentração de calor na soldagem GMAW com transferência por curto circuito, sem e com atuação da oscilação magnética

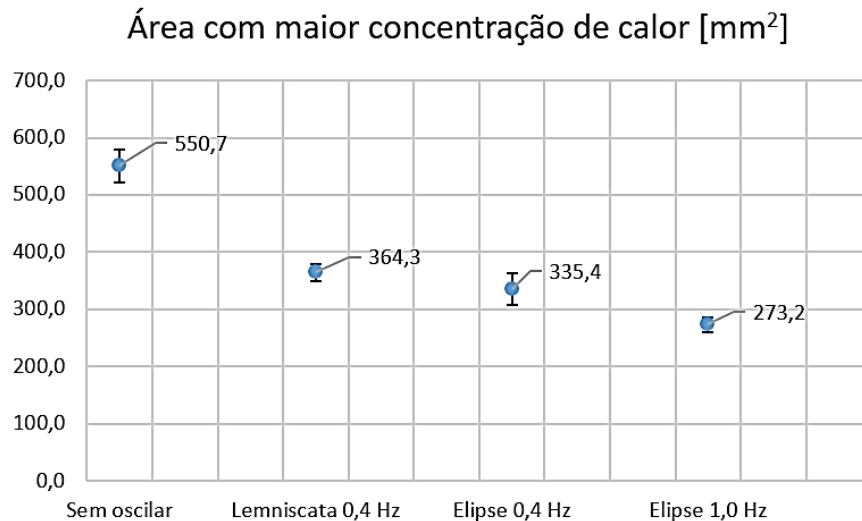


Gráfico 5.4: Médias das áreas com maior concentração de calor. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão

De acordo com os resultados apresentados, embora não havendo alterações visivelmente significativas no formato do cordão GMAW com transferência por curto circuito, a oscilação magnética imposta ao arco (fonte de calor do processo) deve ter defletido o arco/poça o suficiente para reduzir a densidade de energia transferida à peça. Com isso as temperaturas e áreas médias de concentração de calor no reverso da solda foram reduzidas em aproximadamente 52°C e 277,5 mm² respectivamente comparando-se com uma solda sem a oscilação magnética. Estas características mantiveram a mesma tendência entre os padrões de tecimento, ou seja, aqueles que promoveram maior movimentação do arco/poça de fusão foram os responsáveis pelas ocorrências de menores temperaturas concentradas e também as menores áreas de concentração de calor. Este efeito coincide com os da soldagem GTAW, os quais indicaram ocorrer menor penetração (comparativamente às soldas sem oscilação) conforme as características de oscilação magnética atuantes no processo.

5.4. Testes de soldagem GMAW pulsado sobre chapa

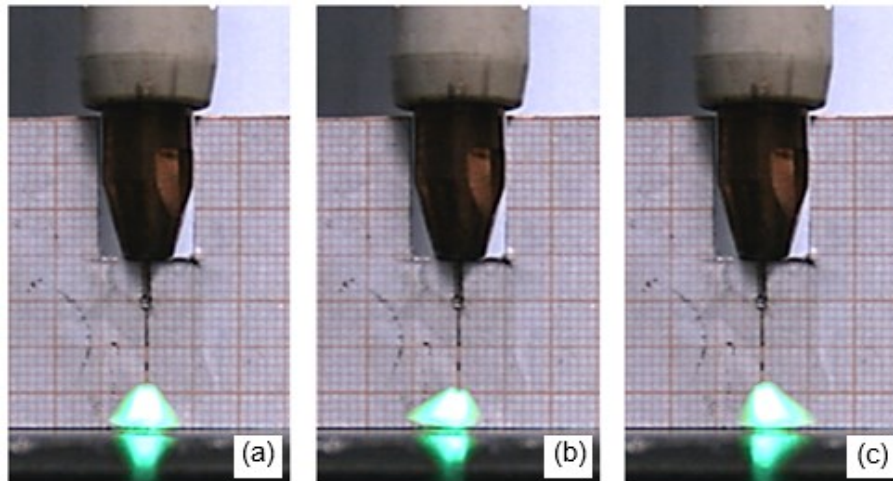
No contexto desta tese, a soldagem com corrente pulsada é apresentada como uma alternativa interessante, comparativamente ao uso com transferência por curto-circuito. O processo GMAW pulsado permite a obtenção de uma transferência metálica do tipo *spray* usando correntes médias inferiores à de transição [43 e 44]. Basicamente, caracteriza-se pela imposição de uma forma de onda à corrente de soldagem e por incursões periódicas acima da

corrente de transição de forma a propiciar o destacamento do metal líquido da ponta do eletrodo por forças eletromagnéticas [43 e 44]. Assim, quando regulado adequadamente, o processo de soldagem opera de forma estável, típica da operação com *spray* e, com transferência de metal independente da atração gravitacional, o que possibilita a soldagem fora de posição.

Conforme foi descrito na seção 4.2.3 da Metodologia, durante os testes exploratórios sobre chapa com a influência da oscilação magnética, observou-se degradação acentuada da estabilidade do processo, particularmente utilizando misturas de proteção contendo determinados teores de CO₂ [47-49]. Neste contexto, soldagens exploratórias foram necessárias para se determinar a mistura de proteção mais adequada considerando-as com 4% de CO₂ ou 18% de CO₂ (misturas comumente utilizadas nas práticas industriais de soldagem GMAW e facilmente encontradas no mercado).

A título de um breve resumo, vários ensaios foram realizados para serem determinadas condições de operação adequadas com os dois gases de proteção. Procurou-se inicialmente obter cordões com transferência por queda livre, ausência de respingos e aspecto uniforme sem o uso de oscilação magnética. Posteriormente foram realizadas soldagens com a aplicação da oscilação magnética. Todas seguiram as diretrizes conforme consta na seção 4.2.3 da Metodologia.

Com esta prerrogativa, inicialmente foram feitas imagens estáticas do bico de contato, superfície da peça e arame eletrodo, todos sobre um plano de medição. Posteriormente, foram feitas as imagens dinâmicas da soldagem sem e com a deflexão do arco. Em posse destas imagens, utilizando o *software* VEGAS Pro 15.0 e a técnica de superposição de imagens, foi possível registrar, tanto o DBCP de 18 mm como aproximadamente 5 mm de comprimento de arco, conforme é mostrado na Figura 5.21.



(a) Sem oscilação do arco, (b) com oscilação para a esquerda e (c) com oscilação para a direita
Figura 5.21: Medição do comprimento do arco, sem e com oscilação magnética imposta ao arco com gás 4%CO₂ e frequência 0,5 Hz

5.4.1. Regularidade no padrão dos Sinais Elétricos

Durante os testes que buscaram uma boa estabilidade para o processo e usando a mistura de proteção com 18% de CO₂, foram observadas eventuais extinções do arco as quais aumentaram de forma significativa quando a oscilação magnética foi aplicada. Em função desses resultados, com proteção de Ar-18%CO₂, menores intensidades de campo magnético foram usadas nos testes exploratórios (apenas uma das bobinas de cada eletroímã foi alimentada). Para a mistura Ar-4%CO₂, maiores valores de campo magnético puderam ser utilizados porque as soldagens apresentaram maior estabilidade e isso permitiu que três diferentes condições de pulsação fossem testadas. Os parâmetros mais estáveis que se considerou para as análises constam na Tabela 5.6.

A nomenclatura adotada utilizou o gás de proteção e a corrente de base para diferenciar os ensaios.

Tabela 5.6: Parâmetros propostos para os testes de soldagem GMAW pulsado que objetivaram a seleção do gás de proteção

Condição:	18CO ₂ 60A	4CO ₂ 55A	4CO ₂ 65A	4CO ₂ 85A
Corrente de pico [A]	285	280	285	292
Corrente de base [A]	60	55	65	85
Tempo de pico [ms]	3,5	3,5	3,5	3,5
Tempo de base [ms]	8,5	8	9,5	13,6
Vazão do gás [ℓ /min]	16	16	16	18
Veloc. Alim. Arame [m/min]	3,2	3,5	3,5	3,5
Veloc. Soldagem [mm/s]	4	4	4	4
DBCP [mm] (a)	18	18	18	18
Proteção	Ar-18%CO ₂	Ar-4%CO ₂	Ar-4%CO ₂	Ar-4%CO ₂
Campo magnético [mT] (B)	0 a 4	0 a 12	0 e 5 a 12	0 e 5 a 12
Obs.: (a) DBCP – Distância do bico de contato à peça; (B) Campo magnético – Valor calculado para a oscilação transversal do arco com base na calibração feita (ver início da próxima seção).				

As condições operacionais usadas nos ensaios foram listadas na seção 4.4 da Metodologia.

Como mencionado na metodologia, os valores de campo magnético obtidos pelas relações com a tensão de alimentação do eletroímã para oscilação transversal do arco foram usados como referência para apresentar os resultados dos testes de soldagem (relação onde a tensão aplicada no(s) eletroímã(s) do eixo “X” é aproximadamente o dobro do eixo “Y”). É importante observar que a falta de linearidade para os maiores valores de indução magnética pode ter implicado em uma distorção na forma de variação do campo magnético em relação à da tensão de alimentação das bobinas. Nas extremidades das oscilações, pode-se esperar uma redução na amplitude da indução magnética acompanhada de um aumento do tempo em que o arco fica defletido próximo da condição de máxima deflexão.

Na Tabela 5.7 são apresentados os valores médios de corrente e das condições de pulsação medidas nos testes realizados sem oscilação magnética. Nesse caso, particularmente com proteção de Ar-4%CO₂, a repetitividade dos resultados foi elevada. Com proteção de Ar-18%CO₂, além da maior dispersão, em algumas soldagens foram observadas extinções do arco mesmo sem a aplicação de campo magnético. O uso dessa mistura de proteção, levou também a um aumento de aproximadamente 10 V das tensões de operação. Nota-se que a presença de CO₂ na proteção favorece uma maior dissipação de calor pelo arco, [44], [47-49] e [57], levando a um maior campo elétrico na coluna do arco e, assim, a maiores tensões de operação para similar comprimento médio do arco entre Ar-4%CO₂ e Ar-18%CO₂. Além disso, existem evidências de que esse gás (CO₂) também favorece uma maior soma das tensões de queda catódica e anódica [53].

Tabela 5.7: Parâmetros medidos dos testes feitos sem oscilação magnética do arco

			Tensão média (V)	Corrente média (A)	Condições de pulsação				Freq. Pulso (Hz)	D (A2s)	Tensões (V)		
					T (ms)	tp (ms)	Ip (A)	Ib (A)			Arco	Pulso	Base
4CO₂ 55A	Veloc. alim.aram 3,5 m/min	Média	23,5	119,1	11,6	3,6	259	56	86,5	241	23,5	28,1	21,5
		Desvio	0,2	0,1	0,0	0,0	0	0	0,0	0	0,2	0,2	0,2
4CO₂ 65A	Veloc. alim.aram 3,5 m/min	Média	23,3	119,8	13,1	3,6	264	65	76,5	251	23,3	28,2	21,5
		Desvio	0,2	0,0	0,0	0,0	0	0	0,0	0	0,2	0,1	0,2
4CO₂ 85A	Veloc. alim.aram 3,5 m/min	Média	22,8	124,2	17,2	3,7	270	85	58,3	266	22,8	28,3	21,3
		Desvio	0,3	0,1	0,0	0,0	0	0	0,0	0	0,3	0,2	0,3
18CO₂ 60A	Veloc. alim.aram 3,2 m/min	Média	33,1	117,7	12,1	3,4	262	60	82,9	236	32,7	38,6	30,8
		Desvio	0,5	0,4	0,0	0,0	0	0	0,0	2	0,6	0,8	0,5
T – Período de pulsação; tp – Tempo de pulso; Ip – Corrente de pulso; Ib – Corrente de base; D – Parâmetro de destacamento;													

Na seção 9.2 do Apêndice são apresentados oscilogramas e fotos de algumas das soldagens sobre chapa sem e com oscilação magnética do arco (para os gases Ar-4%CO₂ e Ar-18%CO₂).

Nos testes realizados com oscilação magnética as medições feitas excluindo-se os períodos de extinção do arco apresentaram condições de pulsação similares às da Tabela 5.7, porém, com alterações significativas nos valores de tensões. Para caracterizar a instabilidade do processo foi calculada a frequência da ocorrência das extinções do arco durante a soldagem, Gráfico 5.5. Observa-se que essas extinções foram mais frequentes com a mistura contendo 18%CO₂ e com maiores intensidades do campo magnético. Para a mistura com 4%CO₂, os resultados apontaram que o processo operou de forma menos estável, ou seja, com maior frequência de extinções do arco na condição com menor corrente de base (4CO₂ - 55 A). Mesmo para essa condição, contudo, não foram observadas extinções do arco em valores de campo magnético inferiores a 4 mT, comparativamente com os testes com a mistura Ar-18%CO₂.

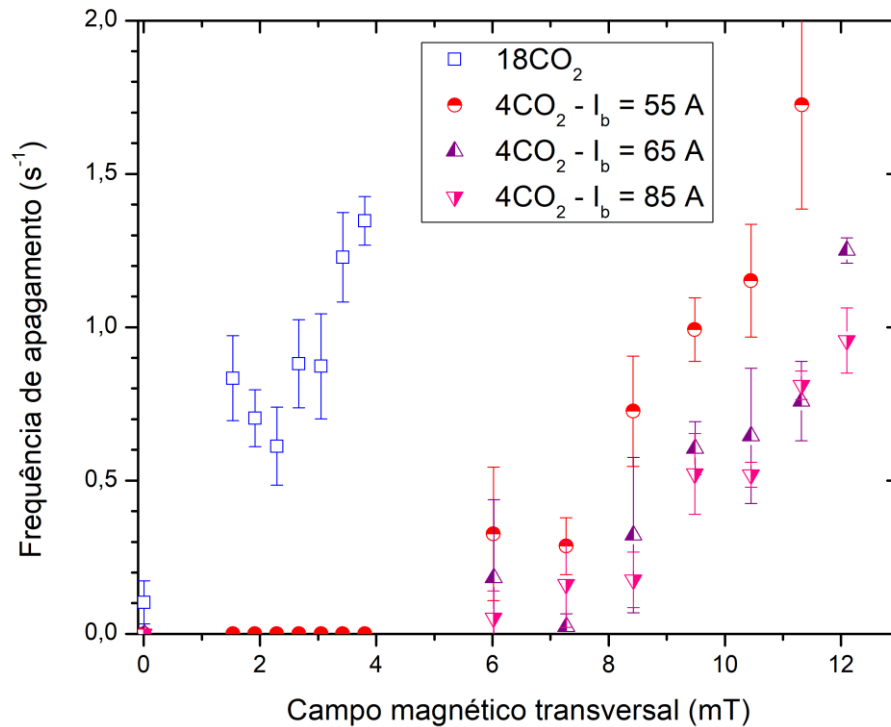
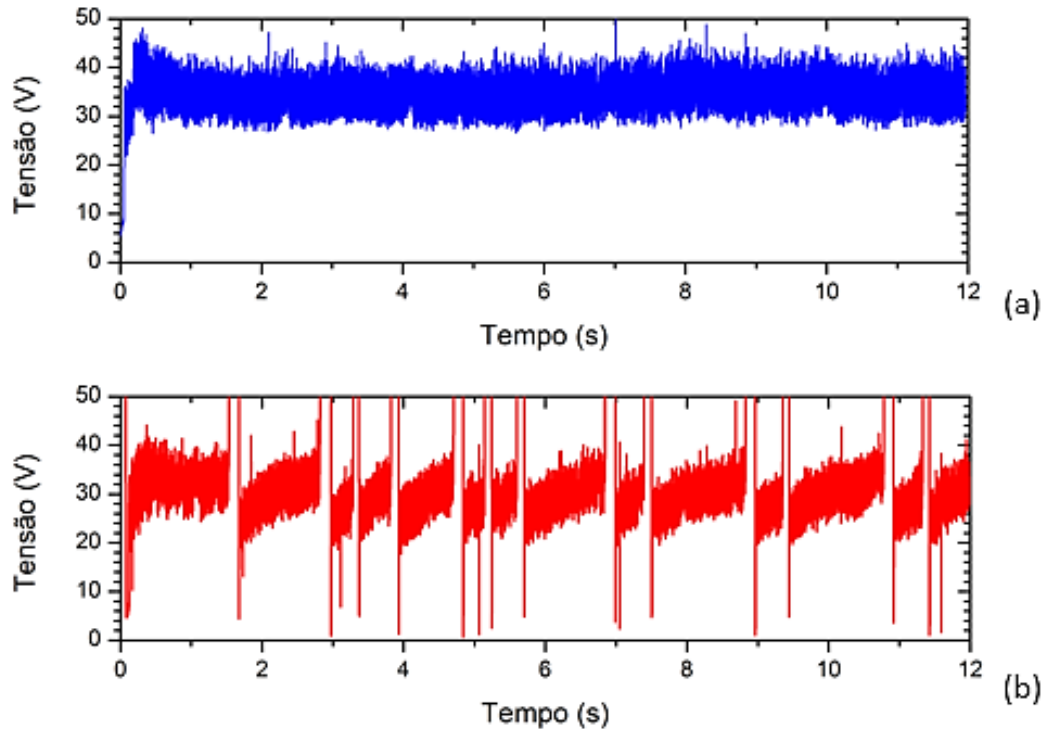


Gráfico 5.5: Frequência de apagamento do arco obtida para as condições testadas. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão

Na Figura 5.22(a), sem oscilação magnética, é apresentado um oscilograma típico de tensão obtido em um teste com o gás Ar-18%CO₂ e que não apresentou extinção do arco. O início do processo ocorre quando o arame toca a peça estabelecendo o arco após um curto-circuito. Inicialmente, a tensão média de operação é menor que o seu valor de regime, o qual é atingido em cerca de 0,5 s após o início da soldagem. Durante o processo, a tensão oscila entre os seus valores de pico (maior) e de base com uma variação de aproximadamente 10 V, mas o seu valor médio mantém-se relativamente constante.

Na Figura 5.22(b), com oscilação ($B_x = 3,5$ mT), é apresentado um oscilograma com extinções em um teste com o mesmo gás de proteção onde não houve a aplicação da oscilação magnética (Figura 5.22(a)). No reestabelecimento do arco ao final de uma extinção, a tensão de soldagem tende a apresentar um valor menor, similar ao observado no início do processo e essa tende a aumentar progressivamente até a ocorrência de uma nova extinção do arco.



(a) sem oscilação magnética e (b) com oscilação ($B_x = 3,5 \text{ mT}$)

Figura 5.22: Oscilogramas de tensão de testes com Ar-18%CO₂

Analogamente, aplicando-se um campo de $B_x = 6\text{mT}$ ocorrências de extinções do arco também podem ser observadas nas soldagens utilizando o gás Ar-4%CO₂. Com a aplicação da oscilação magnética, as extinções tendem a ocorrer quando o campo magnético de oscilação transversal (o de maior intensidade) atinge valores mais elevados, Figura 5.23. Observa-se que, antes de uma extinção, a tensão durante tanto os períodos de pico como os de base aumenta em relação aos seus valores observados após a reabertura do arco. Na Figura 5.24 pode ser visualizado este efeito. Observa-se também, que a distinção entre as tensões no pico e na base ficam menos claras imediatamente antes da extinção do arco, particularmente com os valores da tensão de base se tornando iguais ou, mesmo, maiores que os da tensão de pico, ver os oscilogramas das Figura 5.23, Figura 5.24(a) e Figura 5.24(b).

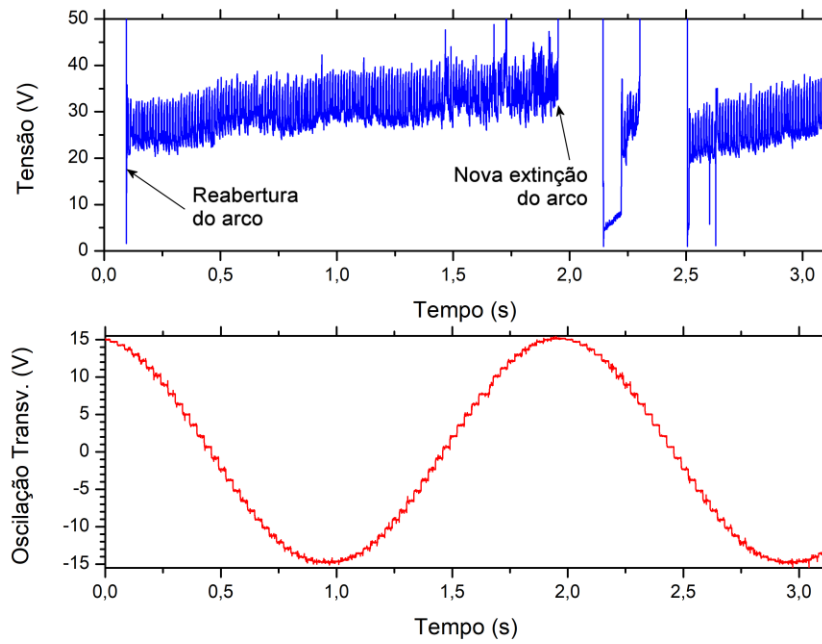
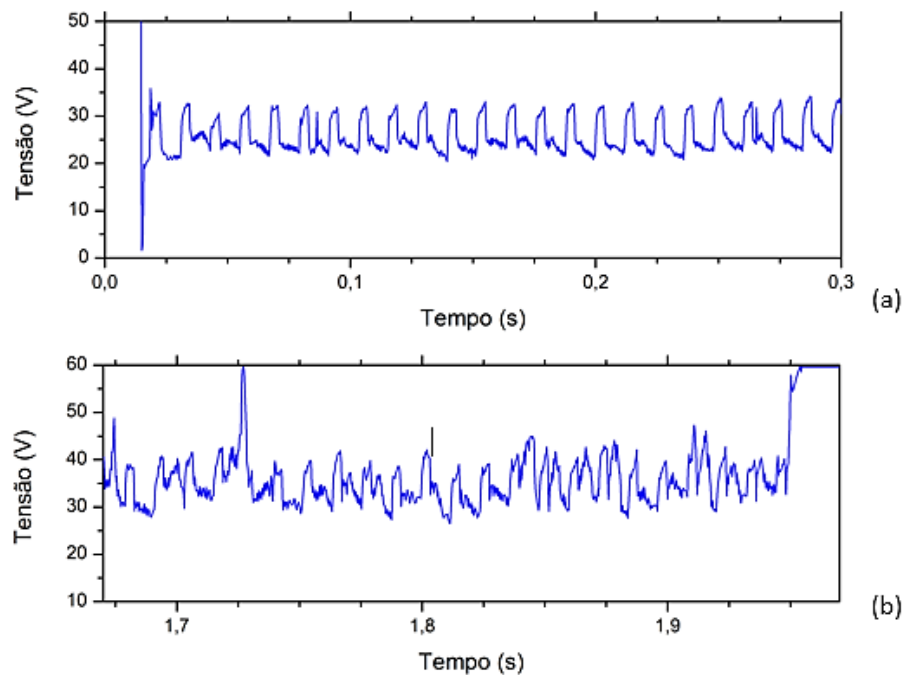


Figura 5.23: Parte dos oscilogramas de tensão e da alimentação da bobina de oscilação transversal do arco em um teste usando Ar-4%CO₂ e B_x = 6 mT

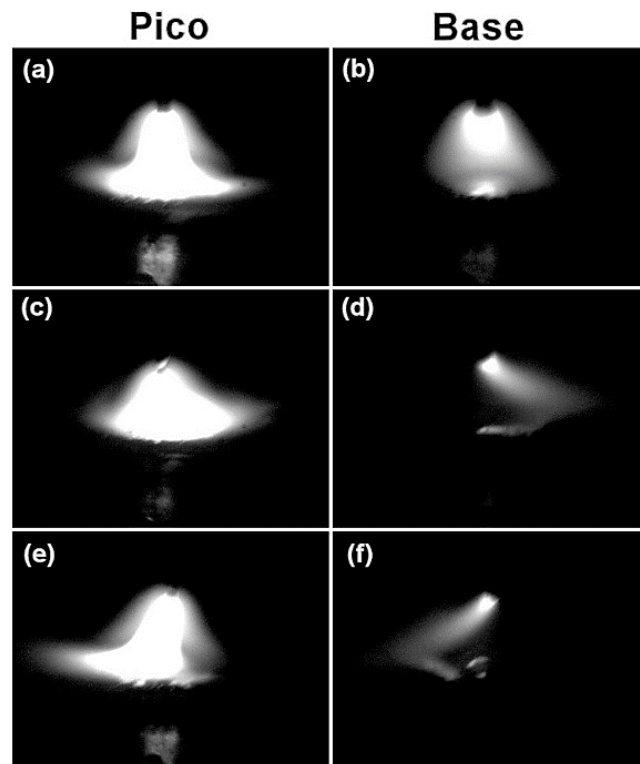


(a) Após a reabertura do arco e em (b) imediatamente antes de sua extinção

Figura 5.24: Detalhe da Figura 5.23 mostrando a variação da tensão de soldagem após a reabertura do arco e imediatamente antes de sua extinção. Testes com Ar-4%CO₂ e campo magnético da bobina de oscilação transversal (B_x = 6 mT)

5.4.2. Imagens da deflexão do arco e transferência metálica sob influência da oscilação magnética controlada

Na Figura 5.25 são apresentadas diferenças de configuração do arco durante os períodos de pico e de base na ausência e na presença do campo magnético. Na ausência ou com o campo magnético próximos de zero (Figura 5.25(a) e Figura 5.25 (b)), o arco tem o formato típico de sino, particularmente durante o período de pico, quando também, há a emissão de maior quantidade de radiação resultante do maior valor de corrente usado. Nessa condição, não se observa nenhuma deflexão aparente do arco tanto no pico como na base. Mas, na presença do campo magnético (Figura 5.25(c) até (f)), a deflexão lateral do arco torna-se aparente, sendo claramente mais intensa no período de base.



(a) e (b) Ausência ou campo magnético de deflexão lateral próximo de zero, em (c) e (d) com seus valores máximos direcionados para a direita e em (e) e (f) com seus valores máximos direcionados para a esquerda

Figura 5.25: Imagens mostrando o formato do arco nos períodos de pico e de base

Se, o arco elétrico se comportasse como um condutor de corrente retilíneo de comprimento " l ", com uma corrente " i " e submetido a um campo magnético " B " a Equação 5.5 poderia informar a força atuante na deflexão do arco.

$$\vec{F} = i * \vec{l} \times \vec{B} \quad \text{Equação 5.5}$$

Nota-se que a Equação 5.5 sugere um maior efeito do campo magnético em arcos mais longos e com maior corrente elétrica. Entretanto, experimentalmente foi determinado por Kang e Na [34] na soldagem GTAW e também neste presente trabalho na soldagem GMAW pulsada, que a amplitude de deflexão do arco em função do seu comprimento e intensidade do campo magnético diminuiu conforme a corrente elétrica aumentou.

Na Figura 5.26 são apresentados quadros retirados de uma das filmagens de alta velocidade a partir de -12 ms antes de uma extinção do arco na presença de oscilação magnética. Os números localizados nos cantos inferiores direitos dos quadros mostram o tempo (em ms) anterior à extinção do arco, que é o que mostra o quadro no tempo -0,96 ms. No primeiro quadro (-12 ms), obtido durante um pico de corrente, o arco apresenta uma deflexão para a esquerda relativamente pequena. Essa deflexão aumenta progressivamente nos quadros seguintes obtidos já em um período de base. Eventualmente, o arco se encurva assumindo um formato aproximado de "C", aumentando progressivamente o seu comprimento até ocorrer a extinção. Comportamento similar foi observado por Scotti e Reis [44] em testes com deflexão magnética do arco na soldagem GTAW que resultavam na extinção do arco.

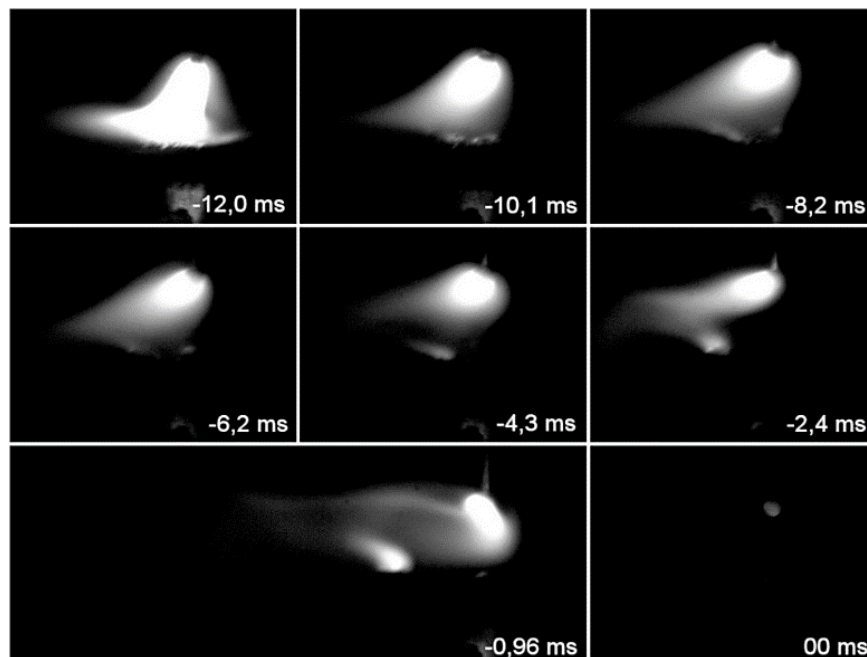


Figura 5.26: Sequência de imagens de uma filmagem de alta velocidade mostrando a extinção do arco durante o período de base

Outras ocorrências que estão ligadas à estabilidade do processo podem ser observadas na Figura 5.27. Nela, são apresentados quadros também retirados de uma das filmagens de alta velocidade que mostra a evolução do processo a partir do reinício do arco. Este evento ocorre quando o eletrodo toca a peça permitindo a passagem da corrente de soldagem por meio de um curto-circuito (Figura 5.27, no instante 00 ms). Nos quadros seguintes, com base na luminosidade do arco, pode-se inferir que o processo opera com a corrente de pico em 5,8 ms e 24 ms após o curto-circuito, e, nos demais instantes, com a corrente de base. Características relevantes dessa sequência de imagens incluem o menor comprimento do arco após a sua reabertura e o seu aumento progressivo. Além disso, pode-se notar uma deflexão do arco relativamente pequena durante o período de base. Embora isso possa estar relacionado com uma coincidência de menor densidade do campo magnético na reabertura do arco, outro fator importante a ser considerado é que essa menor deflexão pode ser consequência, também, do menor comprimento do arco [37].

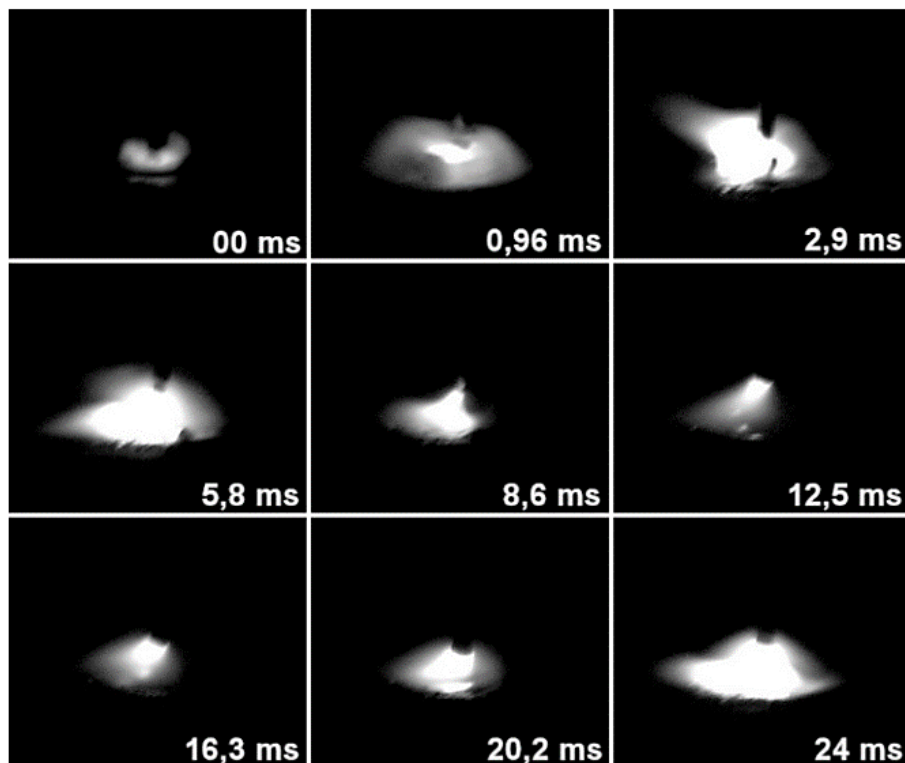


Figura 5.27: Sequência de imagens de uma filmagem de alta velocidade mostrando a extinção do arco durante o período de base

Com base nos resultados obtidos nos testes exploratórios realizados utilizando-se as misturas Ar-4%CO₂ e Ar-18%CO₂, a evolução da instabilidade durante a soldagem GMAW pulsada pelo uso de oscilação magnética pode estar associada a:

- No início do processo ou ao final de um período de extinção do arco, o seu comprimento aumenta progressivamente e, como resultado, se observa um aumento da tensão de operação, ver Figura 5.22(b). No presente caso, em que foi usada uma fonte com imposição de corrente, tanto na base como no pico e alimentação de arame com velocidade constante, o ajuste do comprimento do arco no início do processo parece demorar cerca de 0,5 s. Com isso à medida em que o seu comprimento aumenta, o arco fica mais sensível ao campo magnético imposto pelos eletroímãs.
- Durante os períodos de base, a menor corrente de soldagem favorece uma maior deflexão do arco pelo campo magnético e essa deflexão aumenta à medida que o campo magnético cresce. Com a deflexão do arco, o caminho percorrido pela corrente de soldagem é alongado e, assim, a tensão de soldagem aumenta ainda mais. Com isso, a tensão instantânea durante esses períodos tende a aumentar mais fortemente do que a tensão nos períodos de pico, ver Figura 5.22(b). Porém, eventualmente também pode ocorrer em um período de pico, pois, o arco se torna tão longo e a tensão necessária para a sua manutenção tão elevada que o arco apaga.
- Com o uso de misturas de proteção contendo CO_2 , um maior teor desse gás resulta em uma maior dificuldade de se obter transferência de metal por *spray* e, como já mencionado anteriormente, um aumento da tensão de operação se torna necessário para um dado comprimento de arco, [44] e [47-49]. Como resultado, o aumento da tensão média de soldagem após a abertura do arco tende a ocorrer de forma mais forte quando o teor de CO_2 na mistura é mais elevado. Assim, em função desses três fatores (variação do comprimento do arco após a sua reabertura, deflexão lateral do mesmo devido ao campo magnético e composição da mistura de proteção), a tensão média de soldagem tende a aumentar do final de uma extinção do arco até a ocorrência de uma nova extinção. Esse efeito deve estar ligado à já mencionada característica do CO_2 de aumentar as perdas de energia do arco [48].

Como exemplo da instabilidade do processo em função do gás de proteção e, intensidade de campo magnético aplicado na região do arco, na Figura 5.28, são mostrados dois oscilogramas referentes aos testes utilizando a mistura 18% CO_2 com diferentes amplitudes de oscilação e, adicionalmente, como foi obtido uma taxa de crescimento da tensão em função de “Bx”. O critério adotado para a determinação desta taxa foi analisar o maior número possível de eventos de variação das tensões (de base e de pico) ao longo de, no mínimo 10 segundos.

As análises também consideraram os intervalos de arco sem extinção, durante um período de, no mínimo de 0,5 s. Baseado nestas condições foi estabelecida a Equação 5.6.

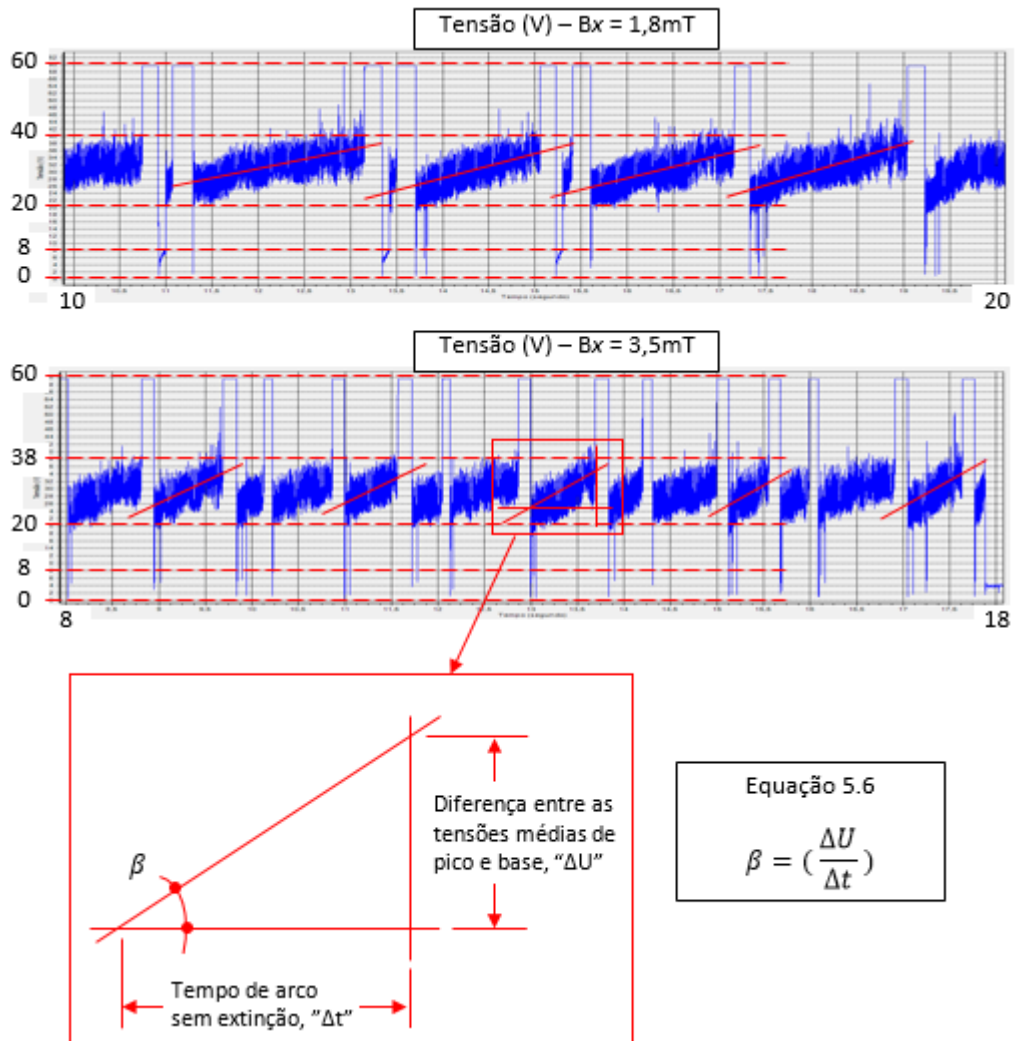
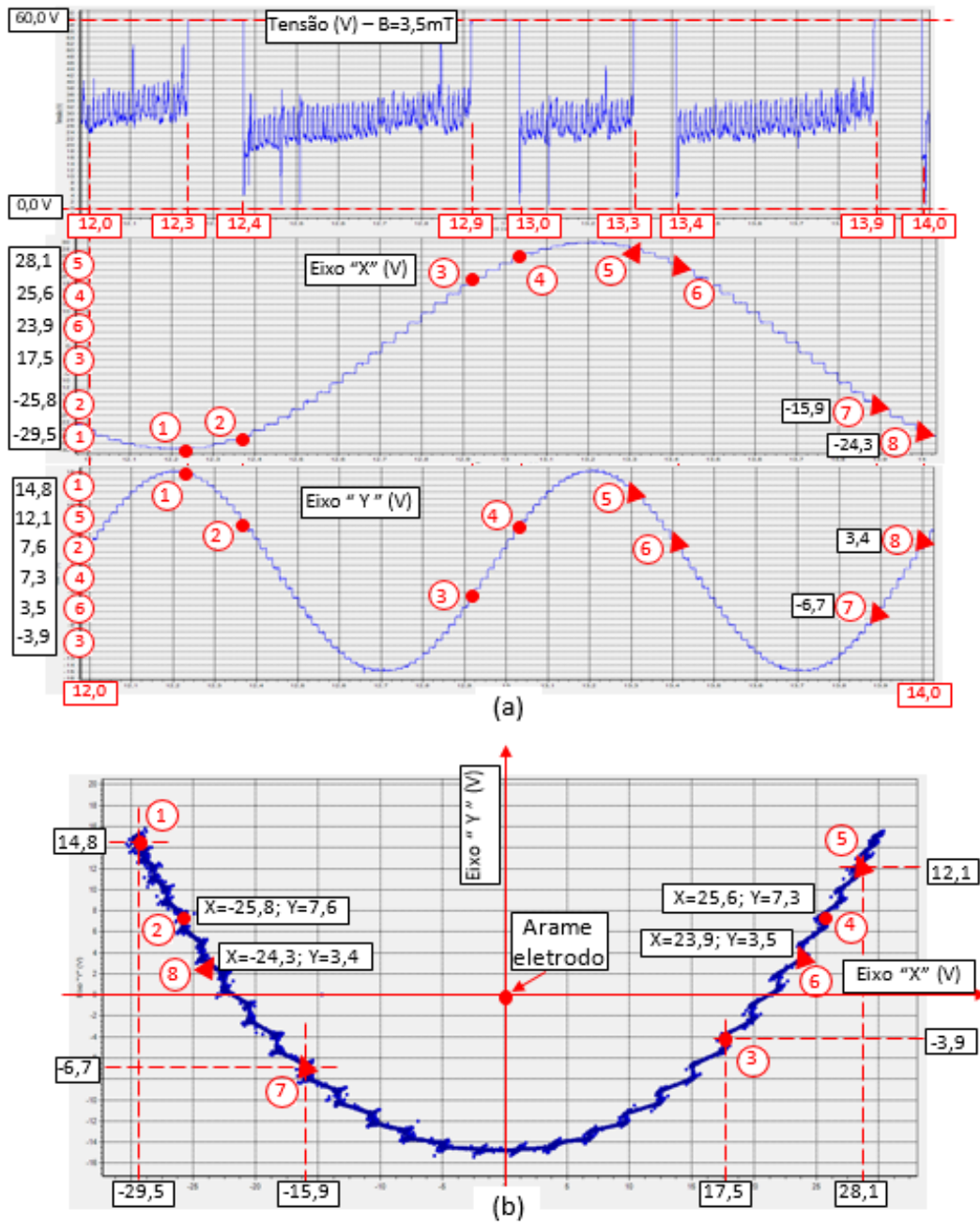


Figura 5.28: Cálculo de “ β ” (Taxa de crescimento da tensão elétrica do arco) para o processo GMAW goticular pulsado. Gás de proteção 18%CO₂

Na Figura 5.29 são apresentados exemplos das variações de tensão da soldagem do teste onde $B_x = 3,5 \text{ mT}$ em conjunto com as tensões de alimentação dos eletroímãs de oscilação transversal e longitudinal do arco. Um aspecto que se destaca é o aumento na tensão de processo que ocorre aproximadamente quando a tensão de alimentação do eletroímã da oscilação transversal (eixo “X”) atinge seus valores máximos (em valor absoluto). Observa-se que, com a aplicação de campo magnético mais intenso a taxa de variação da tensão elétrica na soldagem se torna maior e pode levar a extinções do arco.

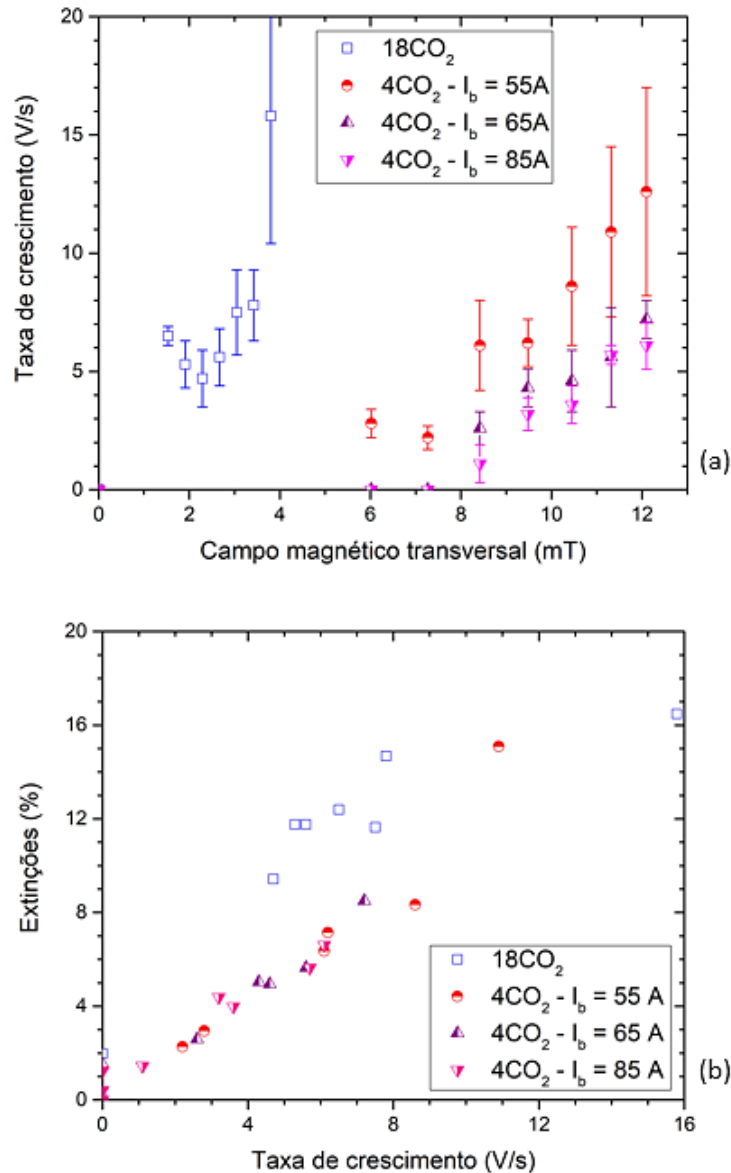


(a) Localização das interrupções do arco ao longo da trajetória de deflexão no oscilograma e (b) localização das interrupções do arco ao longo da trajetória de deflexão do arco, com oscilação magnética $B_x = 3,5 \text{ mT}$ e $B_y = 1,8 \text{ mT}$ ($X20 \text{ V}$ e $Y10 \text{ V}$) com gás $18\% \text{CO}_2$

Figura 5.29: Localização, no oscilograma, das interrupções do arco ao longo da trajetória de deflexão

Além disso, a taxa de crescimento da tensão " β " mostra-se maior para a mistura mais rica em CO_2 e também para maiores campos magnéticos aplicados. No Gráfico 5.6 pode ser

visualizado este efeito. A correlação existente entre o Gráfico 5.6 (b) e a Figura 5.28, indica haver uma taxa de crescimento da tensão de soldagem em função da instabilidade do processo. Observa-se no Gráfico 5.6 que, além de favorecer maiores taxas de crescimento da tensão com o campo magnético, o maior teor de CO_2 na mistura de proteção contribui para uma maior ocorrência de extinções do arco conforme esta taxa de aumento da tensão.



(a) Taxa média de crescimento da tensão entre uma reignição do arco e a sua próxima extinção em função da intensidade do campo magnético e em (b) a relação entre essa taxa e a porcentagem do tempo de soldagem com o arco extinto

Gráfico 5.6: Taxa média de crescimento da tensão entre uma reignição do arco e a sua próxima extinção em função da intensidade do campo magnético

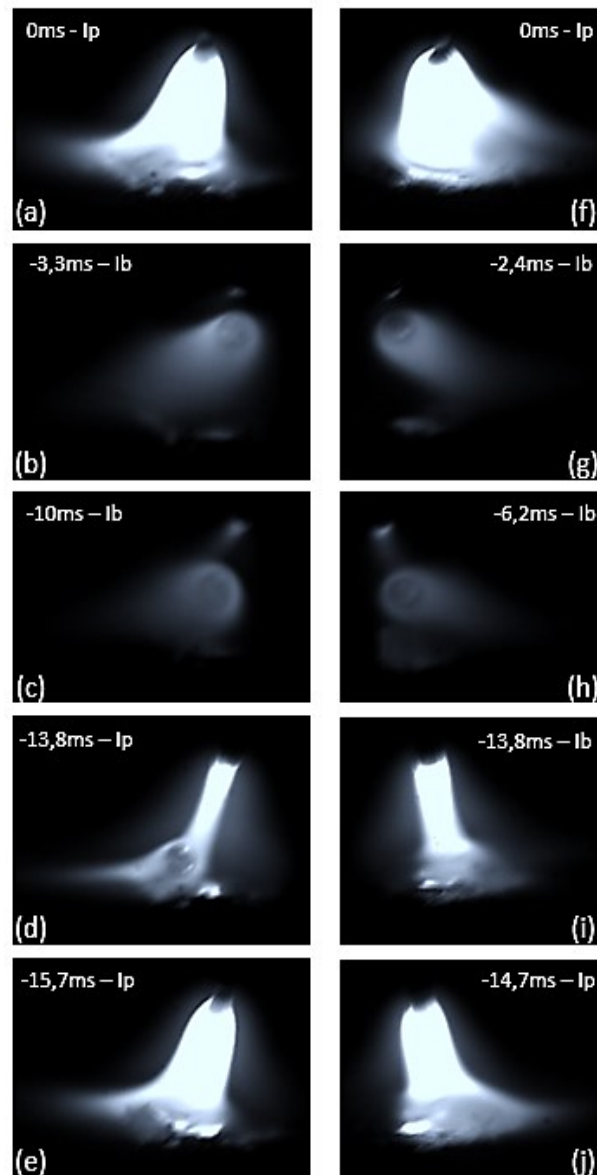
Adicionalmente, como a deflexão do arco é maior nos períodos de base e, essa é inversamente proporcional ao valor da corrente [34] e [35], a tendência ao apagamento do arco pode ser reduzida aumentando o valor da corrente de base. Contudo, nas condições usadas no presente estudo, o menor teor de CO₂ na mistura de proteção foi mais determinante para a estabilidade do processo.

Enfim, esta série de experimentos comparativos entre os gases Ar-18%CO₂ e Ar-4%CO₂ foram necessários, pois, como as análises mostraram, o teor de CO₂ na proteção contribuiu com a instabilidade do processo. Neste contexto, um breve resumo vem a seguir:

- A instabilidade no processo é favorecida pelo aumento do teor de CO₂ no gás de proteção, também pelo aumento da indução magnética aplicada para a oscilação do arco e por menores valores da corrente de base.
- A causa básica da extinção do arco foi a sua elevada deflexão quando a corrente de soldagem atinge o seu menor valor (isto é, no período de base). Essa deflexão resulta em um grande aumento do comprimento efetivo de arco, aumentando a sua perda de energia para o meio ambiente também a sua tensão de operação favorecendo o seu apagamento.
- A instabilidade é causada pela extinção do arco que tende a ocorrer preferencialmente quando a deflexão do arco pelo campo magnético é máxima.

Com estas informações, foi decidido utilizar o Ar-4%CO₂ – 85 A como gás de proteção e parâmetros de soldagem da Tabela 5.6 para os testes que se seguiram no processo GMAW pulsado.

Com o objetivo de se certificar que, conforme as deflexões acontecem a fonte de calor (arco elétrico e metal de adição) tende a acompanhar o padrão da oscilação magnética externa [56], por meio da filmagem em alta velocidade foram obtidas imagens entre os intervalos de corrente de pulso e de base. Na Figura 5.30 são apresentadas imagens sequenciais das oscilações tanto para a esquerda como para a direita. Nestas imagens observa-se os respectivos intervalos próximos de 13,5 ms correspondentes à duração do tempo da corrente de base, justamente onde preferencialmente acontece a transferência metálica. Nesta solda utilizou-se oscilação “meia lua” ($F_x/F_y=1/2$ e $\phi = \pi/4$), $B_x = 12,7$ mT. Nas respectivas escalas de tempo que iniciam em (a) e (f) 0 ms e seguem até (e) e (j), pode ser visto que a transferência acontece até as imagens (d) e (i) -13,8 ms que é quando se inicia o período de pico de corrente e a transferência metálica se completa.



(a) e (f) Final da corrente de pico, (b), (c), (g) e (h) tempo ao longo da corrente de base e transferência metálica, (d) e (i) final do tempo da corrente de base, final da transferência metálica e início da corrente de pico, (e) e (j) corrente de pico

Figura 5.30: Transferência metálica na soldagem GMAW pulsada com deflexão do arco por oscilação magnética controlada do arco

Igualmente aos procedimentos das soldagens GTAW autógena e GMAW por curto circuito, foram realizados a seguir, cordões sobre chapa com GMAW no modo pulsado tendo como propósito melhorar o entendimento sobre o comportamento do arco/poça de fusão seguindo padrões de oscilação impostos ao processo antes de se realizar as soldagens em peças chanfradas.

5.4.3. Formato do cordão

Inicialmente foram feitas soldas com o processo GMAW pulsado sem a atuação da oscilação magnética e conforme os parâmetros de soldagem da Tabela 5.6, Ar-4%CO₂ – 85 A. Na Figura 5.31 é apresentado as características gerais de um dos cordões produzidos.



Figura 5.31: Cordão produzido sem imposição de oscilação magnética. Parâmetros de soldagem conforme Tabela 5.6, Ar-4%CO₂ – 85 A

Na Figura 5.32 são apresentadas imagens das soldas anteriores que também foram feitas sem oscilação magnética, porém, nos processos GTAW autógeno, GMAW por curto circuito e GMAW pulsado, ou seja, soldagens sem e com deposição de metal. Com isso foi possível obter uma referência comparativa para se identificar, quando ocorreram, evidências da movimentação do arco/poça de fusão conforme a oscilação magnética seguindo determinada Figuras de Lissajous como forma de tecimento.

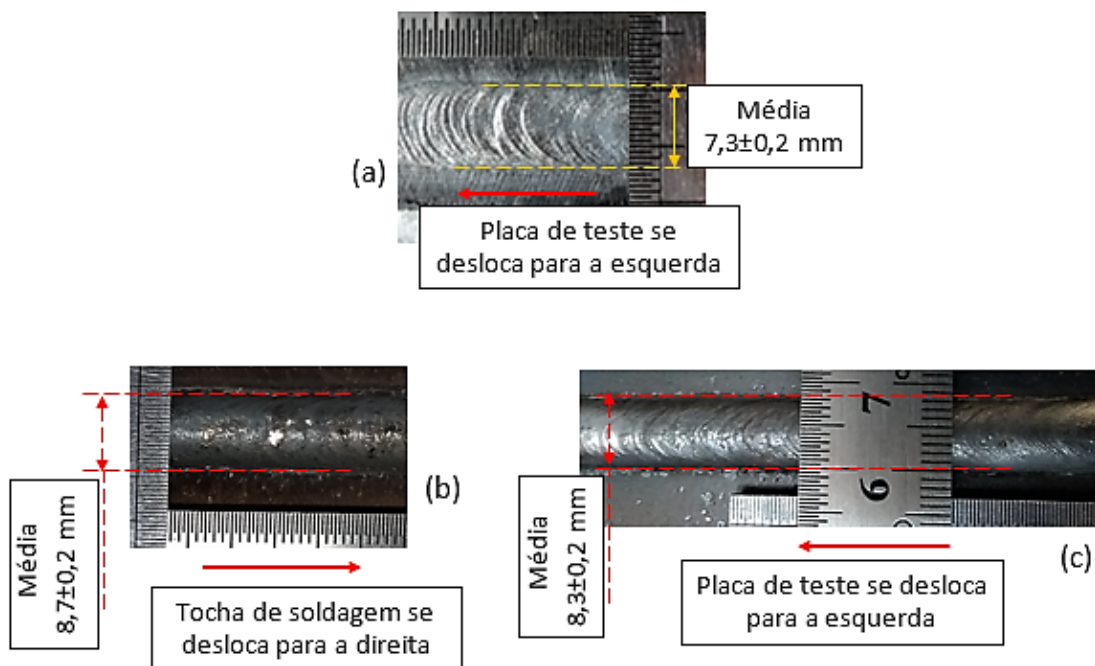
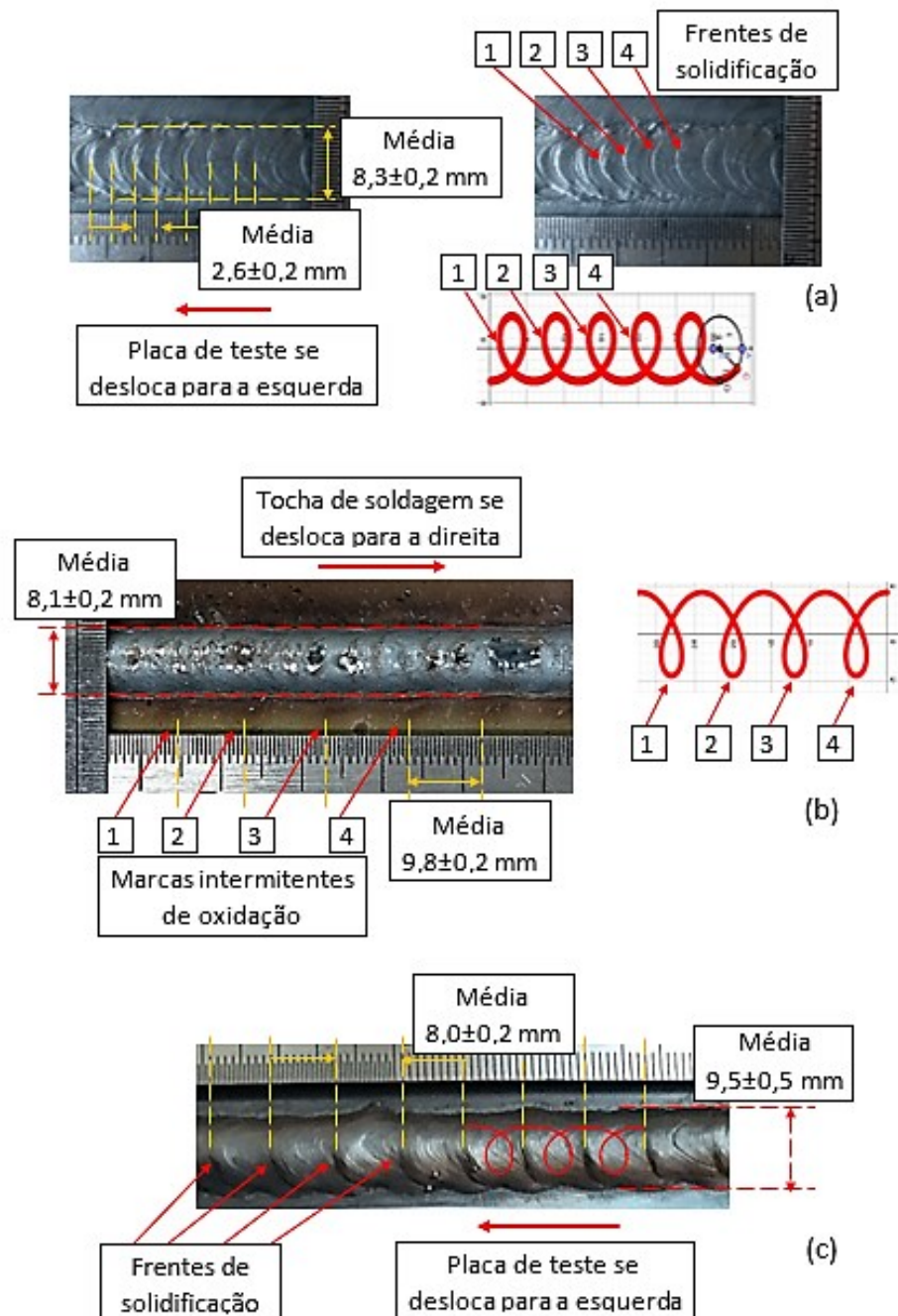


Figura 5.32: Cordões produzidos sem imposição de oscilação magnética. (a) no processo GTAW autógeno (b) GMAW transferência por curto circuito e (c) GMAW pulsado






Posteriormente, foram feitas e fotografadas 3 soldas no GMAW pulsado, seguindo a Figura de Lissajous-Círculo, condição (f) da Tabela 5.8 e com os mesmos parâmetros de soldagem da Tabela 5.6, Ar-4%CO₂ – 85 A. Em seguida realizou-se comparações visuais e dimensionais entre estes cordões e os similares que foram produzidos anteriormente no GTAW autógeno e GMAW transferência por curto circuito. Na Figura 5.33 são apresentadas imagens correspondentes às respectivas soldagens.



(a) Solda GTAW autógena, $B_x=9,9$ mT; (b) solda GMAW transferência por curto circuito, $B_x=12,9$ mT e (c) solda GMAW pulsado, $B_x=8,5$ mT. Frequências de oscilação 0,5 Hz

Figura 5.33: Comparação entre cordões produzidos nos processos GTAW autógeno, GMAW com transferência por curto circuito e GMAW pulsado

Tabela 5.8: Características das Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento nos testes sobre chapa com soldagem GMAW pulsada

	Condição (c)		Condição (d)		Condição (e)		Condição (f)		Condição (g)	
	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”
Tipo de onda	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Quadr.	Triang.
Amplitude (mT)	5,6	3,0	11,6	6,8	8,5	8,5	8,5	8,5	7,4	0,1
F_x / F_y	1/2		1/2		1/1		1/1		1/2	
Frequência (Hz)	0,5		0,5		0,1		0,5		0,1	
Simetria (%)	50	50	50	50	50	50	50	50	10	90
Offset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ângulo de fase (rad)	$\pi/4$	---	$\pi/4$	---	$\pi/2$	---	$\pi/2$	---	$\pi/4$	---
Figura de Lissajous	“Meia-Lua” 		“Meia-Lua” 		“Círculo” 		“Círculo” 		“Desloc. lateral” 	
OBS.: “X” – Oscilação transversal, “Y” – Oscilação longitudinal										

Comparando-se os cordões obtidos no GMAW pulsado com os da transferência por curto circuito observa-se maiores evidências do efeito de tecimento causado pela ação da oscilação magnética no formato do cordão realizado no GMAW pulsado. Este fato pode ser explicado devido ao maior comprimento médio de arco usado na soldagem pulsada e também pela existência de uma corrente de base, que por sua vez, é de menor valor do que a corrente utilizada para a soldagem por curto circuito, mesmo tendo sido aplicado um campo magnético menos intenso na soldagem pulsada.

Quanto aos cordões obtidos no GMAW pulsado em comparação com os obtidos no GTAW autógeno observa-se que, os da soldagem GMAW são mais largos, similarmente aos encontrados na dissertação de Larquer [63], apesar de, na presente tese, ter sido empregado campos magnéticos menos intensos. Isso, de certa forma era esperado porque, conforme foi relatado anteriormente, o metal de adição tende a ser lançado da ponta do arame eletrodo em direção à peça seguindo o arco elétrico e para onde este é defletido. Com isso, o cordão forma-se a partir do metal de adição que foi depositado e não a partir da formação de uma poça de fusão no metal de base como acontece no processo GTAW autógeno.

Quanto ao sincronismo entre a formação das frentes de solidificação em função da velocidade de soldagem e a frequência de oscilação, nota-se que, na soldagem GMAW pulsada o valor médio de $8,0 \pm 0,2$ mm corresponde ao intervalo calculado, ou seja, oscilações com frequência de 0,5 Hz a uma velocidade de soldagem de 4 mm/s tende a produzir algum tipo de evidência no cordão a cada 8 mm.

Nota-se também que, a poça de fusão mais volumosa (devido a adição de metal na soldagem pulsada) dificulta a ocorrências dos eventos relativos à sua movimentação, reduzindo

assim os efeitos térmicos quanto à distribuição de calor na região da solda e indícios referentes às frentes de solidificação no formato do cordão.

Na Figura 5.34 são apresentados exemplos de macrografias e medições (realizadas utilizando-se o software *Image J*) de seções transversais em um dos cordões feitos no processo GMAW pulsado (condição (f) da Tabela 5.8). Nestas imagens é possível observar indícios comprobatórios quanto aos eventos relativos à movimentação do arco/poça de fusão. O Corte “XX” foi realizado onde houve acúmulo de metal de solda. Tal acúmulo resultou da curva do movimento circular quando este se deslocou na mesma direção da soldagem (como se o arco estivesse sendo defletido para um único lugar sobre a chapa). O Corte “ZZ” foi feito onde ocorreu menor acúmulo de metal de solda. Tal redução resultou quando a curva do movimento circular ocorreu na direção oposta ao da soldagem (somatória da velocidade de deslocamento da chapa com o efeito da deflexão do arco).

Na Tabela 5.9 consta as medições que foram feitas nas macrografias apresentadas como exemplo na Figura 5.34

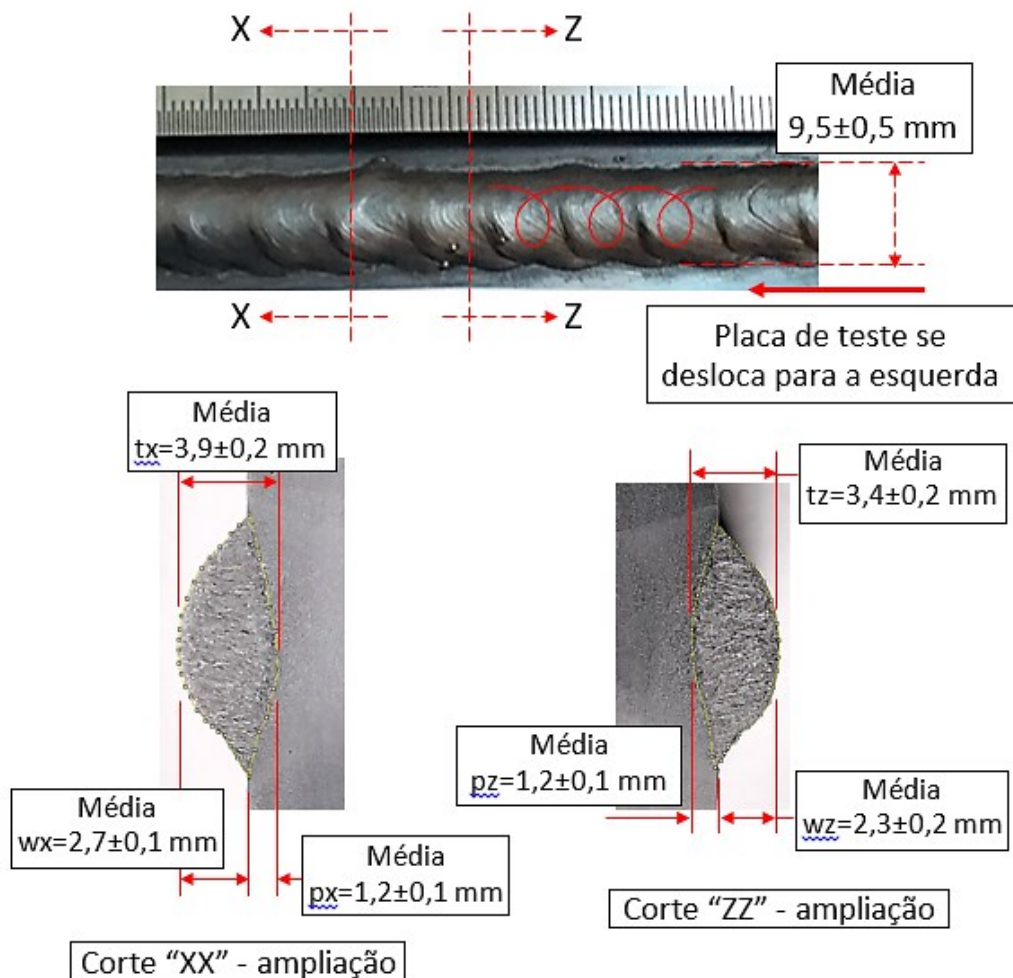


Figura 5.34: Macrografias de seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (f) da Tabela 5.8

Tabela 5.9: Medições das macrografias referente às seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (f) da Tabela 5.8

	Corte "XX"			Corte "ZZ"		
	tx	wx	px	tz	wz	pz
Corte 1	4,2	2,9	1,3	3,8	2,6	1,2
Corte 2	3,6	2,6	1,0	3,2	2,1	1,1
Corte 3	3,9	2,7	1,2	3,4	2,1	1,2
Desvio Padrão	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
Média	3,9	2,7	1,2	3,4	2,3	1,2

Afim de se visualizar com mais clareza o resultado da movimentação do arco/poça de fusão no processo GMAW pulsado sobre chapa, realizou-se ensaios na condição (e) da Tabela 5.8. Na Figura 5.35 é apresentado um dos cordões que foram produzidos, no qual, observa-se seu formato sinuoso recorrente da deposição de metal/deslocamento da poça de fusão que seguiu o mesmo padrão de tecimento, "Círculo", das soldas anteriores. Com este teste foi possível observar a formação de intervalos entre os contornos de cada "Círculo" completo, em média, a cada $40,0 \pm 0,5$ mm. Esta medida corresponde ao valor calculado, ou seja, oscilações com frequência de 0,1 Hz a uma velocidade de soldagem de 4 mm/s tende a produzir algum tipo de evidência no cordão a cada 40 mm.

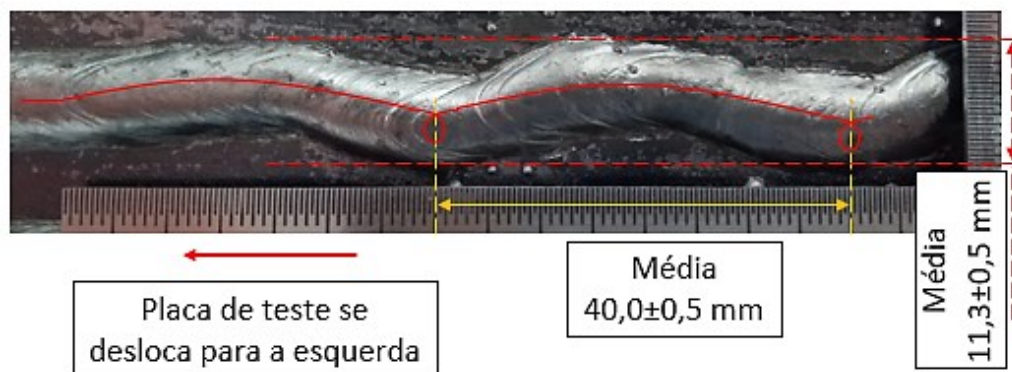
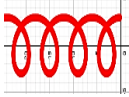
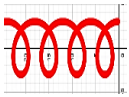


Figura 5.35: Cordão produzido seguindo Figura de Lissajous, condição (e) da Tabela 5.8

Na Tabela 5.10 consta as medições que foram feitas nos cordões representados na Figura 5.33(c) e Figura 5.35.

Tabela 5.10: Medições realizadas nos cordões da soldagem GMAW pulsada sem e com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Círculo”

	sem oscilação		 0,5 Hz	 0,1 Hz		
	Largura	Intervalo	Largura	Intervalo	Largura	Intervalo
Placa de teste 1	8,2	n/a	10,0	8,0	11,0	40,2
	8,0		9,7	8,0	11,7	39,5
	8,5		9,0	7,7	11,5	40,0
Desvio Padrão	0,2		0,42	0,14	0,29	0,29
Placa de teste 2	8,2		10,0	8,0	12,0	39,7
	8,5		9,0	8,2	11,0	41,0
	8,2		9,7	8,2	11,2	40,0
Desvio Padrão	0,1		0,42	0,09	0,43	0,56
Placa de teste 3	8,0		10,0	8,0	10,7	40,0
	8,5		9,5	7,7	12,0	41,0
	8,2		9,0	8,2	11,0	40,5
Desvio Padrão	0,2		0,41	0,21	0,56	0,41
Média	8,3		9,5	8,0	11,3	40,0
Média Desvio Padr.	0,18	0,42	0,15	0,43	0,42	

Outro fator importante além da frequência, é a amplitude transversal de metal de solda (referente ao sentido de deslocamento da soldagem) que foi alcançada. Observa-se que, não havendo acúmulo sucessivo de metal de solda entre as oscilações na região do cordão (poça de fusão menos volumosa) este atingiu uma largura média de $11,3 \pm 0,5$ mm aplicando-se campo magnético com os mesmos $B_x = 8,5$ mT. Este fato corrobora com o que foi mencionado anteriormente, ou seja, uma poça de fusão volumosa tende a dificultar sua movimentação.

Da mesma forma que na Figura 5.34, na Figura 5.36 são apresentados exemplos de macrografias e medições (realizadas utilizando-se o software *Image J*) de seções transversais em um dos cordões feitos no processo GMAW pulsado, mas agora, na condição (e) da Tabela 5.8. Nestas imagens é possível observar os mesmos indícios comprobatórios quanto aos eventos relativos à movimentação do arco/poça de fusão. O Corte “ZZ” foi realizado onde houve acúmulo e o Corte “XX” onde ocorreu menor acúmulo de metal de solda. As razões para tal acontecimento são as mesmas relatadas referente à Figura 5.34.

Na Tabela 5.11 consta as medições que foram feitas nas macrografias apresentadas como exemplo na Figura 5.36.

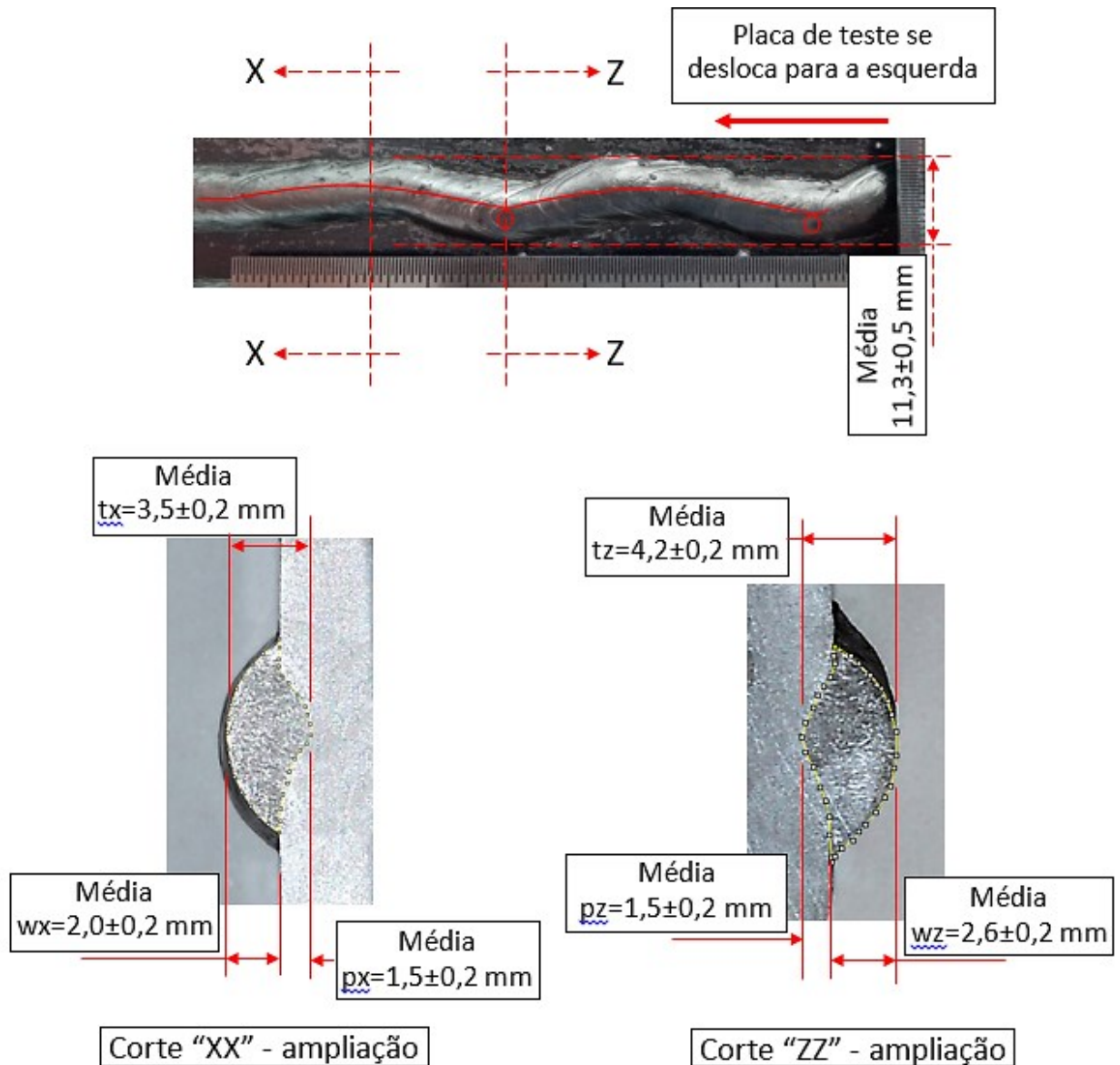


Figura 5.36: Macrografias de seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (e) da Tabela 5.8

Tabela 5.11: Medições das macrografias referente às seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (e) da Tabela 5.8

	Corte "XX"			Corte "ZZ"		
	tx	wx	px	tz	wz	pz
Corte 1	3,3	2,0	1,2	4,4	2,7	1,7
Corte 2	3,7	2,2	1,6	4,1	2,4	1,7
Corte 3	3,5	1,8	1,7	4,0	2,8	1,2
Desvio Padrão	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Média	3,5	2,0	1,5	4,2	2,6	1,5

Adicionalmente ao estudo, na Figura 5.37 é apresentado o desvio de trajetória em um cordão com a aplicação de oscilação transversal com uma onda “quadrada” e frequência de 0,1 Hz (condição (g) da Tabela 5.8, “Deslocamento Lateral”), sendo que, na região onde nota-se o deslocamento acentuado do cordão, aplicou-se a deflexão do arco durante dois períodos consecutivos para evidenciar o fenômeno. Observando-se a Figura 5.37 e diferentemente do encontrado em outros padrões de oscilação, nota-se um deslocamento lateral do cordão de aproximadamente 2,5 mm com a variação do campo magnético. Contudo, percebe-se também que a mudança de posição do cordão ocorreu ao longo de aproximadamente 7,5 mm (algo entorno de 1,9 s) de comprimento do cordão apesar do campo magnético ter variado em poucos milissegundos [52] (acionamento eletrônico para a mudança lateral de oscilação). Esse comportamento também pode estar ligado à dificuldade de movimentação da volumosa poça de fusão, além da frequência de oscilação ter sido superior a 60Hz, conforme foi relatado por Landgraf [27].

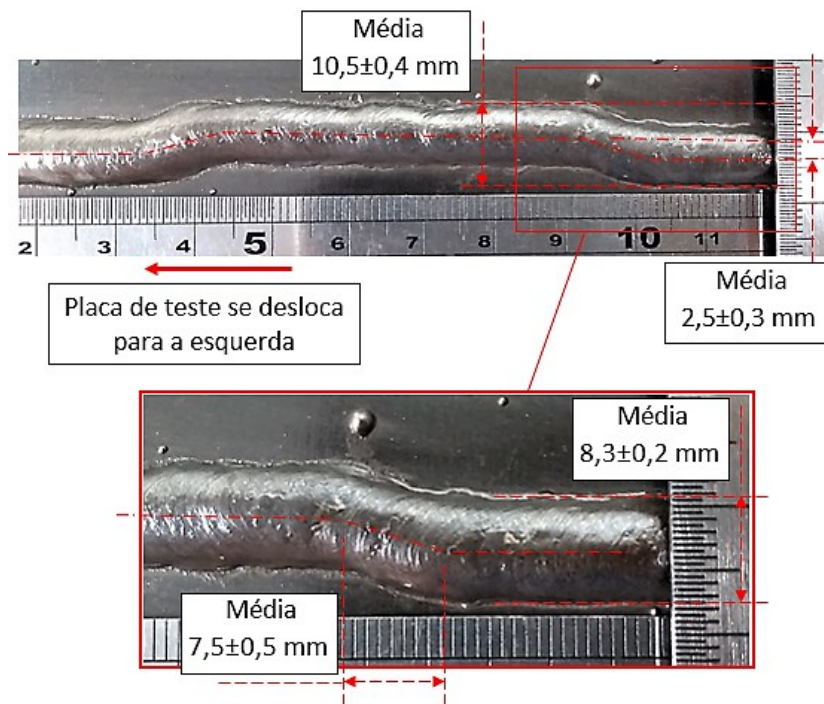



Figura 5.37: Cordão obtidos com GMAW pulsada conforme condição (g) da Tabela 5.8 e parâmetro de soldagem da Tabela 5.6, Ar-4%CO₂ – 85 A

Na Tabela 5.12 consta as medições que foram feitas nos cordões apresentados na Figura 5.37.

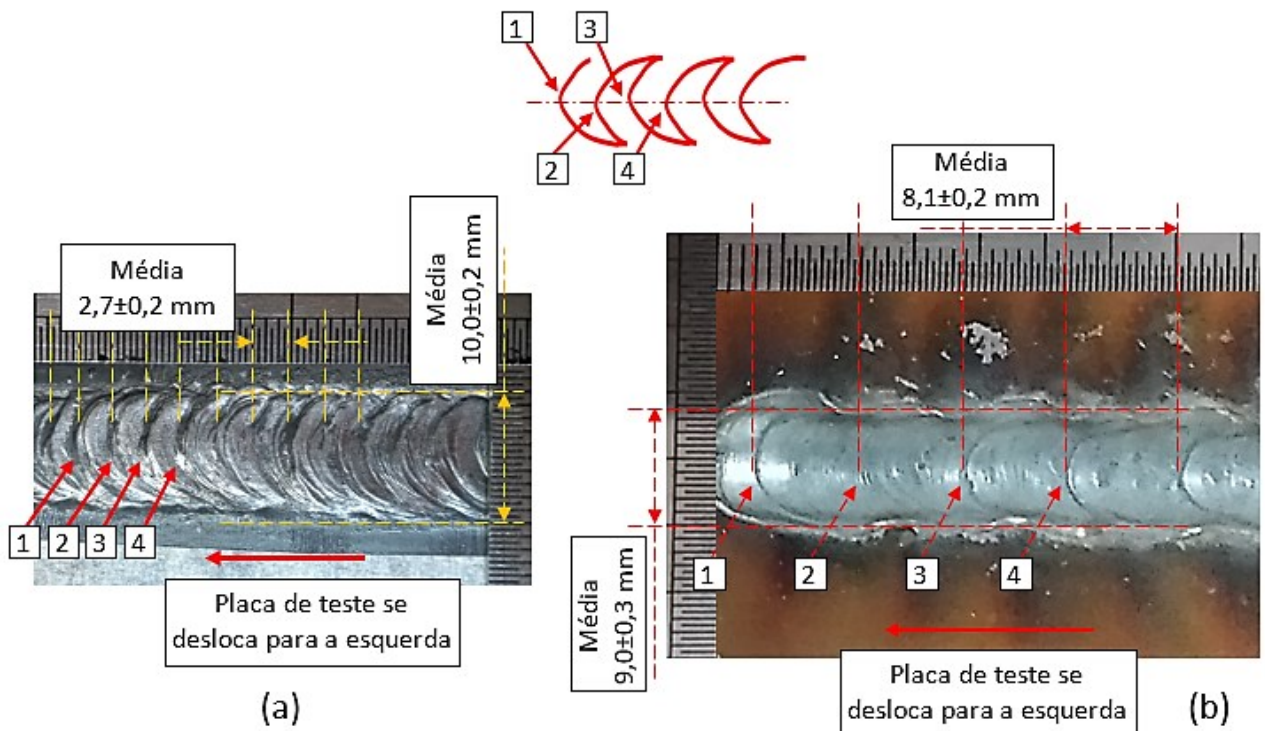
Tabela 5.12: Medições realizadas nos cordões da soldagem GMAW pulsada com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Deslocamento Lateral”

			
	Largura	Intervalo	Desvio
Placa de teste 1	11,0	7,0	2,5
	10,2	7,5	2,2
	11,2	8,0	2,7
Desvio Padrão	0,4	0,4	0,2
Placa de teste 2	10,7	7,0	2,5
	10,0	8,5	2,0
	10,5	7,2	2,7
Desvio Padrão	0,3	0,7	0,3
Placa de teste 3	10,2	7,5	2,5
	9,7	7,0	2,2
	10,7	7,7	3,0
Desvio Padrão	0,4	0,3	0,3
Média	10,5	7,5	2,5
Media Desvio Padrão	0,38	0,46	0,28

Buscando ratificar os efeitos da oscilação magnética imposta na soldagem, foram feitas comparações entre as soldas produzidas nos processos GTAW autógeno e GMAW pulsada utilizando-se o tecimento seguindo a Figura de Lissajous, “Meia Lua”.

As análises foram feitas de forma comparativa entre os processos considerando-se evidências das formações de frentes de solidificação nos cordões. Cada soldagem, nas condições deste estudo, produziu seus respectivos cordões submetidos a um campo magnético específico. Na Figura 5.38 são apresentadas imagens referentes às soldagens onde em (a) está a fotografia de um dos cordões produzidos no GTAW autógeno com intensidade de campo magnético $B_x=9,9$ mT (condição (a) da Tabela 5.1) e em (b) a fotografia refere-se à solda feita no GMAW pulsado (condição (c) da Tabela 5.8) com $B_x=5,6$ mT.

Os resultados apresentaram as ocorrências de frentes de solidificação em ambos os processos e de acordo com o padrão de tecimento que foi aplicado. Isso aconteceu mesmo na presença de um campo magnético menos intenso atuando em um cordão mais volumoso (GMAW pulsado). A numeração de 1 até 4 indica as frentes de solidificação presentes em intervalos médios de $2,7\pm 0,2$ mm e $8,1\pm 0,2$ mm. Estes são valores próximos aos calculados, ou seja, 2,8 mm e 8 mm respectivamente para os processos GTAW e GMAW.





(a) Cordão GTAW autógeno, $B_x=9,9$ mT e (b) GMAW pulsado, $B_x=5,6$ mT

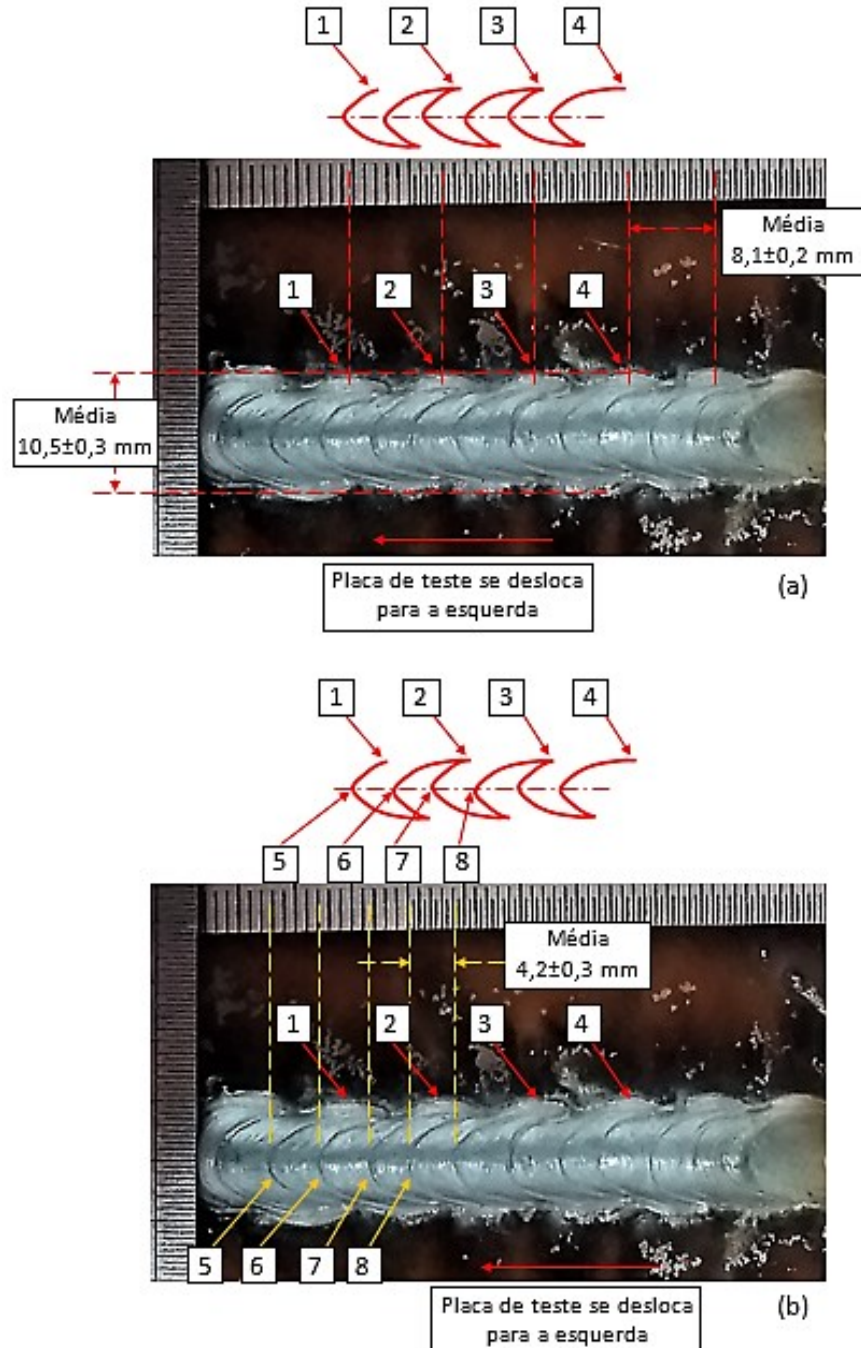
Figura 5.38: Cordões de solda obtidos nos processos GTAW autógeno e GMAW pulsado

Na Tabela 5.13 consta as medições que foram feitas nos cordões representados pela Figura 5.38.

Tabela 5.13: Medições realizadas nos cordões das soldagens GTAW autógena e GMAW pulsada com a aplicação de tecimento seguindo Figura de Lissajous “Meia Lua”

	 GTAW autóg; 0,5 Hz ; Velocsolda = 1,4 mm/s		 GMAW pulso; 0,5 Hz ; Velocsolda = 4,0 mm/s	
	Largura	Intervalo	Largura	Intervalo
Placa de teste 1	10,2	2,5	8,7	8,0
	9,7	3,0	9,5	8,2
	10,0	2,7	9,0	8,0
Desv. Padr.	0,21	0,21	0,33	0,09
Placa de teste 2	10,0	2,7	9,5	8,0
	10,2	2,5	9,0	7,7
	10,0	2,7	8,7	8,2
Desv. Padr.	0,09	0,09	0,33	0,21
Placa de teste 3	10,0	3,0	8,7	8,2
	10,2	2,7	9,2	7,7
	9,7	2,5	9,0	7,7
Desv. Padr.	0,21	0,21	0,21	0,24
Média	10,0	2,7	9,0	8,1
Media Desv. Padr.	0,17	0,17	0,29	0,18

Na Figura 5.39 são apresentadas imagens de um dos cordões feitos conforme a condição (d) da Tabela 5.8 e parâmetros de soldagem da Tabela 5.6, Ar-4%CO₂ – 85 A. O objetivo foi comparar, dimensionalmente, as soldas feitas nas condições (c) e (d) da Tabela 5.8 onde variou-se a intensidade do campo magnético aplicado na soldagem. Na região superior de cada imagem está a representação do padrão de tecimento em função da frequência e velocidade de soldagem.



(a) Largura do cordão e frentes de solidificação a cada ciclo completo de oscilação, (b) intervalos entre as frentes de solidificação a cada meio ciclo de oscilação



Figura 5.39: Cordão de solda sobre chapa obtido com GMAW pulsada. Figura de Lissajous “Meia Lua”, condição (d) Tabela 5.8

Tomando-se como referência a Figura 5.39 observa-se visualmente que a amplitude de $B_x=11,6$ mT produziu cordões mais largos e com evidências mais nítidas quanto à movimentação do arco/poça de fusão em comparação com a Figura 5.38(b). As respectivas larguras foram de $10,5\pm 0,3$ mm e $9,0\pm 0,3$ mm.

Na Figura 5.39 também se observa a numeração de 1 até 4 que indicam as frentes de solidificação que se formaram nas laterais do cordão as quais aparecem em intervalos médios de $8,1\pm 0,2$ mm. Esta medida está próxima à teoricamente calculada, ou seja, 8 mm (velocidade de soldagem 4 mm/s e frequência de oscilação 0,5 Hz). Contudo, no mesmo cordão observa-se outras frentes de solidificação. Estas estão numeradas de 5 até 8 e aparecem em intervalos médios de $4,2\pm 0,3$ mm. Estas últimas evidências correspondem ao fato do arco/poça de fusão moverem-se, periodicamente, no mesmo sentido de soldagem. Nas condições do ensaio, ao se manter a tocha fixa e movimentar a placa de teste com velocidade constante, as deflexões do arco passam a ter, aproximadamente, a mesma velocidade de soldagem ao atingirem os pontos de 5 até 8 (intersecção das curvas com a linha de centro). Contudo, como a formação da Figura de Lissajous é um processo contínuo, a deflexão do arco vai se alternando de uma lateral do cordão para a outra (extremidades numeradas de 1 até 4). Este deslocamento, progressivamente, ganha velocidade no sentido oposto ao de soldagem, com isso, a formação das frentes de solidificação, numeradas de 1 até 4, aparecem em intervalos próximos ao dobro da velocidade de soldagem, pois, sendo a frequência de oscilação 0,5 Hz e velocidade de soldagem igual a 4 mm/s, cada uma destas frentes de solidificação aparece em intervalos de aproximadamente 8 mm.

As medições comparativas entre os cordões feitos no processo GMAW pulsado, seguindo as condições de oscilação (c) e (d) da Tabela 5.8 e parâmetros de soldagem da Tabela 5.6, Ar-4%CO₂ – 85 A, são apresentadas na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Tabela comparativa dos cordões feitos nas condições (c) e (d) da Tabela 5.8

	 GMAW pulsado; condição (c) Tabela 5.8			 GMAW pulsado; condição (d) Tabela 5.8		
	Largura	Intervalo 1-4	Intervalo 5-8	Largura	Intervalo 1-4	Intervalo 5-8
Placa de teste 1	8,7	8,0	não são visíveis	10,5	7,7	4,2
	9,5	8,2		10,0	7,5	4,0
	9,0	8,0		10,2	7,5	3,7
Desvio Padrão	0,33	0,09		0,21	0,09	0,21
Placa de teste 2	9,5	8,0		10,0	8,0	4,5
	9,0	7,7		11,0	7,7	4,7
	8,7	8,2		10,7	8,5	4,2
Desvio Padrão	0,33	0,21		0,42	0,33	0,21
Placa de teste 3	8,7	8,2		10,7	8,7	3,7
	9,2	7,7		11,0	9,0	4,0
	9,0	7,7	10,5	8,7	4,7	
Desvio Padrão	0,21	0,24	0,21	0,14	0,42	
Média	9,0	8,1	10,5	8,1	4,2	
Média Desv. Padr.	0,29	0,18	0,28	0,19	0,28	

Na Figura 5.40 são apresentadas medições (realizadas utilizando-se o software *Image J* e por AutoCAD) referente aos efeitos da movimentação do arco/poça de fusão (consequência da oscilação magnética de acordo com a condição (d) da Tabela 5.8). Conforme pode ser observado, mesmo havendo certa dificuldade quanto à visualização dos efeitos da atuação do campo magnético no processo, localizando-se o centro de massa do cordão torna-se possível identificar a tendência de maior ou menor concentração de metal de solda. As seções transversais “XX” e “ZZ” foram feitas onde o arco/deposição de metal de adição atingiram, periodicamente, a maior amplitude lateral.

Em resumo, com os ensaios exploratórios realizados até esta etapa da tese percebe-se que, a oscilação magnética imposta ao processo conforme suas respectivas características, puderam proporcionar maior ou menor concentração de calor (produzidos pelo arco em conjunto com metal de adição) e em locais específicos de acordo com o padrão de tecimento seguindo diferentes Figuras de Lissajous.

Na Tabela 5.15 consta os valores médios do posicionamento dos centros de massa de seções transversais feitas em um mesmo cordão com 250 mm de comprimento.

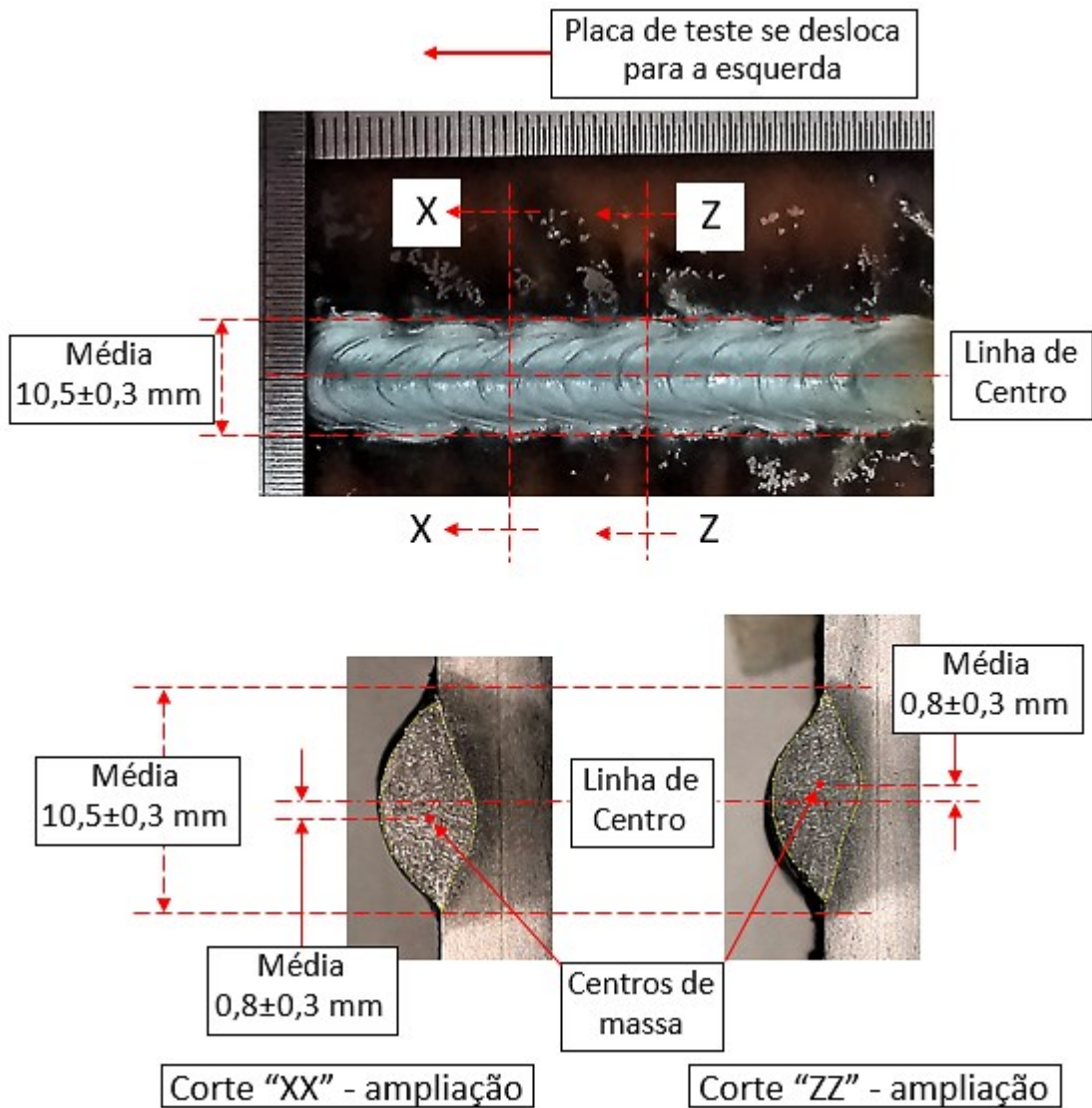


Figura 5.40: Macrografias de seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (d) da Tabela 5.8

Tabela 5.15: Medições das macrografias referente às seções transversais no cordão GMAW pulsado condição (d) da Tabela 5.8

	Corte "XX"	Corte "ZZ"
	deslocamento	deslocamento
Corte 1	1,0	0,9
Corte 2	0,7	1,5
Corte 3	1,4	0,7
Desvio Padrão	0,3	0,3
Média	1,0	1,0

5.5. Testes de soldagem GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados

Uma vez estudado o comportamento da oscilação magnética imposta ao arco na distribuição de metal fundido, movimentação da poça de fusão, feita a definição do gás de proteção e dos parâmetros de soldagem a serem utilizados, foram realizados os testes em peças chanfradas simulando uma dificuldade típica em soldagens de tubulações que é a variação do afastamento entre as faces da junta. Conforme foi descrito na seção 4.3.2 da Metodologia, a presente seção foi subdividida em 3 subgrupos.

5.5.1. Primeiro subgrupo de testes – Espessura dos corpos de prova e ângulo do chanfro

As soldagens foram realizadas em peças posicionadas com abertura da raiz constante de $2,0 \pm 0,5$ mm entre as faces do chanfro e o ângulo do bisel com $30^\circ \pm 1^\circ$. Preliminarmente ao estudo referente ao ângulo do bisel foram realizadas soldas em corpos de prova com espessuras de $12,0 \pm 0,5$ mm e com $16,0 \pm 0,5$ mm. O propósito de testar estas duas espessuras foi apenas selecionar uma delas quanto ao preenchimento da junta e penetração do cordão.

Para estes ensaios, a velocidade de soldagem necessitou ser ajustada em função de cada espessura. Admitindo-se as mesmas propriedades físicas para os materiais envolvidos e considerando-se que somente a espessura tenham sido o diferencial aplicado no processo, neste trabalho, o ajuste das velocidades de soldagem foi associado à necessidade de soldar as peças mais espessas com menor velocidade. Resumidamente, em ensaios prévios verificou-se a necessidade de se utilizar maior tempo de atuação da fonte de calor (arco e gotas de metal fundido) em função da massa, ou seja, corpos com maior massa tendem a atingir o equilíbrio térmico e fundirem-se mais lentamente do que os que têm menor massa. Desta forma, os corpos de prova com 12 mm tiveram sua velocidade de soldagem com 2,3 mm/s e os de 16 mm foram soldados com 1,7 mm/s.

Os resultados dos testes feitos em peças com uma ou outra espessura seguindo as diretrizes da Seção 4.3.2, Tabela 5.6 para Ar-4%CO₂ – 85A, oscilação “meia lua” e padrão de tecimento conforme as condições “e” da Tabela 5.16, visivelmente não apresentaram diferenças significativas em termos de preenchimento da junta nem maior ou menor penetração entre os cordões feitos seguindo-se o padrão das oscilações impostas, ver Figura 5.41 e Figura 5.42.

Tabela 5.16: Parâmetros de oscilação utilizados nos ensaios exploratórios das soldagens GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados

	Condição (c)		Condição (d)		Condição (e)		Condição (g)	
	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”
Tipo de onda	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Quadr.	Triang.
Amplitude (mT)	10	5,6	13	7,9	13	12,3	10	5,6
Fx / Fy	1/2		1/2		1/2		1/2	
Frequência (Hz)	0,5		0,5		0,5		0,5	
Simetria (%)	50	50	50	50	50	50	10	90
Offset	0	0	0	0	0	0	0	0
Ângulo de fase (rad)	$\pi/4$	---	$\pi/4$	---	$\pi/4$	---	$\pi/4$	---
Figura de Lissajous	“Meia-Lua” \cup		“Meia-Lua” \cup		“Meia-Lua” \cup		“Desloc. lateral” \sqsubset	
Obs.: “X” – Oscilação transversal, “Y” – Oscilação longitudinal								

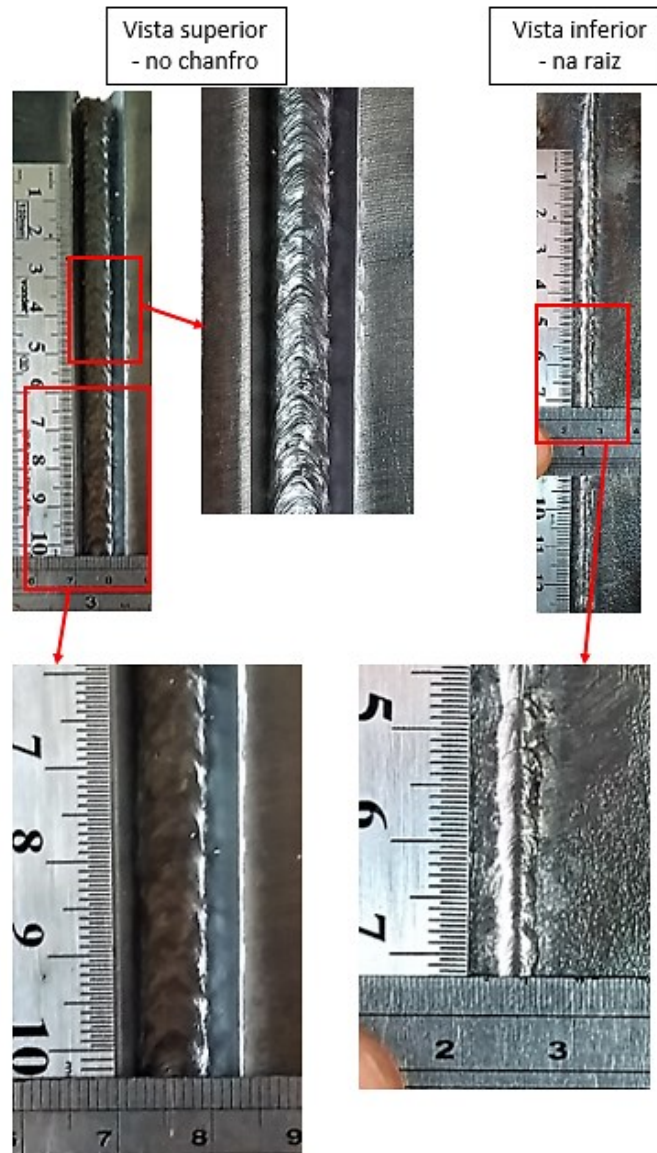


Figura 5.41: Corpos de prova chanfrados, bisel de $30^\circ \pm 1^\circ$, soldagem com oscilação, espessura $12,0 \pm 0,5$ mm

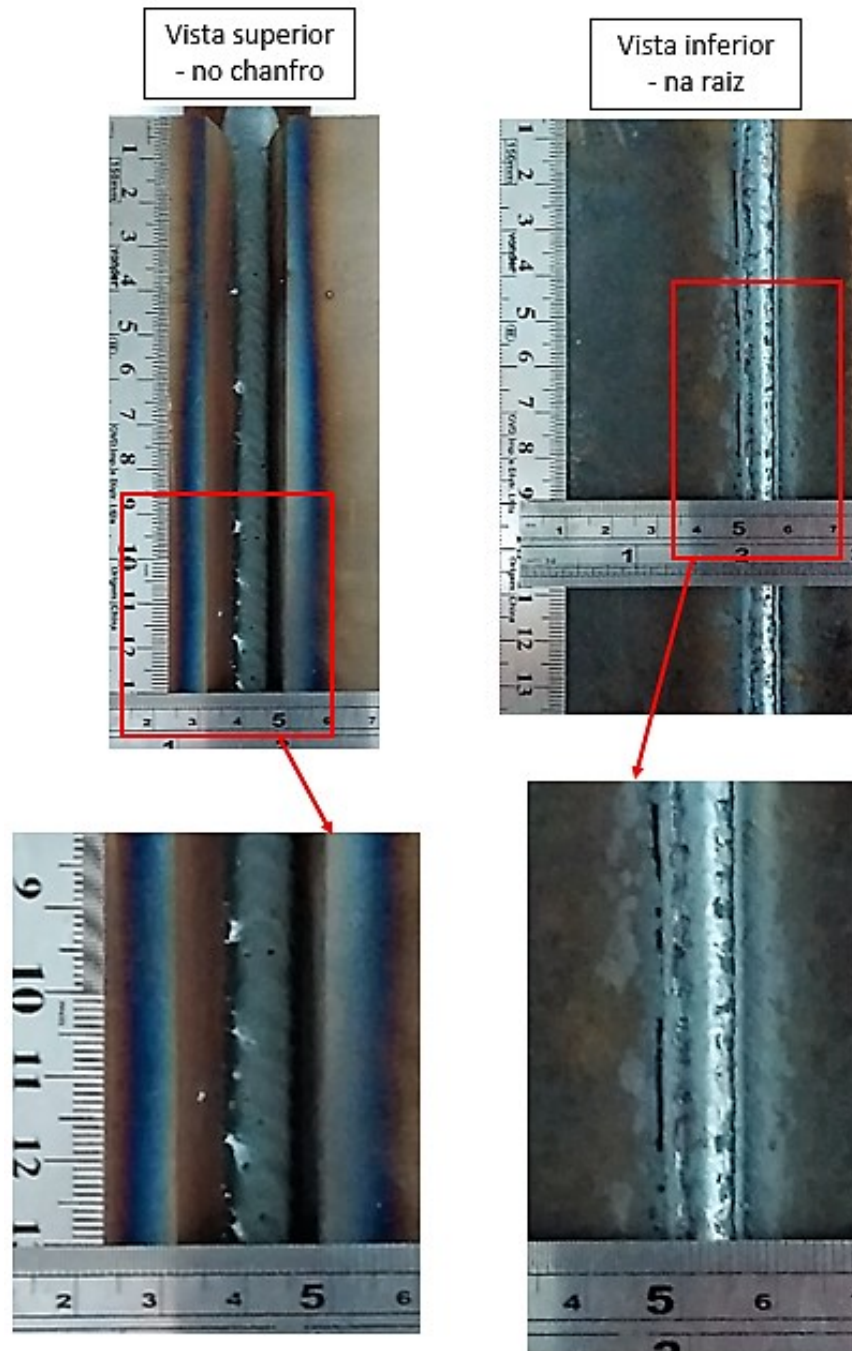


Figura 5.42: Corpos de prova chanfrados, bisel de $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$, soldagem com oscilação, espessura $16,0 \pm 0,5$ mm

Devido ao fato de não ter sido identificado razões aparentemente significativas quanto à utilização de uma espessura ou outra o critério que definiu usar corpos de prova com $16,0 \pm 0,5$ mm foi apenas o de dispor de peças mais robustas estruturalmente e que poderiam ser reaproveitadas mais vezes caso fosse necessário.

Neste primeiro subgrupo de testes, independentemente da espessura dos corpos de prova utilizados, foram observadas ocorrências de curtos circuitos (valores de tensão próximos de “zero” acompanhados por picos de corrente) e também podem ser notados picos de tensão, que por sua vez poderiam caracterizar extinções do arco e até a interrupção da soldagem caso alguma extinção se estendesse por tempo suficientemente longo e não tivesse acontecido o pronto reinício do processo.

Os oscilogramas da Figura 5.43 exemplificam o aspecto geral das variações de tensão e corrente observadas nos testes em chanfro com bisel de $30^{\circ}\pm 1^{\circ}$ e afastamento constante para as duas espessuras.

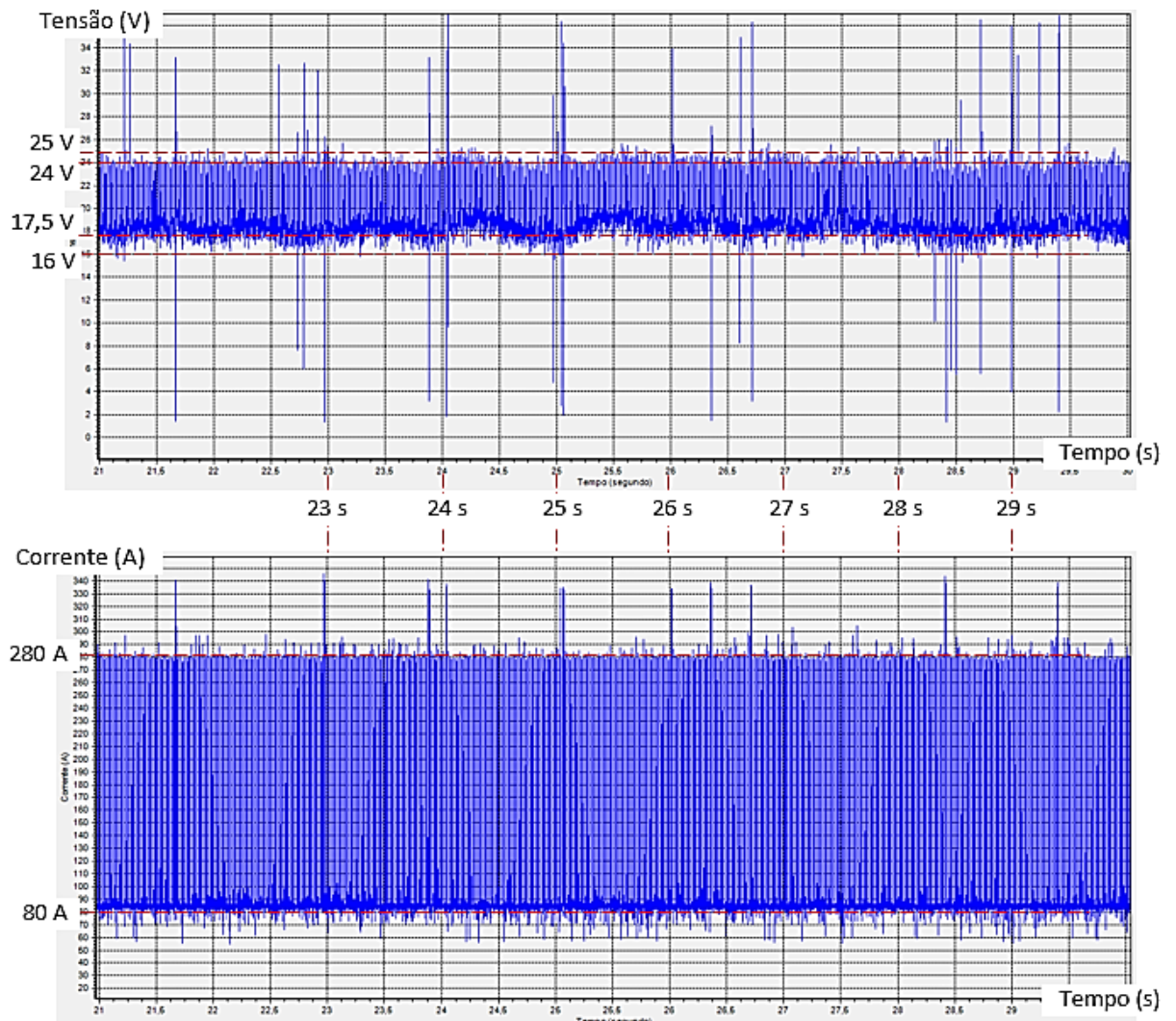


Figura 5.43: Oscilogramas de tensão e corrente. Soldagem em chanfro de $30^{\circ}\pm 1^{\circ}$, com oscilação “meia lua”, afastamento constante de $2,0+0,5$ mm entre as faces, espessura $12,0\pm 0,5$ mm

No oscilograma da Figura 5.43 foi observado que estes eventos aconteceram basicamente em intervalos de 1 segundo. Isso está de acordo com a frequência de 0,5 Hz, pois, neste período de tempo a deflexão do arco alcança suas máximas amplitudes. Como exemplo, foram separados dois trechos: um entre o intervalo próximo de 24 e 25 segundos, o outro entre aproximadamente 28,5 e 29,5 segundos, ver Figura 5.44.

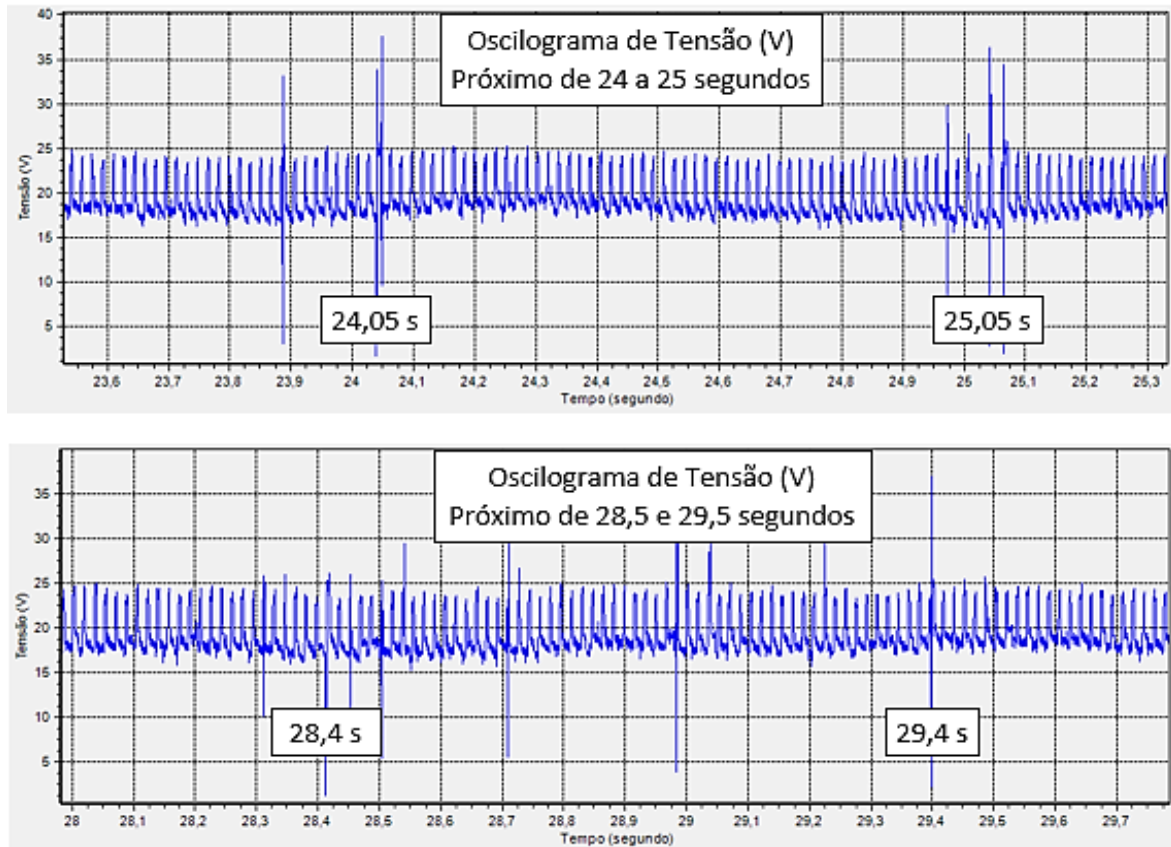
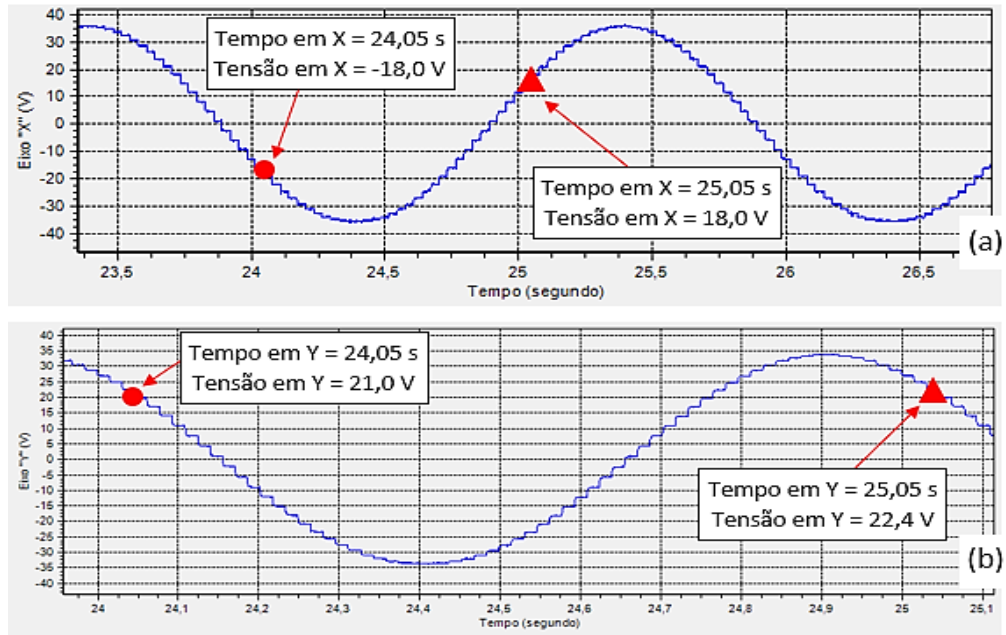


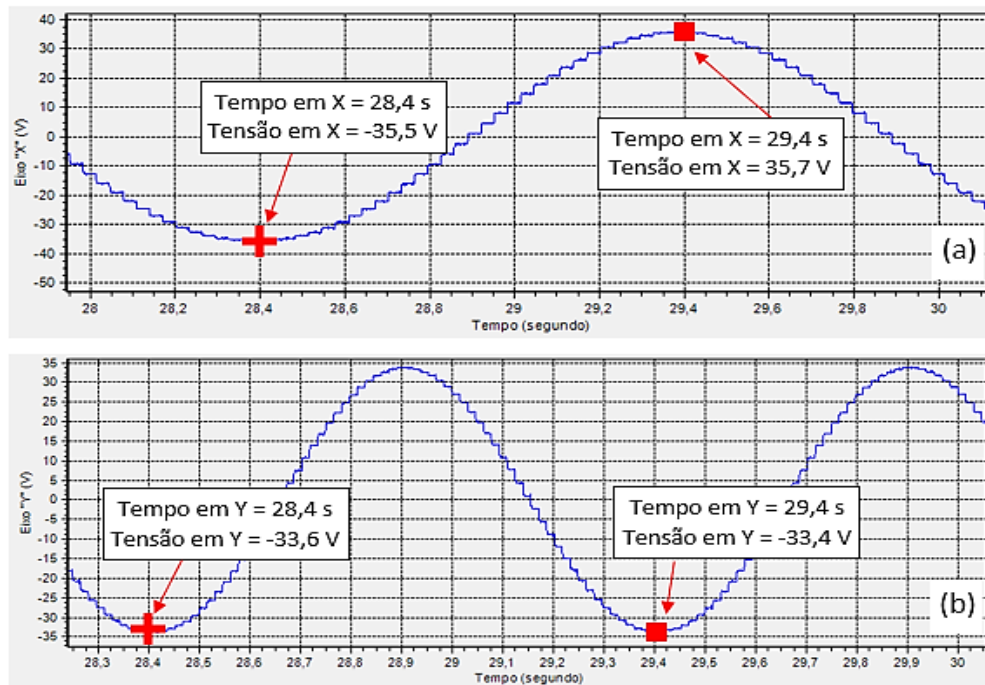
Figura 5.44: Oscilogramas da Tensão (V) para os trechos próximos de 24 e 25 segundos e próximos de 28,5 e 29,5 segundos

Com os valores fornecidos pelo sistema de aquisição de dados, referentes às tensões aplicadas nas bobinas dos eletroímãs sincronizadas com o tempo de soldagem, foi possível obter as curvas características do padrão de oscilação de cada eixo. Estas são mostradas na Figura 5.45 (intervalo de 24 s até 25 s) e Figura 5.46 (intervalo de 28,5 s até 29,5 s).



(a) Eixo "X" (oscilação transversal) e (b) Eixo "Y" (oscilação longitudinal)

Figura 5.45: Tensão elétrica aplicada nos eletroímãs no trecho de soldagem entre aproximadamente 24 e 25 segundos



(a) Eixo "X" (oscilação transversal) e (b) Eixo "Y" (oscilação longitudinal)

Figura 5.46: Tensão elétrica aplicada nos eletroímãs no trecho de soldagem entre 28,5 e 29,5 segundos

Adicionalmente, por meio dos recursos do sistema de aquisição de dados, foi possível obter, com precisão, o padrão de oscilação que foi aplicado e os pontos onde ocorreram os curtos circuitos, Figura 5.47.

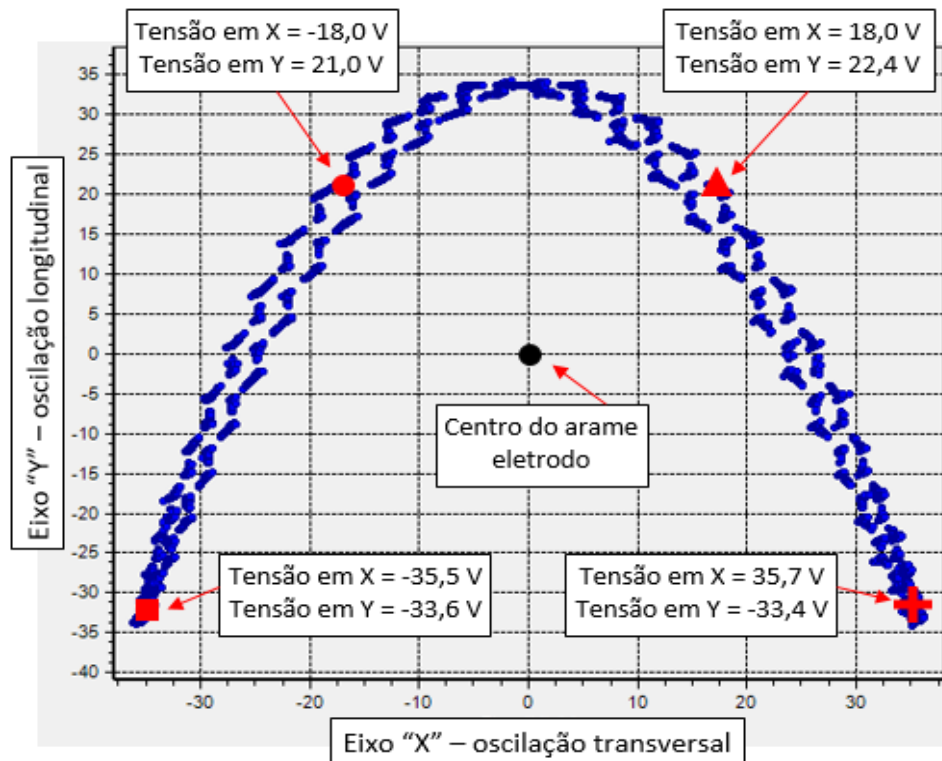


Figura 5.47: Localização dos curtos circuitos ao longo da trajetória de oscilação do arco

Mais uma vez, estes eventos indicam que a deflexão do arco interfere no processo e isso acontece de forma sincronizada com as características da oscilação magnética imposta. Nos testes realizados sobre chapa observou-se que, por vezes, o alongamento demasiado do arco causou a sua extinção. Em seguida, quando o arame eletrodo tocou a peça, o curto circuito foi a forma do processo reiniciar. Contudo, nas soldagens dentro do chanfro, os curtos circuitos provavelmente ocorreram devido ao encurtamento do arco e não pelo seu alongamento, ver a Figura 5.48. Estima-se que, no chanfro, a cota 5 mm (medida do comprimento médio do arco na soldagem sobre chapa conforme foi mostrado na Figura 5.21 da seção 5.4 do Resultados e Discussões) se encurtou até aproximadamente 3,4 mm conforme a deflexão do arco percorreu as paredes laterais do chanfro.

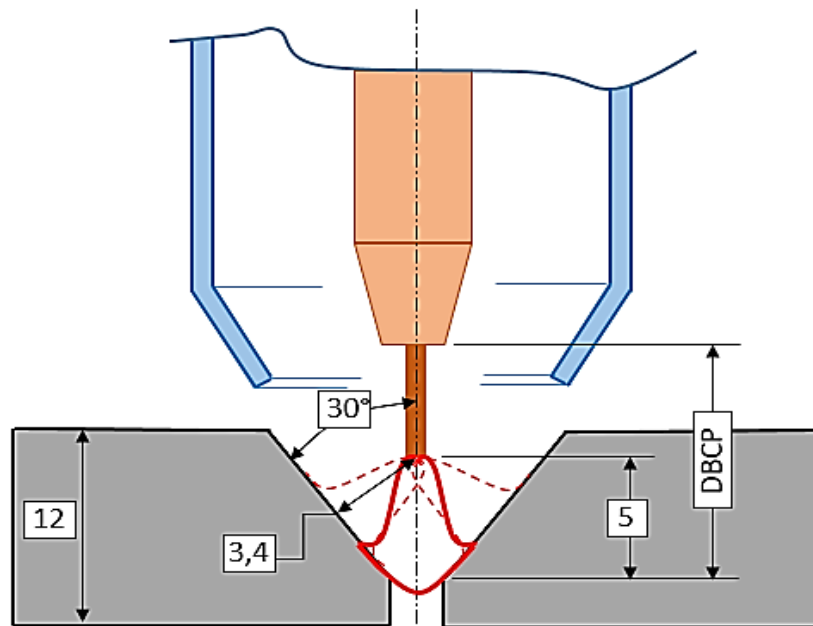


Figura 5.48: Encurtamento do comprimento do arco para chanfros com biseis de $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$

O comprimento médio de 5 mm, que foi considerado para a formação de um arco elétrico estável sobre chapa, sofreu variações diferentes no chanfro com biseis de $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$. Outra razão para isso pode ser o equipamento (fonte de soldagem). Como a fonte foi usada com imposição de corrente, o processo perdeu sua capacidade de administrar flutuações no comprimento do arco em função da sua oscilação no interior do chanfro. Estas inconstâncias da tensão podem ser a resposta do processo para tentar estabilizar o arco dentro do chanfro (0,5 s relatado na Seção 5.4 dos Resultados e Discussões).

Na Figura 5.49 é mostrada a relação trigonométrica utilizada para se estimar a referida distância entre a parede do chanfro e o centro do arame eletrodo. Na Figura 5.50 e Figura 5.51 são mostradas a forma como foi calculada a distância $C=3,37$ mm (aproximadamente 3,4 mm) como se a deflexão máxima do arco se limitasse a ficar perpendicular à parede do chanfro e na Figura 5.52 é mostrado um desenho ilustrativo do suposto comportamento das variações dimensionais do arco e formação da poça de fusão ao longo da soldagem estimando-se a distância $H=3,37$ mm como sendo uma provável proximidade da poça que é formada na região atrás do arco ao longo da soldagem. Entenda-se “C” como medida calculada, porém, não deixa de ser uma estimativa e “H” como uma suposição. O termo “suposição” se refere a uma dimensão que não foi possível ser determinada com exatidão neste trabalho devido à deflexão do arco ter sido especificada em termos de tensão aplicada nos eletroímãs, conseqüentemente, campo magnético gerado “Bx” e não em relação ao comprimento linear da deflexão do arco.

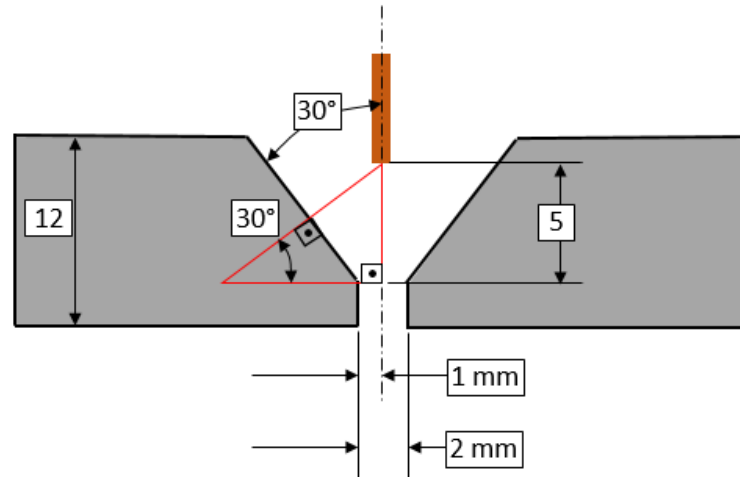


Figura 5.49: Relação trigonométrica existente entre a parede do bisel com $30^\circ \pm 1^\circ$ e o centro do arame eletrodo

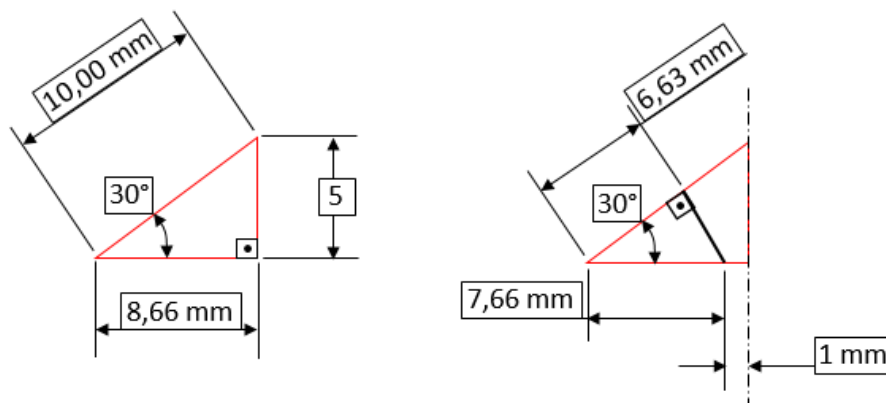


Figura 5.50: Separação dos triângulos da relação trigonométrica. Parede do bisel com $30^\circ \pm 1^\circ$

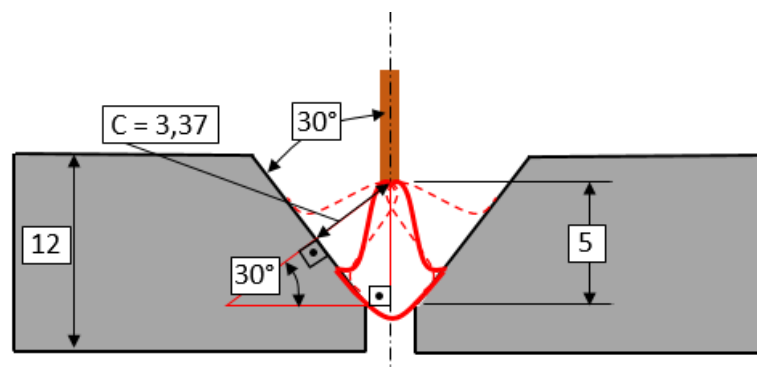


Figura 5.51: Determinação da distância calculada "C" para o comprimento do arco em função da deflexão lateral e proximidade da parede do bisel com $30^\circ \pm 1^\circ$

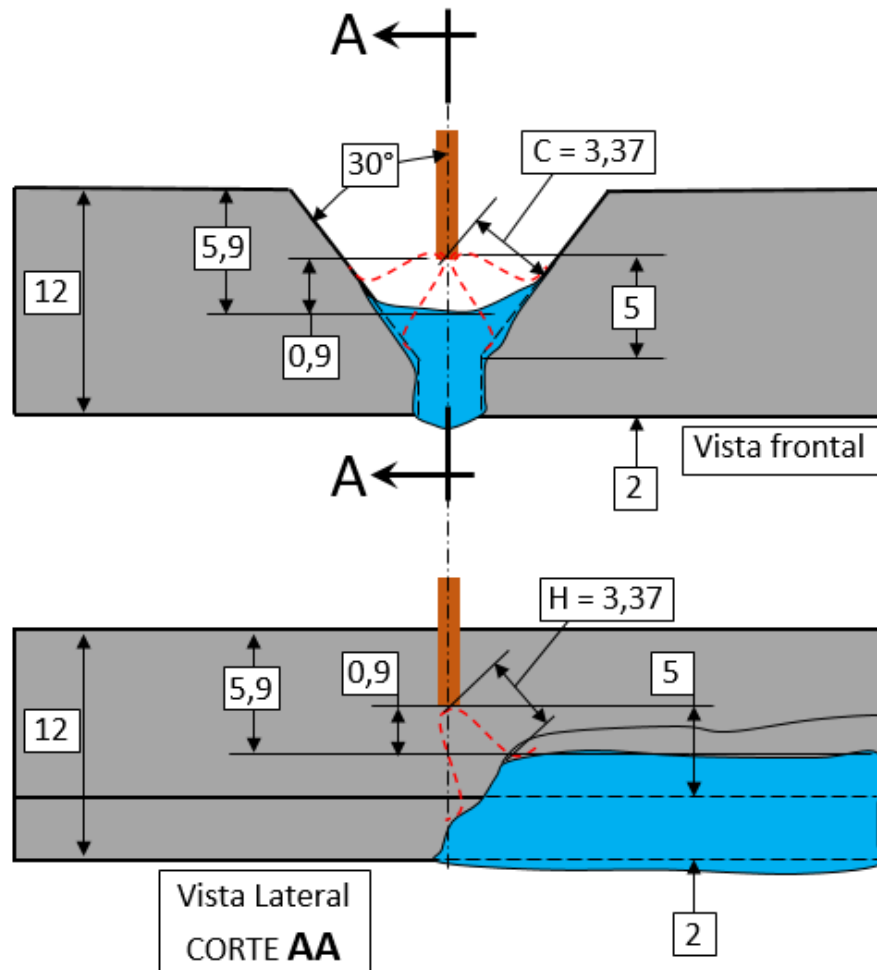
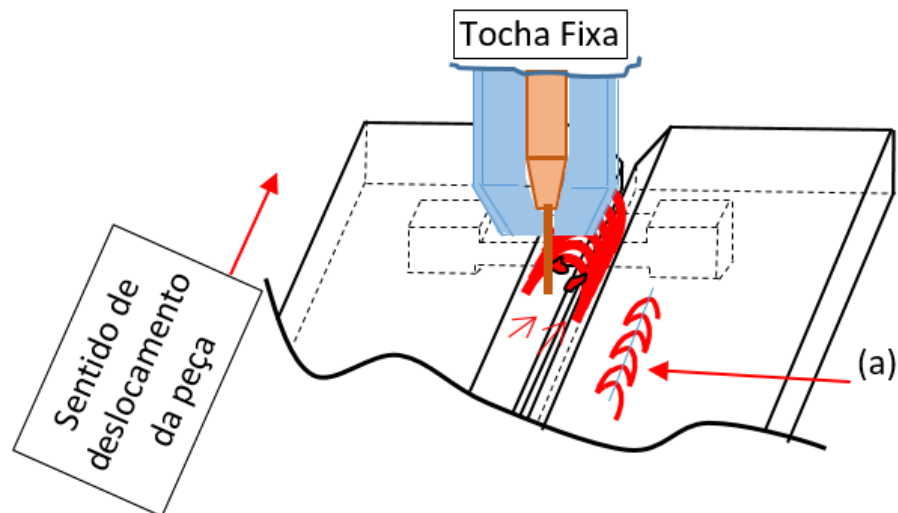


Figura 5.52: Simulação do comportamento das variações dimensionais do arco e formação da poça de fusão ao longo da soldagem. Parede do bisel com $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$

O comprimento do arco que deveria ter sido mantido com aproximadamente 5 mm se altera com a oscilação e tal variação (seja na parede do bisel ou próximo à poça de fusão que se forma seguindo a trajetória da oscilação) pode contribuir para ocorrerem os curtos circuitos.

Considerando também a poça de fusão que é formada durante a soldagem, este tipo de perturbação pode estar associado tanto com a proximidade das laterais do chanfro como pelo encurtamento do arco causado pela altura da poça. Na Figura 5.53 é mostrado um desenho que ilustra a formação da poça de fusão somando-se a trajetória de oscilação com o deslocamento da peça no decorrer das soldagens no chanfro.



(a) Trajetória do arco somando-se o deslocamento da peça durante a soldagem

Figura 5.53: Simulação da formação da poça de fusão no chanfro

Conforme foi relatado, a variação do comprimento do arco em função da atuação da oscilação magnética externa, nas condições deste trabalho, pode ter sido uma das principais causas de perturbações na soldagem. Portanto, uma forma prática de se conseguir estabilizar o comprimento do arco com a imposição da oscilação magnética e evitar variações pronunciadas que ocorrem na corrente de base, foi fazer com que o arco não sofresse alterações muito intensas em seu comprimento ao longo das soldagens. Mesmo não sendo recomendado pelas Normas referidas na seção 4.3.1 da Metodologia o uso de chanfro com bisel de 45° , uma série de testes foram feitos com este ângulo, nas mesmas condições daqueles feitos com $30^\circ \pm 1^\circ$. Na Figura 5.54 (bisel com 45°) pode ser visto que o comprimento do arco, com relação às paredes do chanfro, manteve-se mais próximo de 5mm comparativamente com o bisel de $30^\circ \pm 1^\circ$.

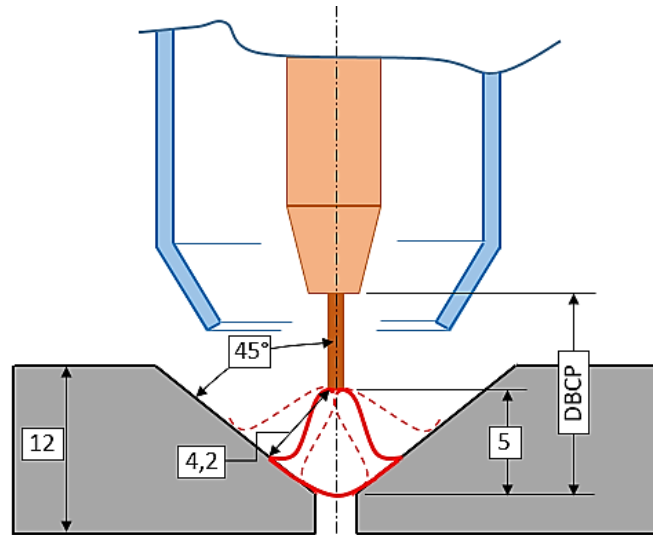


Figura 5.54: Encurtamento do comprimento do arco para chanfros com biseis de $45^\circ \pm 1^\circ$

O mesmo procedimento para a determinação das dimensões “C” e “H” se repetiram para o ângulo de bisel $45^\circ \pm 1^\circ$. Na Figura 5.55, Figura 5.56, Figura 5.57 e Figura 5.58 os cálculos e simulações podem ser visualizados.

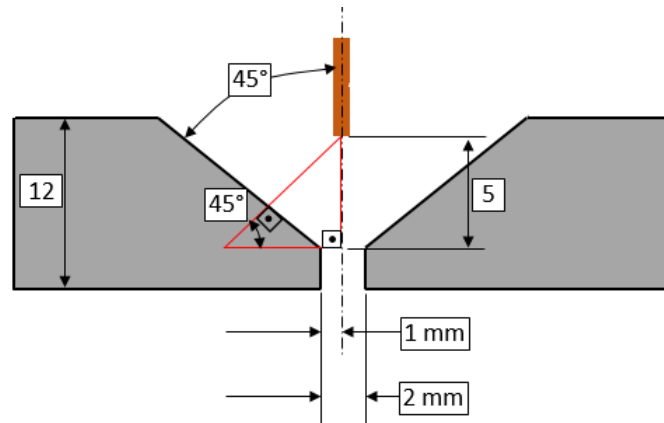


Figura 5.55: Relação trigonométrica existente entre a parede do bisel com $45^\circ \pm 1^\circ$ e o centro do arame eletrodo

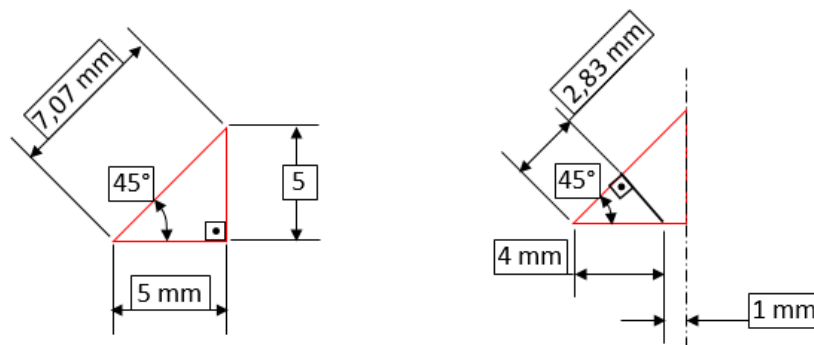


Figura 5.56: Separação dos triângulos da relação trigonométrica. Parede do bisel com $45^\circ \pm 1^\circ$

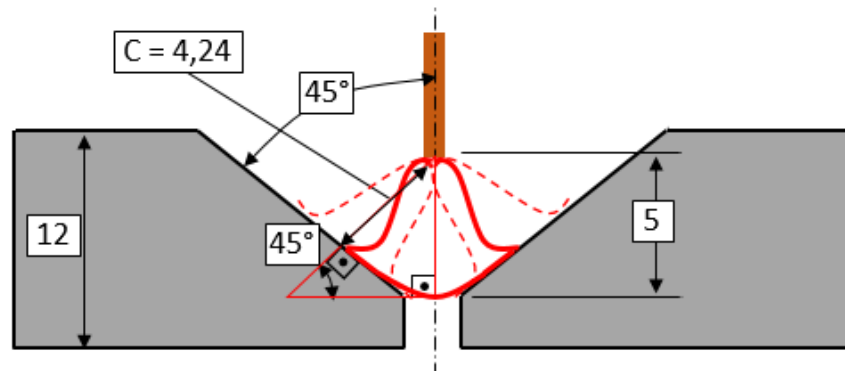


Figura 5.57: Determinação da distância calculada "C" para o comprimento do arco em função da deflexão lateral e proximidade da parede do bisel com $45^\circ \pm 1^\circ$

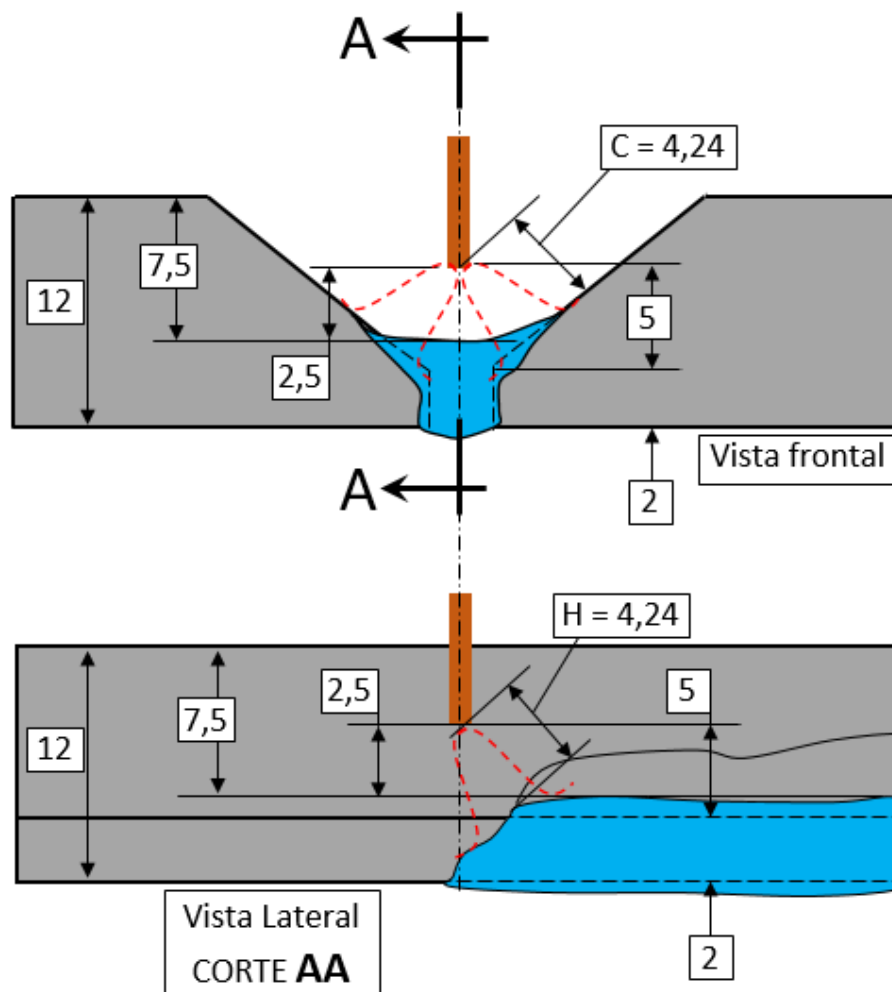


Figura 5.58: Simulação do comportamento das variações dimensionais do arco e formação da poça de fusão ao longo da soldagem. Parede do bisel com $45^\circ \pm 1^\circ$

Na Figura 5.59 são mostrados os oscilogramas de tensão e corrente elétrica de um dos testes que foram realizados. Nota-se que, nesta nova condição, houveram poucas ou

quase nenhuma ocorrência de curtos circuitos. Desta forma foi estabelecida a utilização de corpos de prova com $16\pm 0,5$ mm de espessura e ângulo de bisel com $45^\circ\pm 1^\circ$ para os testes do segundo e terceiro subgrupos.

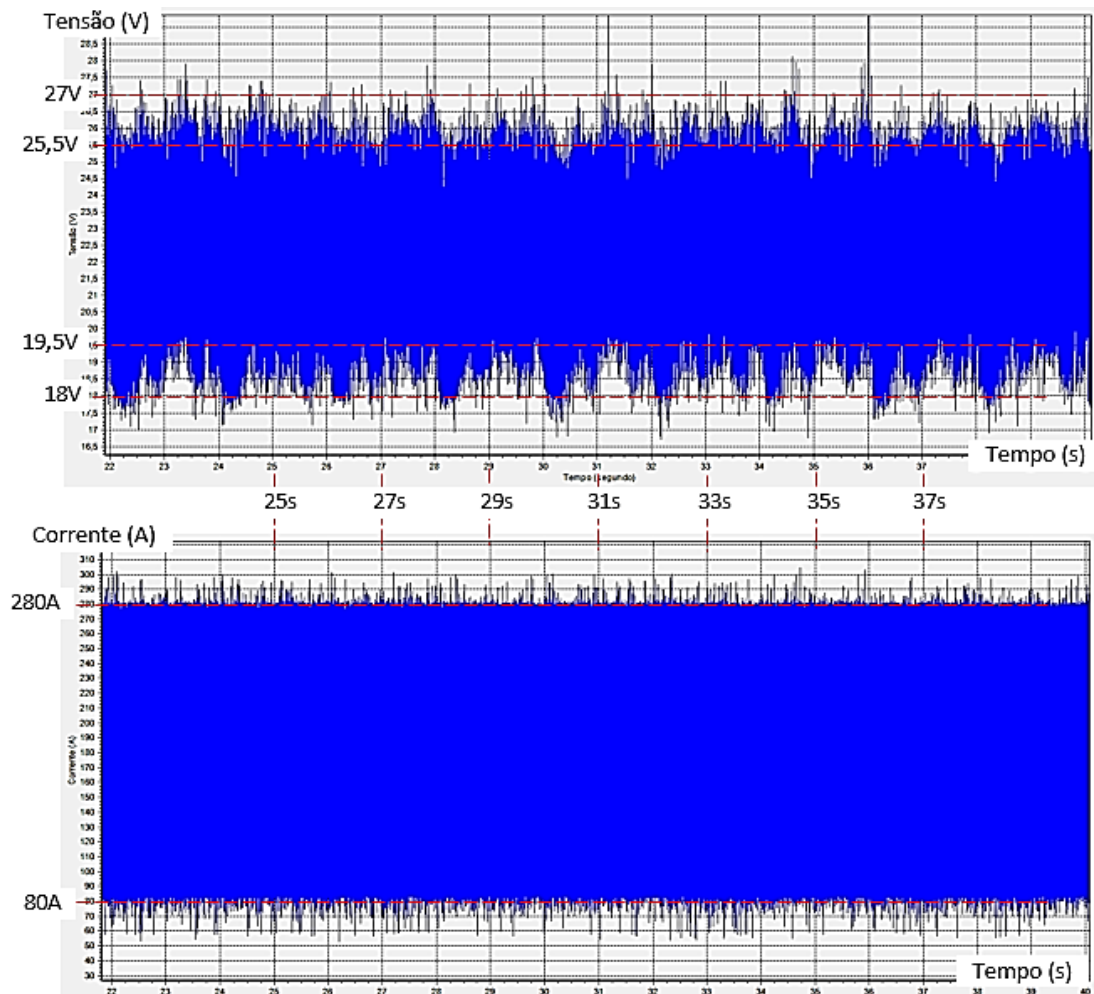


Figura 5.59: Oscilogramas de tensão e corrente. Soldagem em chanfro de $45^\circ\pm 1^\circ$, com oscilação “meia lua”, afastamento constante de $2,0+0,5$ mm entre as faces, espessura $12,0\pm 0,5$ mm

5.5.2. Segundo subgrupo de testes – Amplitudes de oscilação

O segundo subgrupo de testes utilizou corpos de prova com $16\pm 0,5$ mm de espessura, ângulo de bisel com $45^\circ\pm 1^\circ$ e abertura progressiva da raiz. Nesta seção o objetivo foi estabelecer alguma relação de amplitudes “Bx” e “By” para que as soldagens em chanfro produzissem cordões com o mínimo de perturbações possíveis ao longo do processo. Estes

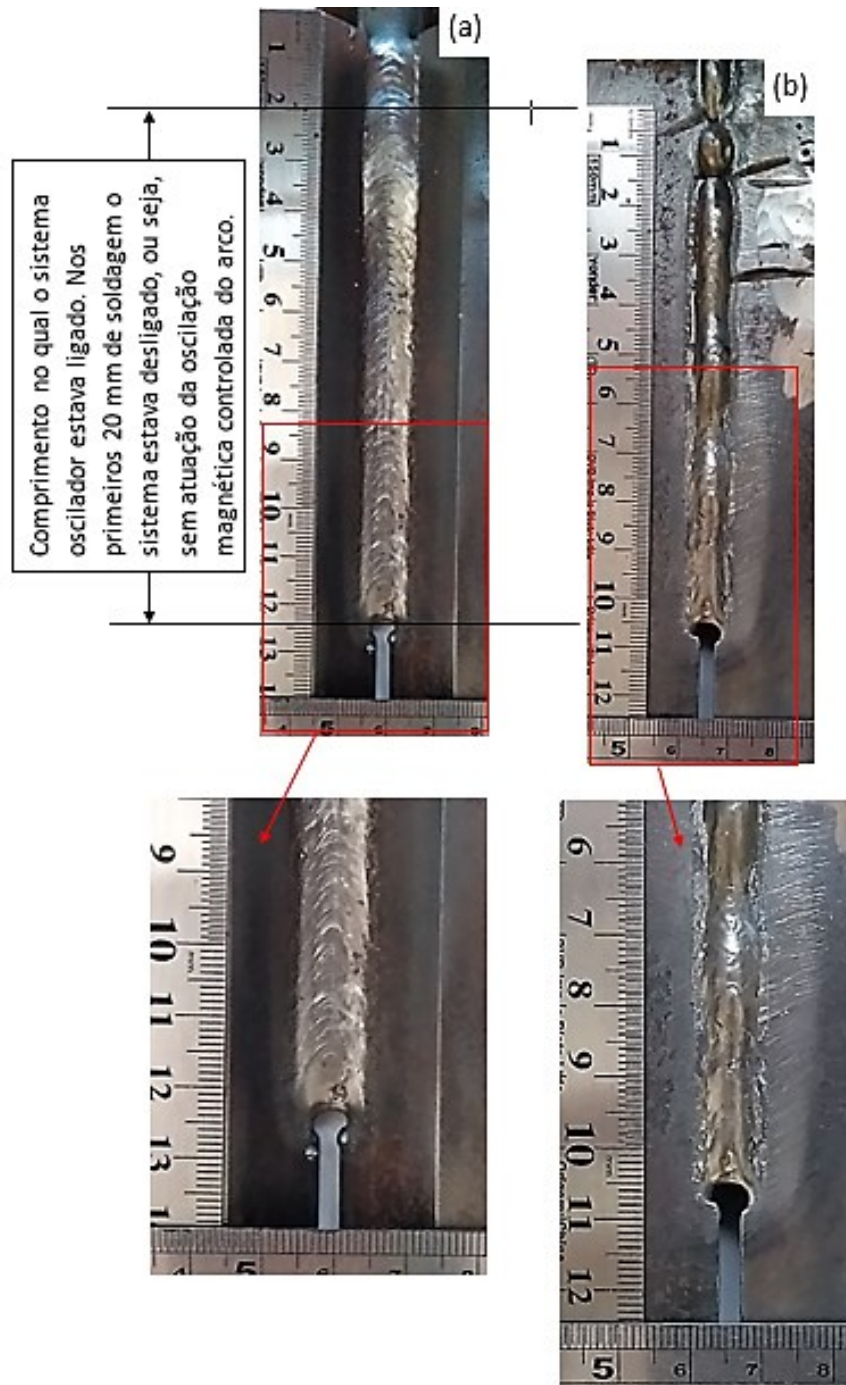
cordões foram feitos seguindo a Figura de Lissajous “Meia Lua”, a qual entende-se como sendo uma forma de tecimento comumente aplicada por soldadores e condições (c), (d) e (e) que constam na Tabela 5.16.

Os estudos iniciaram com a relação de amplitudes ser aproximadamente 1 para 1, condição (e), na qual as oscilações transversal e longitudinal foram praticamente iguais. O objetivo foi o de não haver diferenças entre as deposições laterais e longitudinais nos cordões. A pequena diferença entre $B_x=13$ mT e $B_y=12,3$ mT foi uma tentativa de igualar as amplitudes visto que, longitudinalmente (B_y) existe um acréscimo linear devido ao deslocamento físico da peça e não ao campo magnético aplicado durante o decorrer da soldagem.

Posteriormente, os testes foram feitos com outras condições de oscilação, por exemplo, (c) e (d) da mesma tabela e se estenderam com relações de amplitudes de 2 para 1, 3 para 1, 1 para 2, 1 para 3 e assim sucessivamente até 2 para 3 e 3 para 2. Contudo, a possibilidade de se obter inúmeras combinações de ajuste para os eixos “X” e “Y” dificultaram definir apenas uma ou duas relações de amplitudes mesmo após uma grande quantidade de ensaios. Adicionado a isso, as ocorrências que haviam sido relatadas, tais como, aparente acúmulo de metal de solda principalmente na parte traseira do cordão (ver Figura 5.52 e Figura 5.58) e agora, associadas à abertura progressiva da fresta da raiz, podem ter sido fatores agravantes para causar ainda mais instabilidades nas soldagens. Com isso, muitas das combinações aplicadas resultaram em furo na raiz de forma precoce, precedidos de eventos de curtos circuitos e/ou extinções do arco.

Estes resultados prévios indicaram ser necessário maior aprofundamento nos estudos, especificamente sobre este tema. Em função disso, como forma de padronização dos ensaios que se seguiram, foi considerado como critério avaliativo do processo não mais o número de curtos circuitos ou extinções do arco, mas sim, os maiores comprimentos de cordões alcançados e dimensões das aberturas de raízes preenchidas antes da ocorrência do furo na raiz. Esta forma avaliativa baseou-se no fato de que os curtos circuitos e/ou breves extinções do arco não se mostraram como ocorrências exclusivas para serem consideradas as responsáveis por causar o furo imediato na raiz. Adicionado a isso, foi observado que, mesmo com estes eventos, por vezes aconteciam a imediata recuperação do processo, então, a soldagem progredia por mais alguns instantes antes do cordão ser definitivamente interrompido. Neste contexto, com o decorrer dos testes a relação de amplitude 2 para 1 foi a que apresentou boa constância ao longo das soldagens conforme podem ser vistos na Figura 5.60, Figura 5.61, Figura 5.62 e Figura 5.63 mesmo havendo, por vezes, variações quanto à penetração da raiz.

Na Figura 5.60(b) e Figura 5.61 são mostrados os cordões de solda com aproximadamente 105 mm de comprimento e abertura de raiz com aproximadamente 3,3 mm. Interrompidos devido à ocorrência do furo na raiz.



(a) Vista superior e (b) vista no verso da chapa. As demais imagens são seus respectivos detalhes ampliados.

Figura 5.60: Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45^\circ \pm 1^\circ$, $B_x=10$ mT e $B_y=5,6$ mT

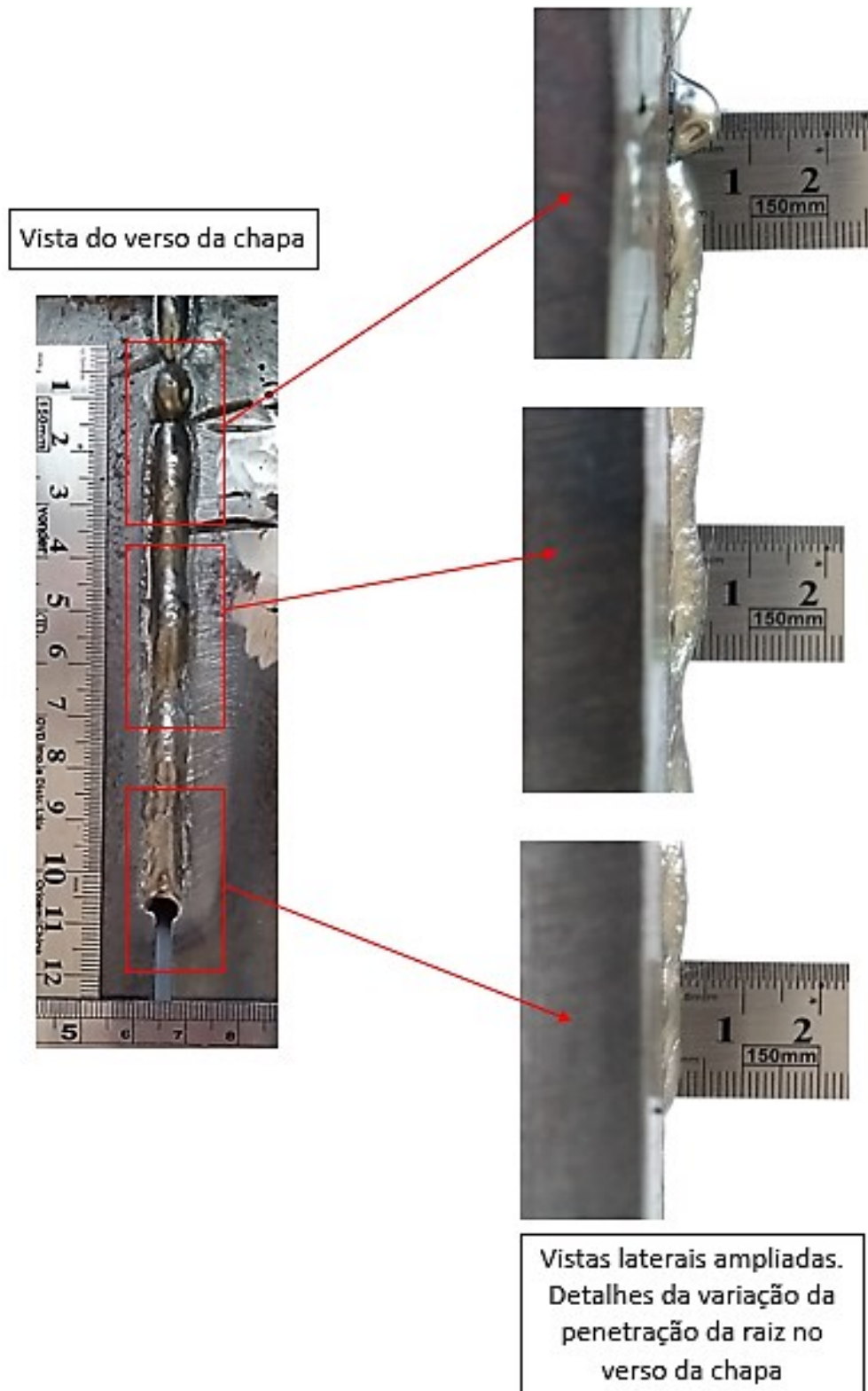
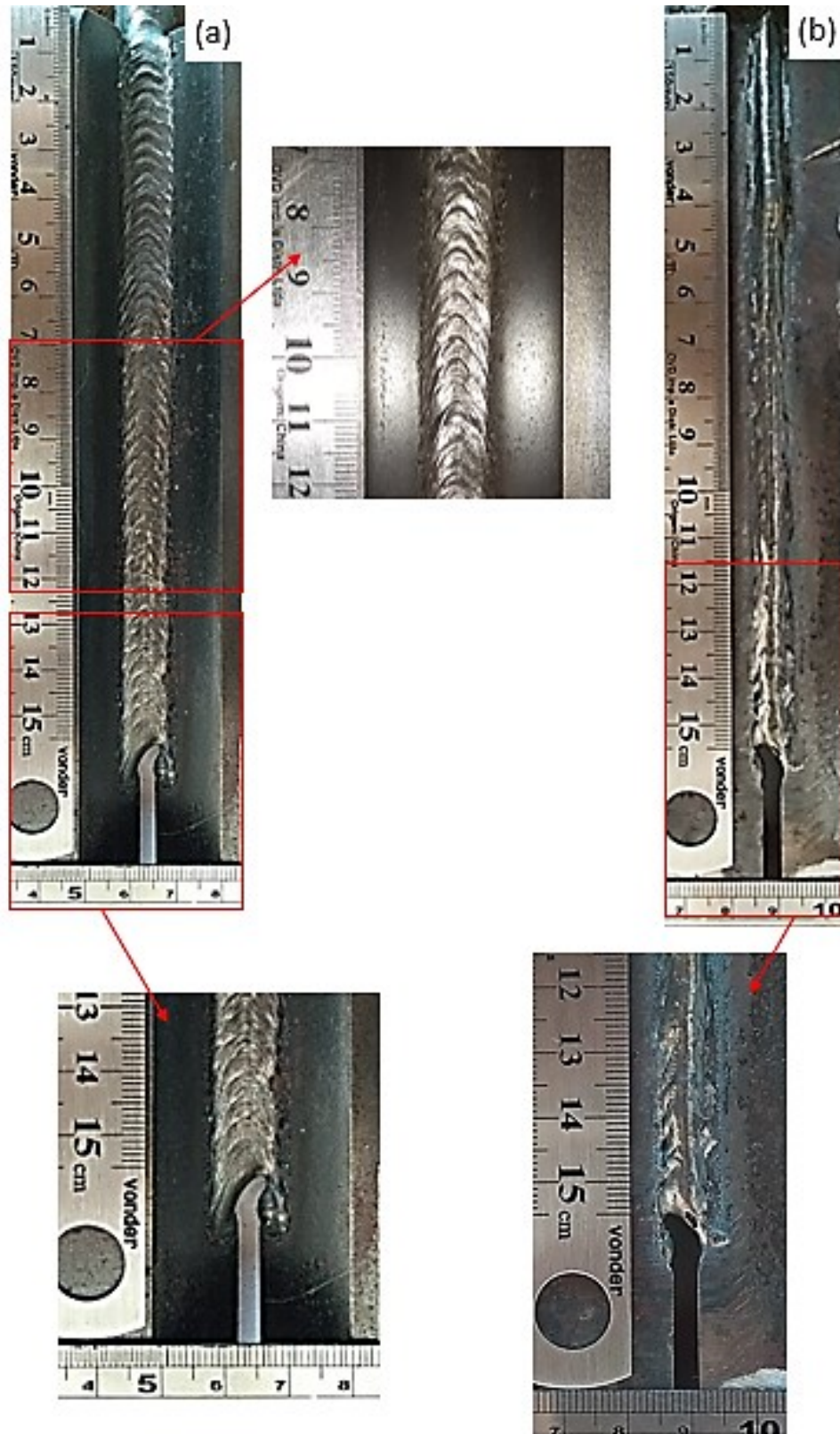


Figura 5.61: Detalhes ampliados da Figura 5.60. Variação da penetração da raiz no verso da chapa. Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45^{\circ} \pm 1^{\circ}$, $B_x=10 \text{ mT}$ e $B_y=5,6 \text{ mT}$



(a) Vista superior e (b) vista no verso da chapa. As demais imagens são seus respectivos detalhes ampliados

Figura 5.62: Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45\pm 1^\circ$, $B_x=13\text{ mT}$ e $B_y=7,9\text{ mT}$

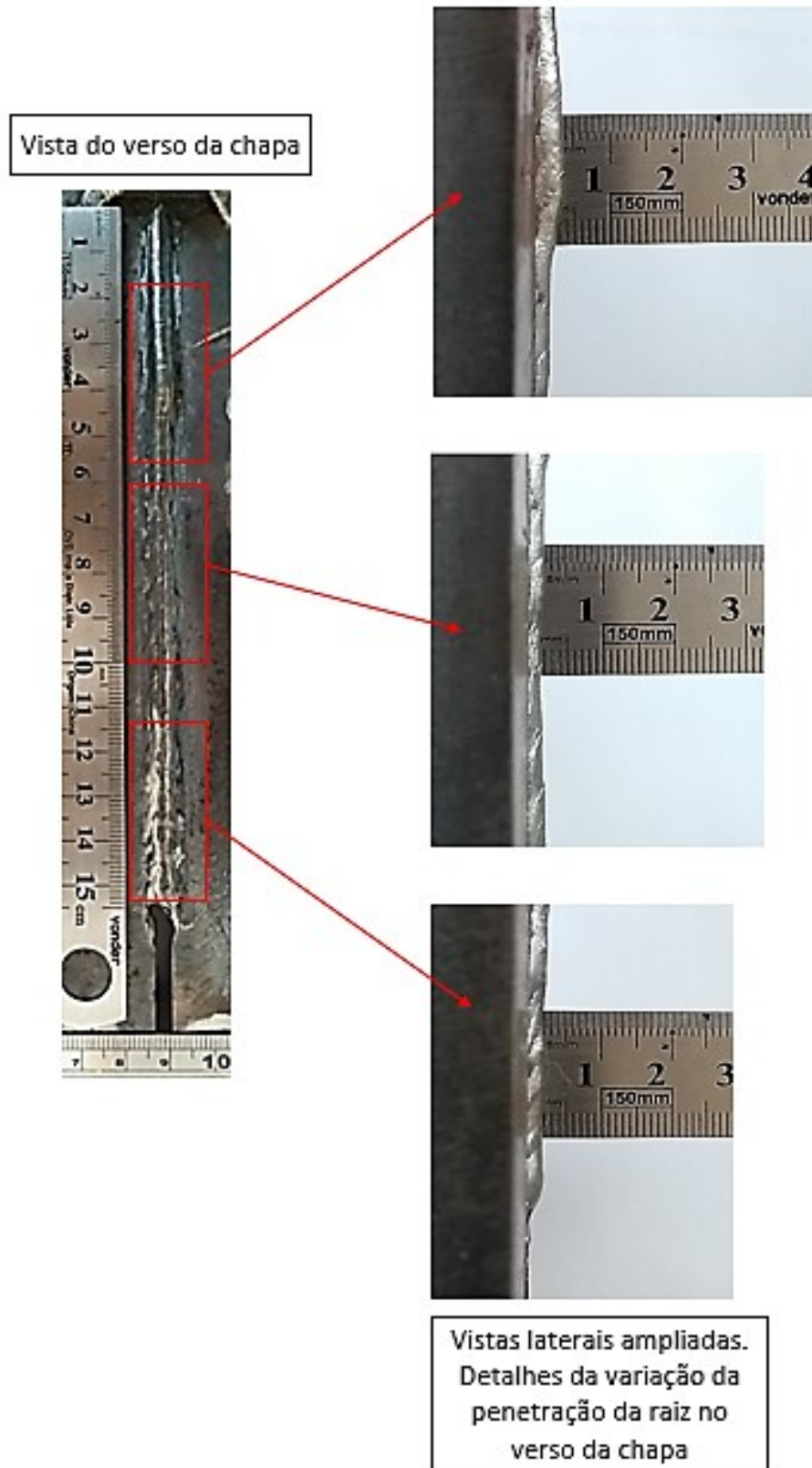


Figura 5.63: Detalhes da variação da penetração da raiz no verso da chapa. Soldagem com padrão de oscilação “Meia Lua” em chanfro com bisel $45 \pm 1^\circ$, $B_x=13$ mT e $B_y=7,9$ mT

Uma outra característica na ocorrência do furo na raiz pode ser observada na Figura 5.64. Nesta imagem é apresentada a face oposta de um dos corpos de prova onde foi depositado o cordão com padrão de oscilação “Meia Lua”, $B_x=13$ mT e $B_y=7,9$ mT evidenciando a região onde aconteceu tal fato e, em seguida, uma nova interrupção do processo. Também nesta ocasião a soldagem não se manteve estável o suficiente para que o cordão prosseguisse soldando ao longo do percurso. Devido ao arame eletrodo ter tocado a base de apoio do dispositivo de deslocamento (TARTÍLOPE), naquele momento ocorreu a formação de um novo arco, não nas paredes do chanfro ou na poça de fusão, mas sim na base de apoio. Então os parâmetros de soldagem que estavam em vigor se tornaram inadequados para sustentar a estabilidade do processo e logo em seguida o processo foi interrompido mais uma vez.

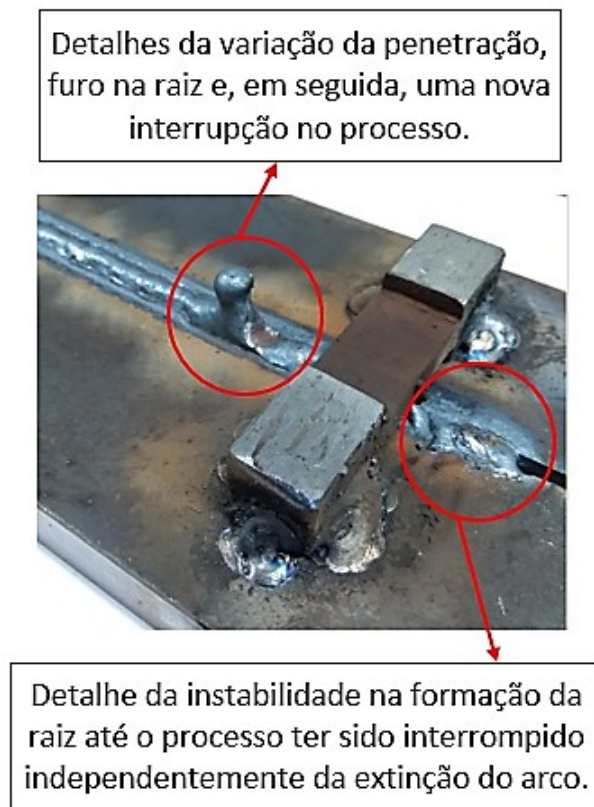
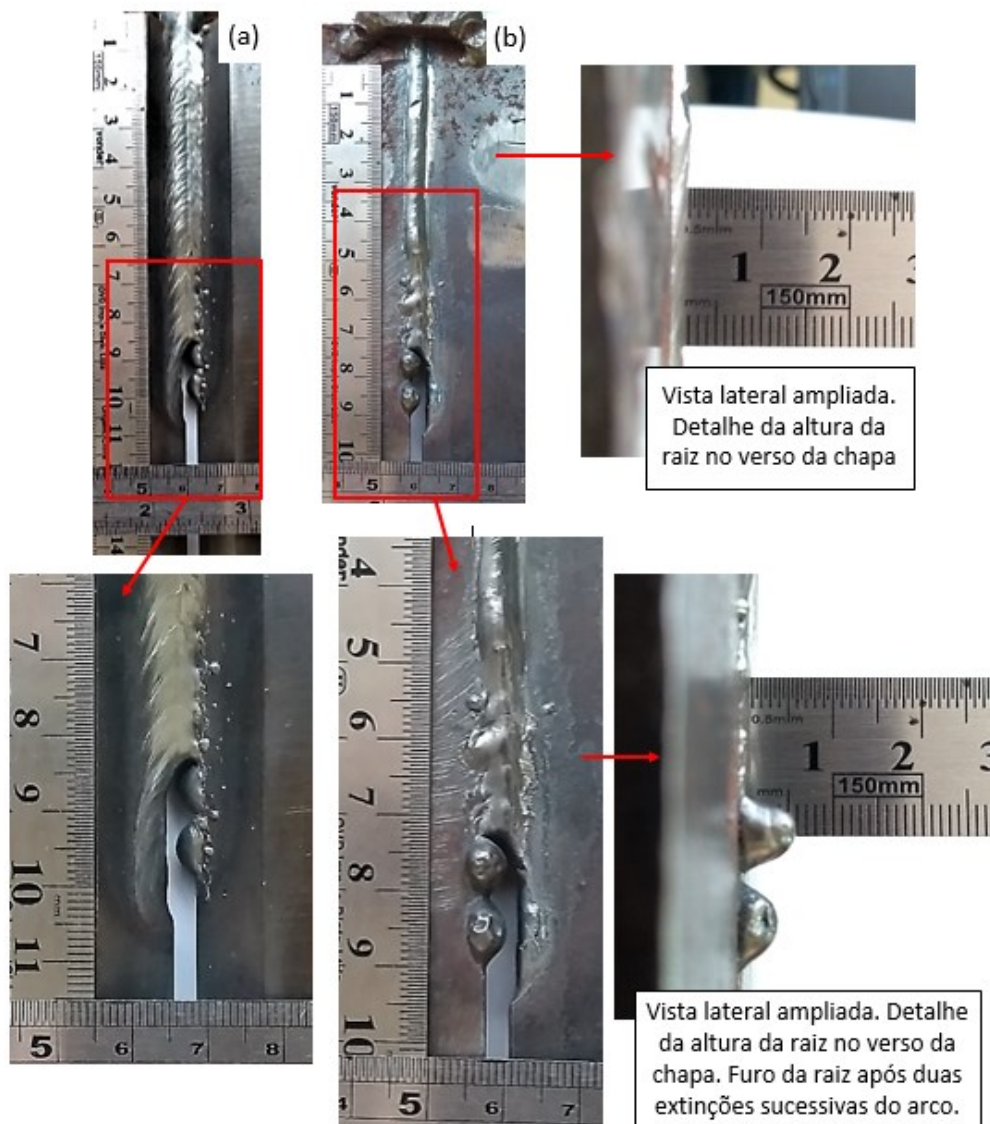


Figura 5.64: Vista da raiz no verso da chapa. Raiz furada e “uma nova interrupção no processo”. Padrão “Meia Lua”, $B_x=13$ mT e $B_y=7,9$ mT

Durante estes testes exploratórios, as ocorrências de instabilidades nas soldagens levaram à necessidade de se estender os estudos para considerar também aplicar outras Figuras de Lissajous como forma de tecimento. Como exemplo, o “Deslocamento lateral” condição (g) da Tabela 5.16 foi testado. Nesta última condição, o objetivo principal foi verificar alguma possível alteração dinâmica da solda e/ou padrão dos cordões.

Na Figura 5.65, padrão de oscilação “Descolamento Lateral”, observa-se que a soldagem foi interrompida com aproximadamente 85 mm de comprimento de cordão e abertura de raiz com aproximadamente 3,0 mm devido à ocorrência do furo da raiz após duas extinções sucessivas do arco.



(a) Vista superior e (b) vista no verso da chapa. As demais imagens são seus respectivos detalhes ampliados

Figura 5.65: Soldagem com padrão de oscilação “Deslocamento Lateral” em chanfro com bisel $45^{\circ} \pm 1^{\circ}$, $B_x=10$ mT e $B_y=5,6$ mT

Quanto aos cordões de solda que foram realizados na condição (g), “Deslocamento Lateral”, estes não apresentaram características significativamente diferentes ao padrão de solidificação ou formato geométrico em comparação com as soldas realizadas nas condições (c) e (d) da Tabela 5.16. A Figura 5.60(a) e Figura 5.65(a) foram exemplos de cordões feitos com oscilação “Meia Lua” e “Deslocamento Lateral”, respectivamente.

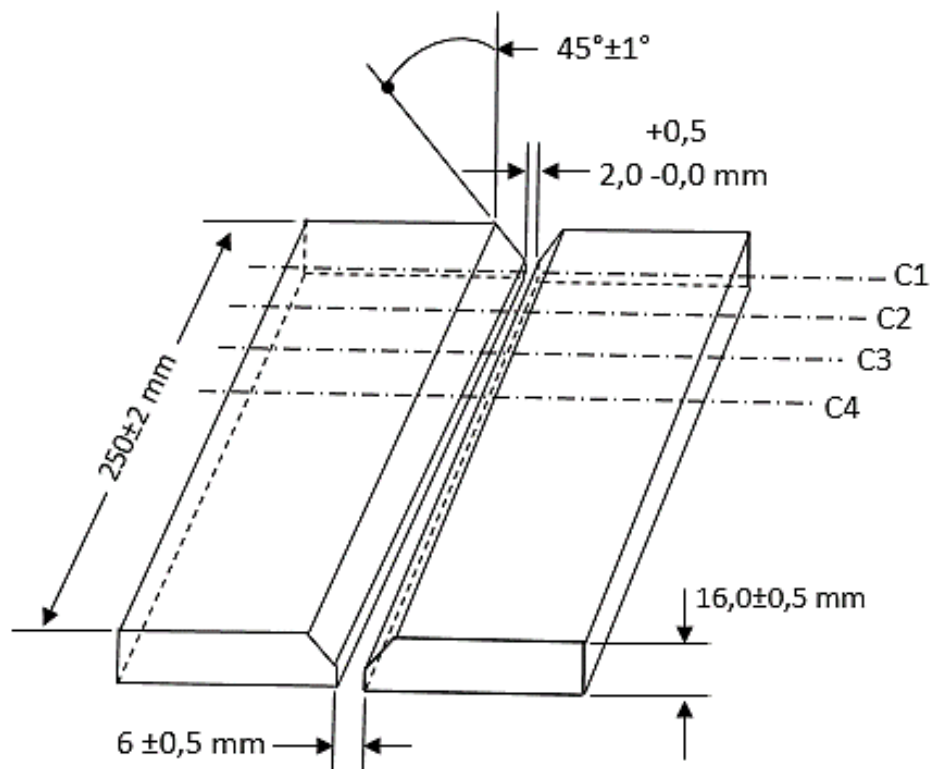
Um resumo dos testes que foram realizados é apresentado na Tabela 5.17. Nela, nota-se que, os maiores comprimentos médios de cordão e maiores médias de preenchimentos de abertura da raiz foram alcançados quando aplicado maior amplitude de oscilação no sentido transversal de soldagem (condição (d)), ver Figura 5.62 e Figura 5.63. Isso sugere que, o “espalhamento” da poça de fusão no chanfro, suposto efeito da dissipação térmica, seu contato com as paredes dos biseis e melhor controle do tamanho do arco entre outros fatores, podem ter favorecido positivamente a distribuição de calor e metal de solda na junta possibilitando assim o preenchimento da raiz com maiores afastamentos do que aqueles previstos em Normas.

Tabela 5.17: Resultados e médias dos comprimentos de soldagem e preenchimento de abertura da raiz alcançados no segundo subgrupo de testes

	Condição (c)			Condição (d)			Condição (g)		
	“X”	“Y”		“X”	“Y”		“X”	“Y”	
Tipo de onda	Seno	Seno		Seno	Seno		Quadr.	Triang	
Amplitude (mT)	10	5,6		13	7,9		10	5,6	
Comprimento dos cordões (mm)	105	90	96	155	150	142	85	115	110
Média dos comprimentos dos cordões (mm)	97			149			103		
Desvio padrão do comprimento dos cordões	7,5			6,6			16,1		
Aberturas das raízes (mm)	3,3	2,8	3,0	4,1	3,8	3,5	3,0	3,5	3,2
Média das aberturas das raízes (mm)	3,0			3,8			3,2		
Desvio padrão das aberturas das raízes (mm)	0,3			0,3			0,3		
Figura de Lissajous	“Meia-Lua” ∪			“Meia-Lua” ∪			“Desloc. lateral” □		
Obs.: “X” – Oscilação transversal, “Y” – Oscilação longitudinal									

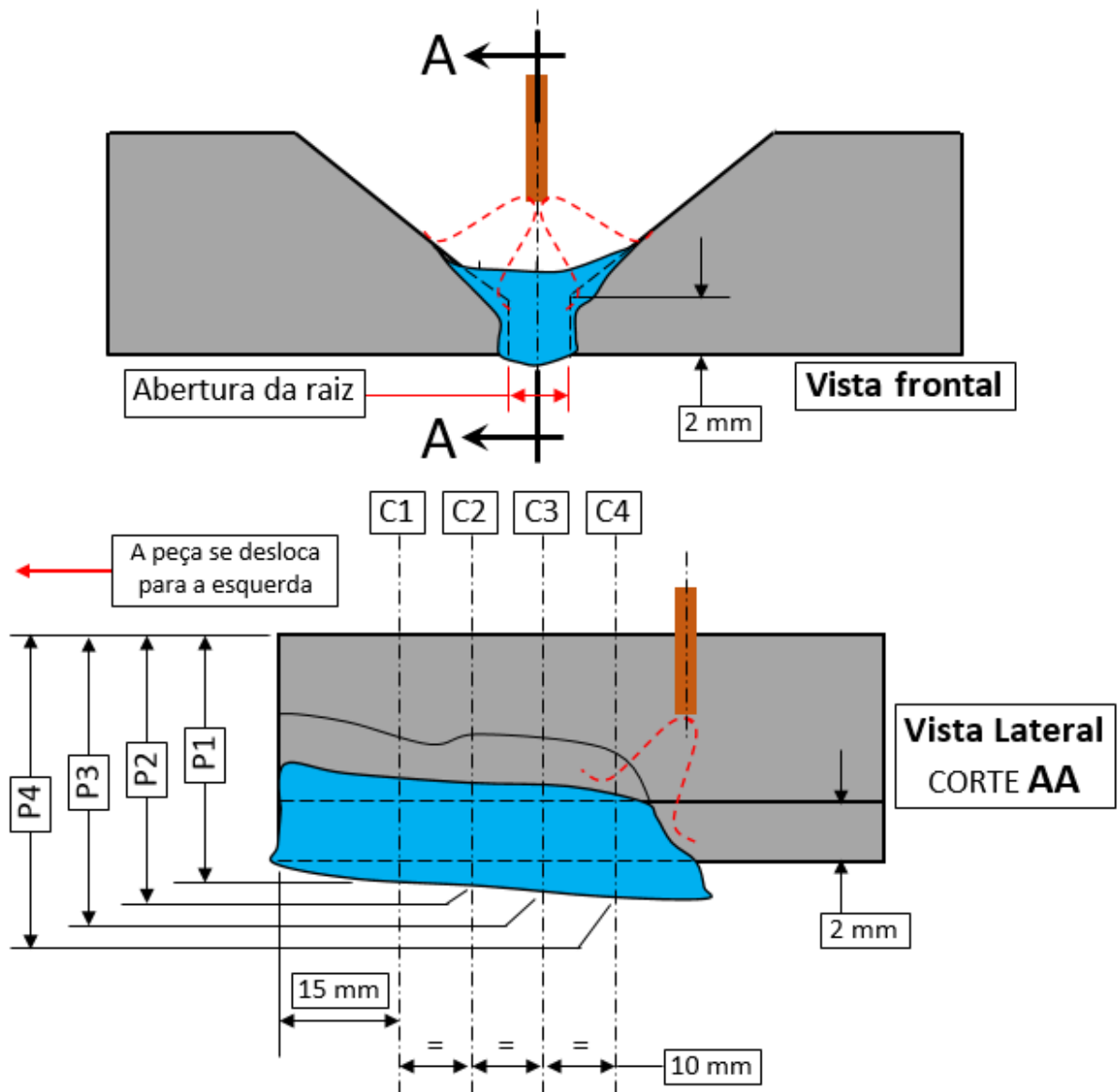
5.5.3. Terceiro subgrupo de testes – Padrões de tecimento seguindo diferentes Figuras de Lissajous

Com os resultados obtidos até esta etapa do trabalho e também baseado nas referências bibliográficas [22], [23], [25], [33-37] e [42] definiu-se a utilização de determinados parâmetros de soldagem, gás de proteção, frequência de oscilação, ângulo do chanfro, velocidade de soldagem, espessura dos corpos de prova e relação de amplitudes para serem aplicados no terceiro subgrupo de testes. Mais uma vez, os cordões foram analisados quanto ao comprimento de solda alcançado, dimensão de abertura da raiz que foi preenchida no local do máximo comprimento do cordão. Acrescentou-se às análises, macrografias de seções transversais a cada 10 mm de soldagem, penetração da raiz e área do metal de solda em cada uma destas seções transversais. A Figura 5.66 e Figura 5.67 ilustram onde foram feitos os cortes e as medições. Adicionalmente a estas medições, sinais elétricos destes ensaios foram registrados e fizeram parte das considerações desta etapa, lembrando que agora, aplicando-se diferentes padrões de tecimento.



C1, C2, C3 e C4 significam, Corte 1, Corte 2 e assim sucessivamente

Figura 5.66: Ilustração das localizações das seções transversais para medições







C1, C2, C3 e C4 significam, Corte 1, Corte 2 e assim sucessivamente

P1, P2, P3 e P4 significam, profundidade de penetração 1, profundidade de penetração 2, assim sucessivamente

Figura 5.67: Ilustração das localizações das seções transversais para medições das penetrações

Utilizando os parâmetros de soldagem da Tabela 5.6 para proteção de Ar-4%CO₂ – 85 A, chanfro com biseis de 45±1°, espessura de corpos de prova com 16±0,5 mm e abertura progressiva da raiz (iniciando com 2,0+0,5 mm e chegando a 6,0±0,5 mm) foram produzidos três cordões sem a oscilação magnética do arco e mais três com cada um dos quatro diferentes padrões especificados na Tabela 5.18 totalizando 15 testes.

Tabela 5.18: Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento nos testes finais das soldagens GMAW pulsada em corpos de prova chanfrados

	Condição (c)		Condição (d)		Condição (e)		Condição (g)	
	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”	“X”	“Y”
Tipo de onda	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Seno	Quadr.	Triang.
Amplitude (mT)	11,6	6,8	11,6	6,8	11,6	6,8	11,6	6,8
F _x / F _y	1/2		1/1		1/2		1/2	
Frequência (Hz)	0,5		0,5		0,5		0,5	
Simetria (%)	50	50	50	50	50	50	10	90
Offset	0	0	0	0	0	0	0	0
Ângulo de fase (rad)	$\pi/4$	---	$\pi/2$	---	$\pi/2$	---	$\pi/4$	---
Figura de Lissajous	“Meia-Lua” 		“Elipse” 		“Lemniscata” 		“Desloc. Lateral” 	
OBS.: “X” – Oscilação transversal, “Y” – Oscilação longitudinal								

5.5.3.1. Soldagem em corpos de prova chanfrados - Sem aplicação de oscilação magnética externa.

Nos cordões produzidos sem oscilação controlada do arco as medições registraram que o furo na raiz ocorreu quando a abertura média entre as peças e comprimento médio dos cordões foram de aproximadamente 2,4 e 44,7 mm, respectivamente. Nestes testes, os prováveis principais causadores deste tipo de falha podem ter sido, o acúmulo de calor, excesso de massa fundida que se concentrou no fundo do vale do chanfro e a dimensão da abertura entre as faces de topo.

Ao ser apontado o acúmulo de calor como um dos responsáveis pelo furo na raiz, têm-se como referência as soldagens que foram realizadas sobre chapa na seção 5.3 (sem a atuação da oscilação controlada do arco). Naquela condição, comparativamente com as demais soldagens (onde aplicou-se a oscilação do arco) a maior média de temperatura foi registrada na face oposta da chapa, provavelmente devido à ineficiência no “espalhamento” transversal e longitudinal do cordão, causando assim a má dispersão térmica na região da soldagem. Analogamente, acredita-se que as soldas no chanfro também tenham concentrado calor devido à “má movimentação forçada da poça de fusão”. Outro fator agravante foi a abertura da fresta entre as peças, ou seja, a falta de metal de base ao longo da soldagem. Com isso, a massa fundida que se acumulou no fundo do vale formado pelo chanfro contribuiu para uma maior penetração gradativa do cordão até resultar no furo da raiz. Na Figura 5.68 são apresentadas imagens de um dos corpos de prova deste ensaio. Na Figura 5.69 são apresentadas

macrografias do corte “C1” e “C4” deste cordão para se visualizar a evolução da penetração até a última seção transversal (posição “C4”). Na Tabela 5.19 são apresentadas as média e desvios padrões das respectivas medições de penetrações e áreas de metal de solda.



Figura 5.68: Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, sem oscilação do arco

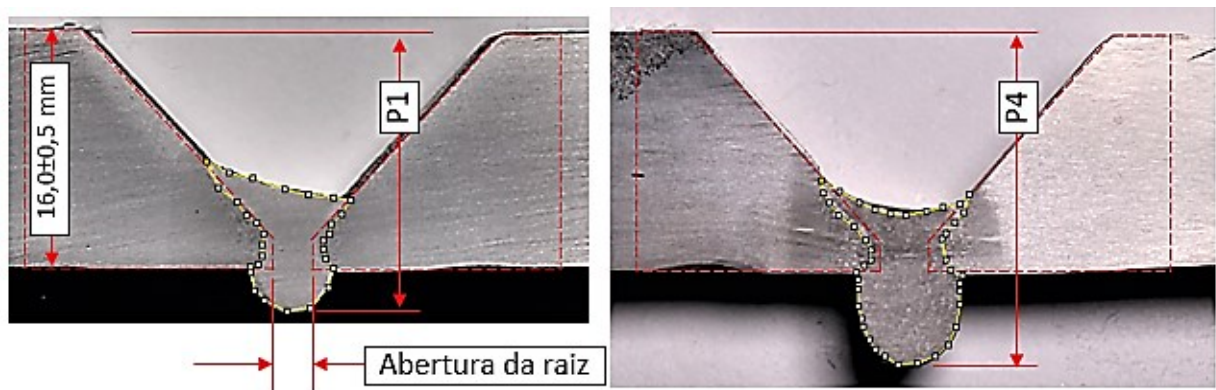


Figura 5.69: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro $45\pm 1^\circ$, sem oscilação

Tabela 5.19: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, sem oscilação do arco

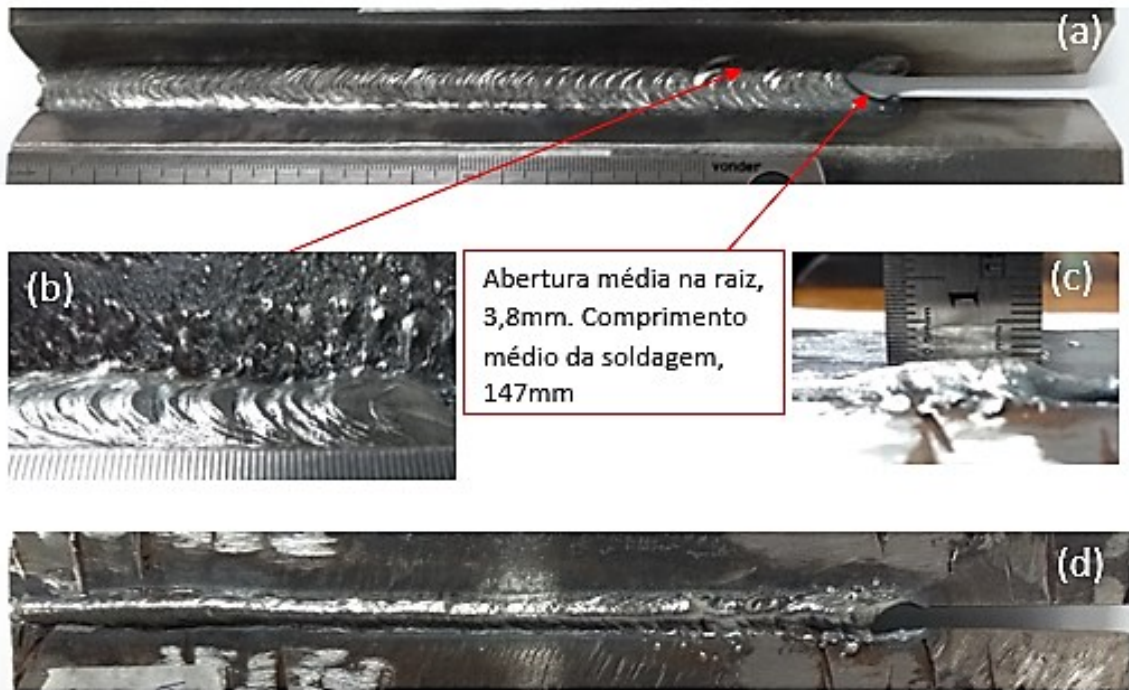
	Sem Oscilar	
	Penetração	Área
Corte 1 - P1	19,2	48,2
Corte 2 - P2	20,4	52,1
Corte 3 - P3	20,9	58,4
Corte 4 - P4	22,8	72,4
Média	20,8	57,7
Desvio Padrão	1,5	10,6

5.5.3.2. Soldagem em corpos de prova chanfrados - Aplicação de oscilação magnética em forma de Lemniscata.

Nos cordões feitos com deflexão do arco em forma de Lemniscata (condição (e)) o furo na raiz ocorreu com a abertura média de 3,8 mm e o comprimento médio de soldagem passou de 44,7 para 147,0 mm. A Figura 5.70 são imagens de um dos corpos de prova que foram soldados e na Figura 5.70(b) pode ser observado gotas de metal de solda solidificadas na parede do chanfro (comparar esta imagem com a Figura 5.68 (sem oscilação)). Este fato reforça o argumento de que a fonte de calor (arco elétrico) foi defletida e com isso, o metal de adição, preferencialmente foi lançado para onde o arco estava direcionado. Isso sugere também que o tecimento seguindo Figuras de Lissajous podem melhorar a distribuição de calor, modificar gradientes térmicos que incidem na região da poça de fusão, alcançar maior ou menor penetração do cordão e conseguir bom aspecto visual da solda. Na Tabela 5.20 são apresentadas as médias e desvios padrões das respectivas medições de penetrações e áreas de metal de solda.

Tabela 5.20: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Lemniscata

	Lemniscata	
	Penetração	Área
Corte 1 - P1	18,2	44,9
Corte 2 - P2	18,4	47,2
Corte 3 - P3	19,4	56,1
Corte 4 - P4	19,4	60,9
Média	18,9	52,3
Desvio Padrão	0,7	7,5



(a) vista superior do cordão, (b) gotas metálicas depositadas na parede do bisel, (c) altura do reforço antes de furar as peças e (d) vista da face oposta do corpo de prova

Figura 5.70: Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco em forma de Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Na Figura 5.71 são apresentadas macrografias do corte “C1” e “C4” deste cordão para se visualizar a evolução da penetração até a última seção (posição “C4”).

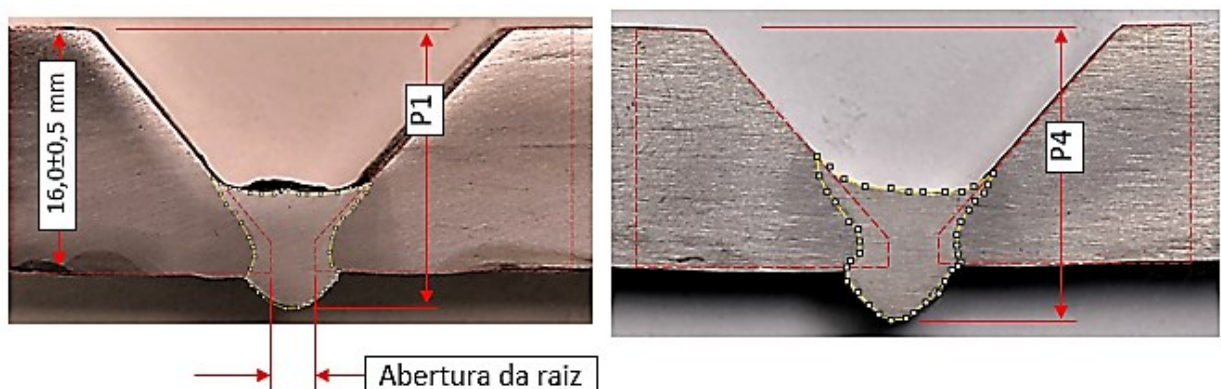
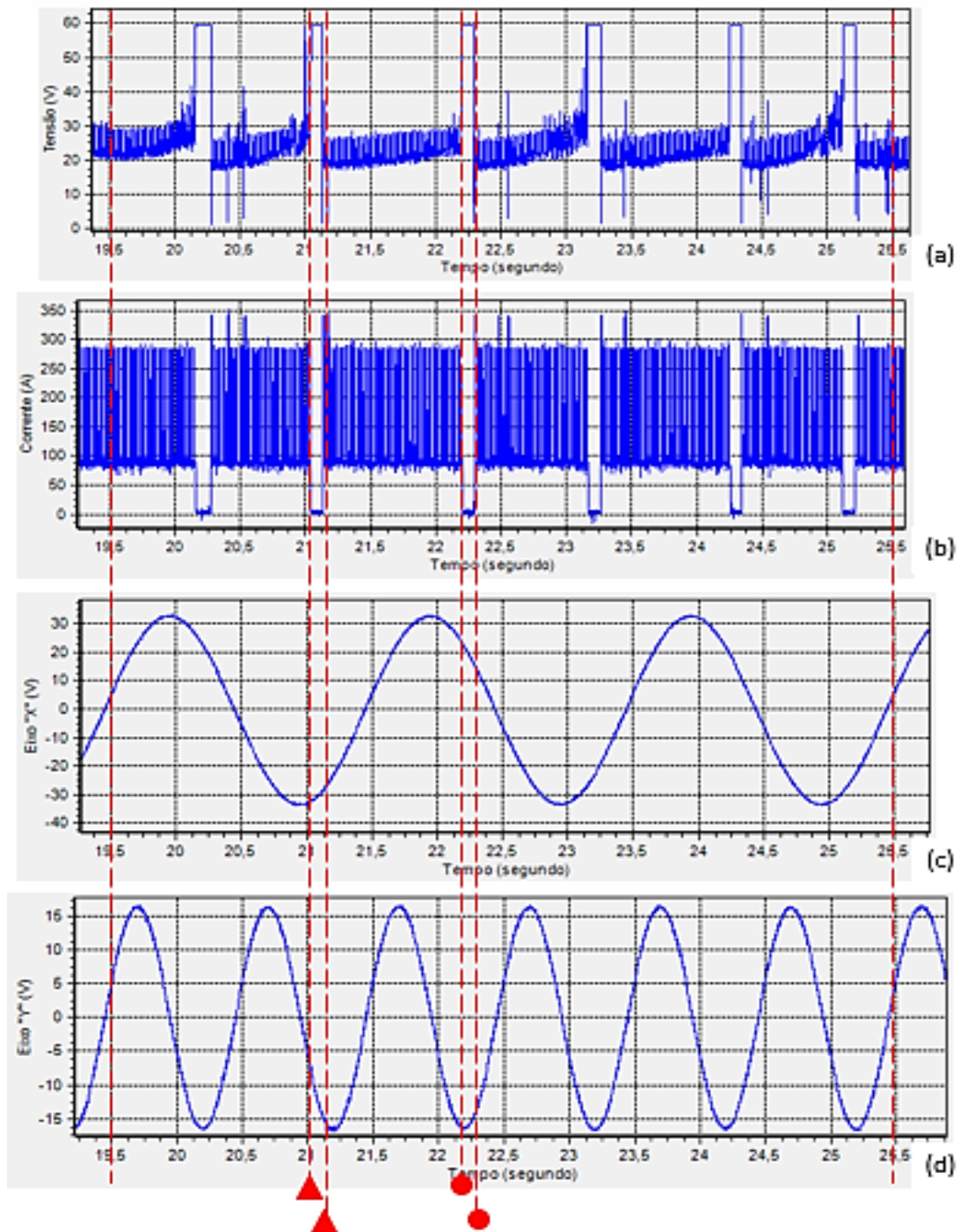


Figura 5.71: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Nos oscilogramas que são apresentados na Figura 5.72 podem ser vistas as ocorrências dos sinais elétricos em um trecho de uma das soldagens realizadas. Nesta figura é possível observar, precisamente, os locais onde aconteceram os curtos circuitos e as extinções do arco.



(a) Oscilograma da tensão elétrica, (b) oscilograma da corrente elétrica, (c) característica da onda atuante na deflexão do arco no sentido do eixo "X" (transversal) e (d) característica da onda atuante no eixo "Y" longitudinal. Todos em função do tempo de soldagem

Figura 5.72: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

No ciclograma da Figura 5.73 destacam-se os indicadores representados pelos números 1, 2, 3 e 4. Eles correspondem às extinções identificadas nos oscilogramas da Figura 5.72.

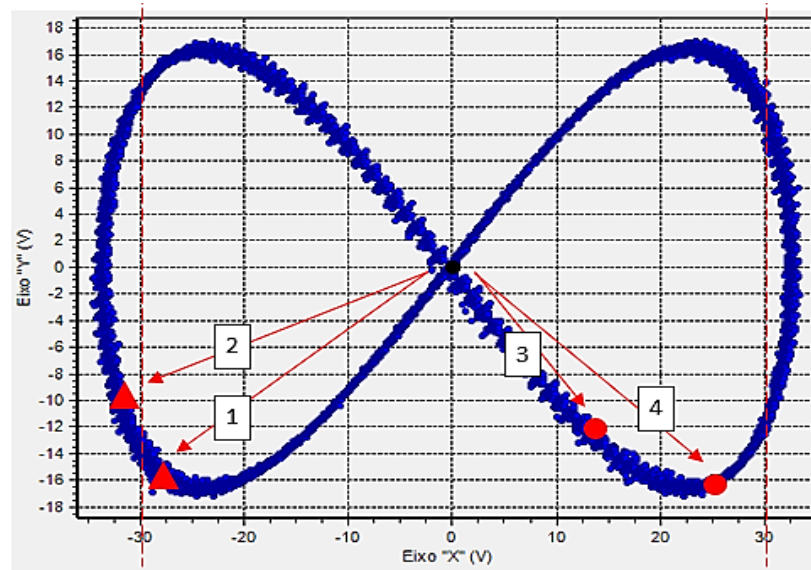


Figura 5.73: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.72

Ao longo dos demais ensaios com este padrão de tecimento, observou-se que tais indicadores podem se localizar em diferentes posições sobre a trajetória de oscilação à medida em que o cordão segue sendo soldado e conseqüentemente a fresta da raiz aumenta sua abertura. Com isso, as regiões de maiores deflexões do arco mantêm a tendência de apresentarem a maior incidência de extinções e curtos circuitos, devido basicamente, à variação do comprimento do arco em função da oscilação magnética imposta.

Com este padrão de tecimento, didaticamente, a Figura 5.74 é o desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento que foi aplicado. Nele pode ser observado os vetores \vec{F} da força magnética. Este desenho colabora com esta tese no sentido de que o direcionamento do metal de adição tende a acompanhar o arco para onde ele está defletido e isso também contribui para a formação de uma poça de fusão localizada e/ou mais dispersa. Na mesma figura, as duas linhas centrais igualmente inclinadas verticalmente representam a abertura progressiva da fresta da raiz, as elipses que acompanham a trajetória resultante da oscilação representam o arco elétrico levemente deformado em virtude da sua deflexão ao longo da soldagem e a marcação quadriculada auxilia na identificação da relação de amplitudes 2 para 1, ou seja, a deflexão no eixo "X" é aproximadamente o dobro daquela no eixo "Y".

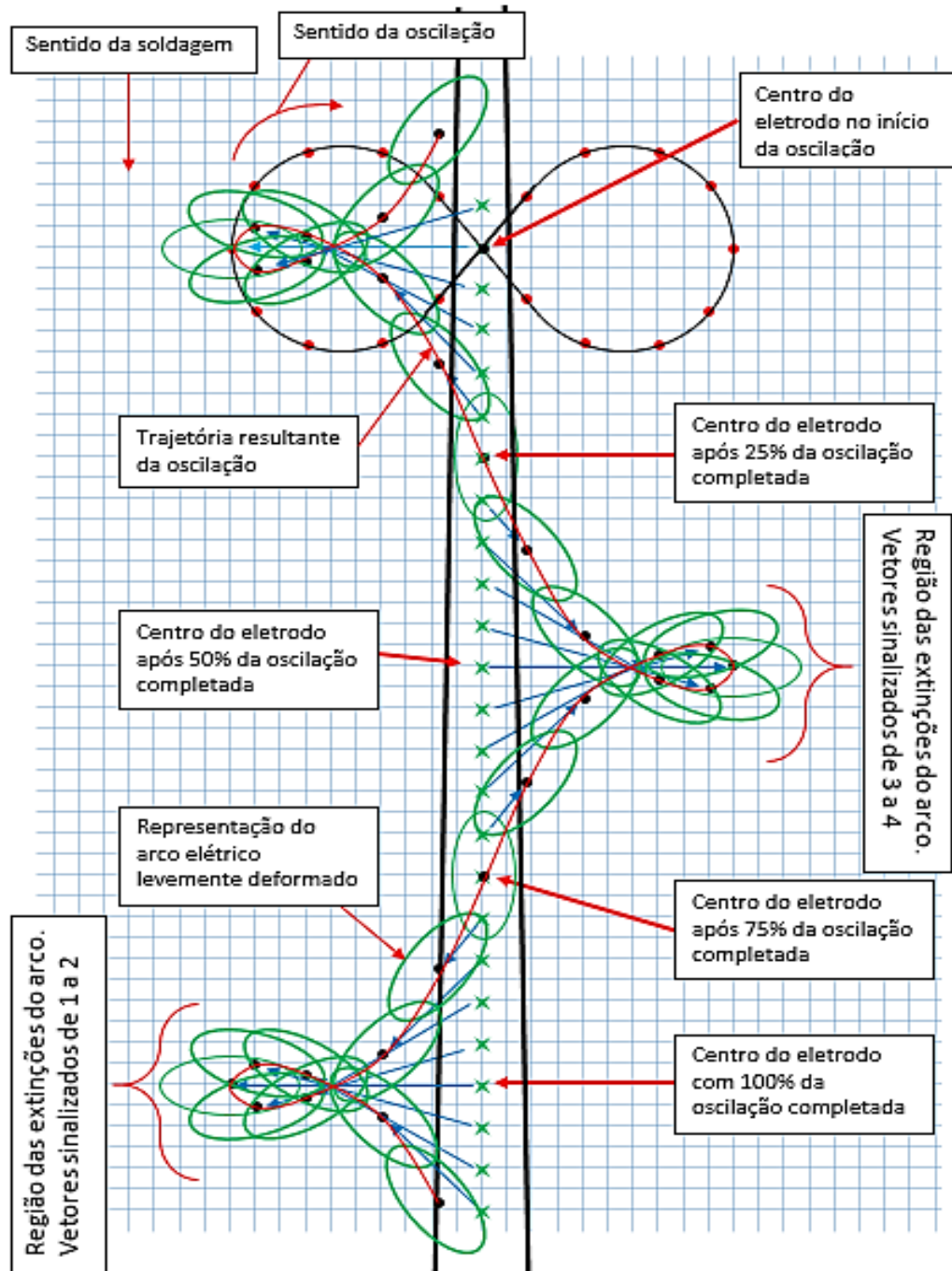


Figura 5.74: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Nesta seção do estudo, o cálculo de “ β ” (Taxa de crescimento da tensão elétrica do arco) foi colocado à prova como forma de estabelecer maior ou menor estabilidade para o processo GMAW pulsado para o passe de raiz em peças chanfradas seguindo padrões de tecimento por meio da oscilação magnética controlada. Vale lembrar que, anteriormente, o “ β ” havia sido especificado na seção 5.4.2 para os cordões sobre chapa.

Sob esta nova condição, a Figura 5.75 é um dos oscilogramas da soldagem no chanfro com abertura progressiva da raiz e com oscilação em forma de Lemniscata. Os dados obtidos foram utilizados para a determinação do “ β ”.

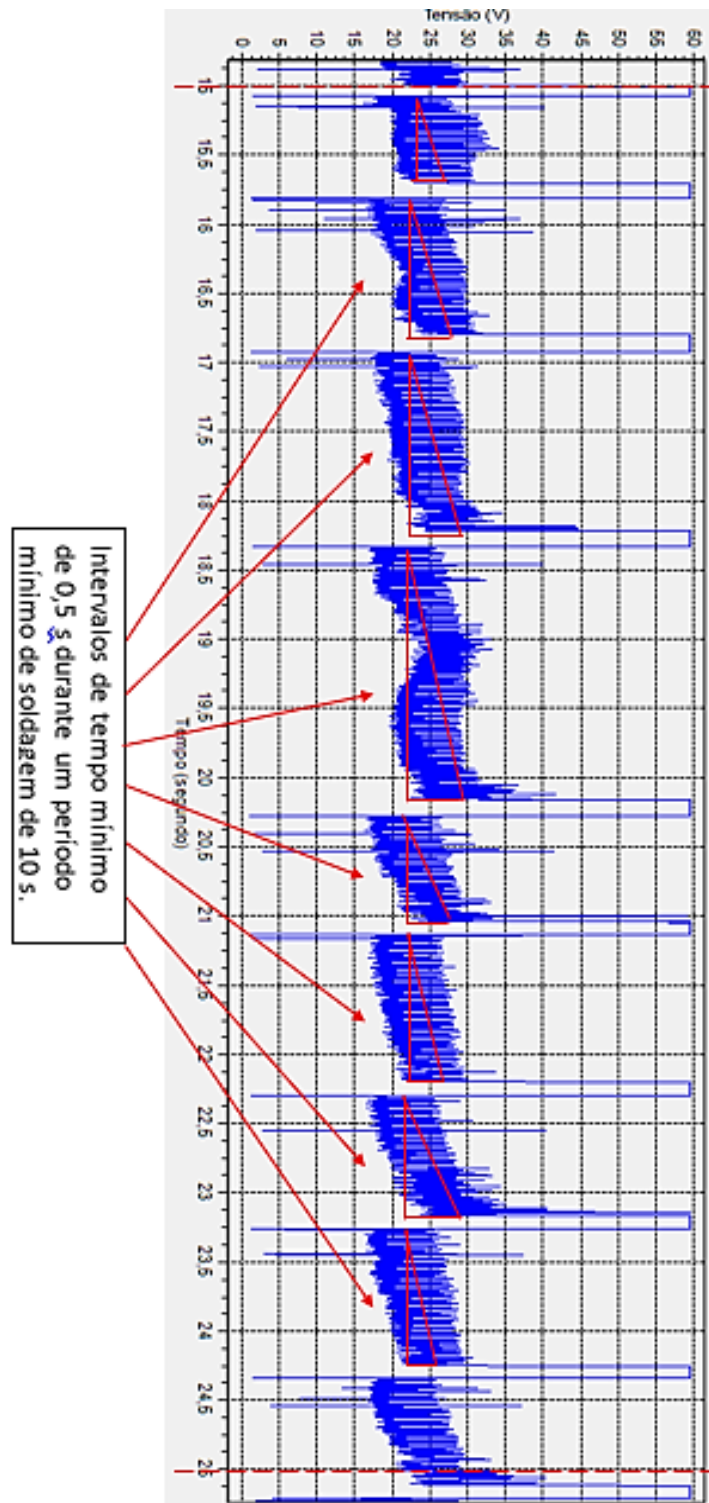


Figura 5.75: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação em forma de Lemniscata, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s

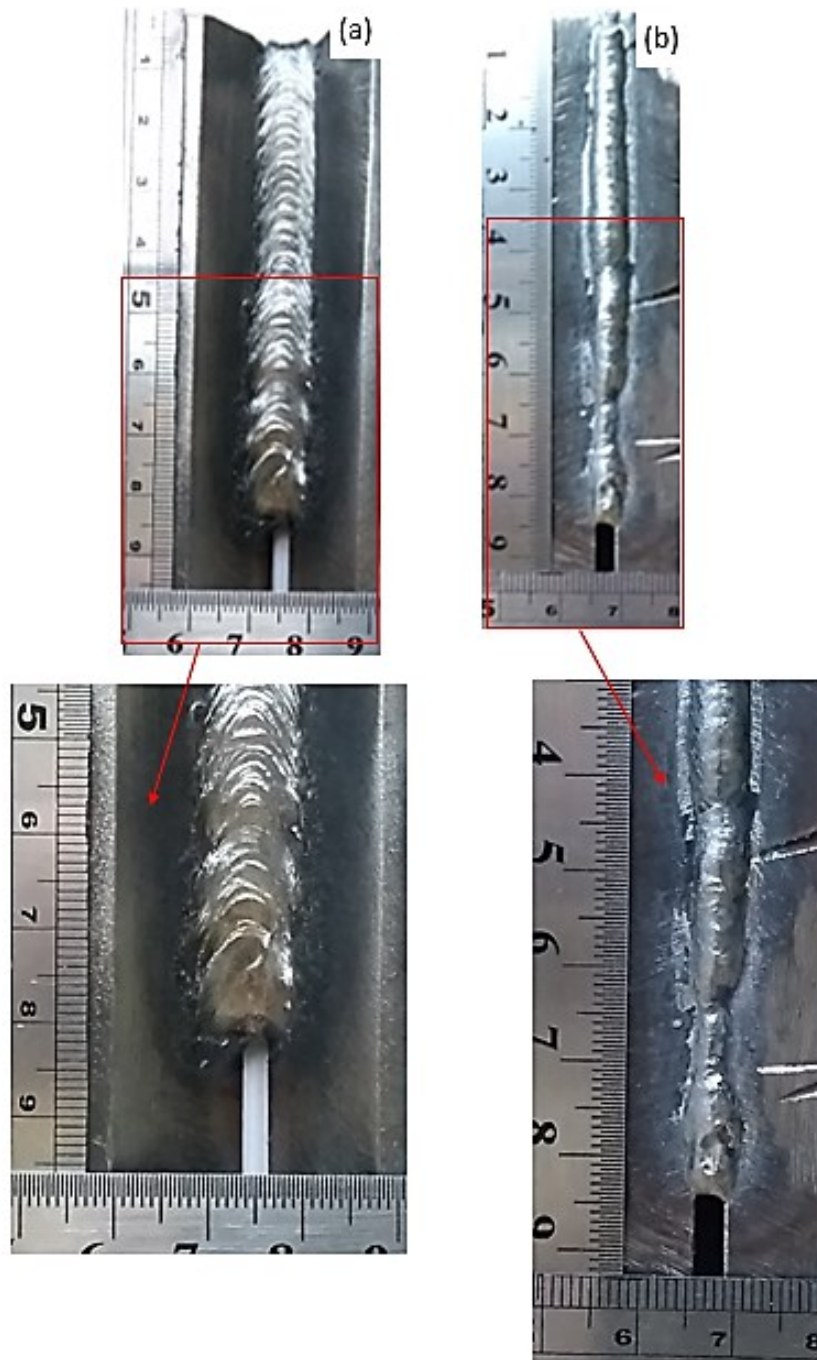
Na Tabela 5.21 são mostrados os valores que foram extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.75.

Tabela 5.21: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.75

LEMNISCATA								
	U _{min} [V]	U _{máx} [V]	ΔU [V]	t _{inic} [s]	t _{fim} [s]	Intervalos de arcos extintos [s]	Intervalos soldando [s]	$\beta = \Delta U / \Delta t$ [V/s]
1	23	26	3	14,976	15,074	0,098	0,614	↓
2	22	27	5	15,688	15,818	0,13	0,953	
3	22	28	6	16,771	16,921	0,15	1,273	
4	22	28	6	18,194	18,329	0,135	1,792	
5	22	26	4	20,121	20,275	0,154	0,746	
6	22	25	3	21,021	21,133	0,112	1,033	
7	22	30	8	22,166	22,294	0,128	0,845	
8	22	25	3	23,139	23,265	0,126	0,974	
9				24,239				
média			4,75				1,03	4,6
Desvio Padrão			1,83				0,37	
Total de tempo de arco extinto						1,033		Extinções [%]
Total de tempo de soldagem						10		10,33

5.5.3.3. Soldagem em corpos de prova chanfrados - Com aplicação de oscilação magnética em forma de “Meia Lua”.

Aplicando-se o tecimento em forma de “Meia Lua” (condição (c)), nestes cordões observou-se não ter havido sinais de furo da raiz em consequência das instabilidades e posteriores interrupções dos respectivos processos. Como exemplo, na Figura 5.76 e na Figura 5.77 podem ser observadas imagens de uma das soldagens com tal padrão de tecimento.



(a) Vista superior do cordão e (b) detalhe ampliado. As demais imagens são seus respectivos detalhes ampliados

Figura 5.76: Soldagem em chanfro de 45° com afastamento progressivo. Padrão de tecimento “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

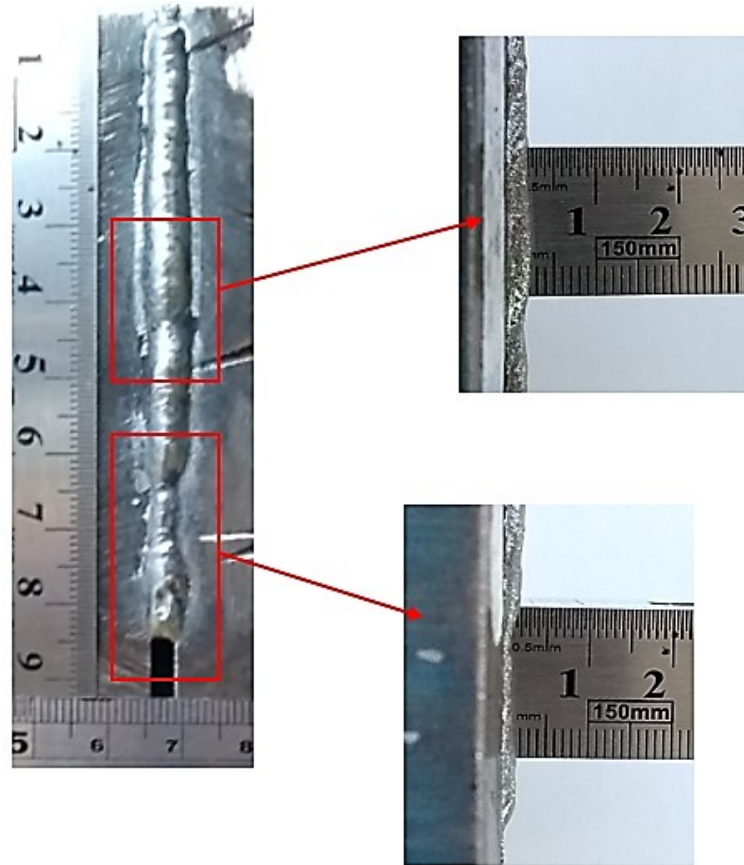


Figura 5.77: Detalhes da face oposta da chapa da Figura 5.76. Visualização da variação da altura da raiz

Na Figura 5.78 são apresentadas macrografias do corte “C1” e “C4” deste cordão para se visualizar a evolução da penetração até a última seção (posição “C4”).

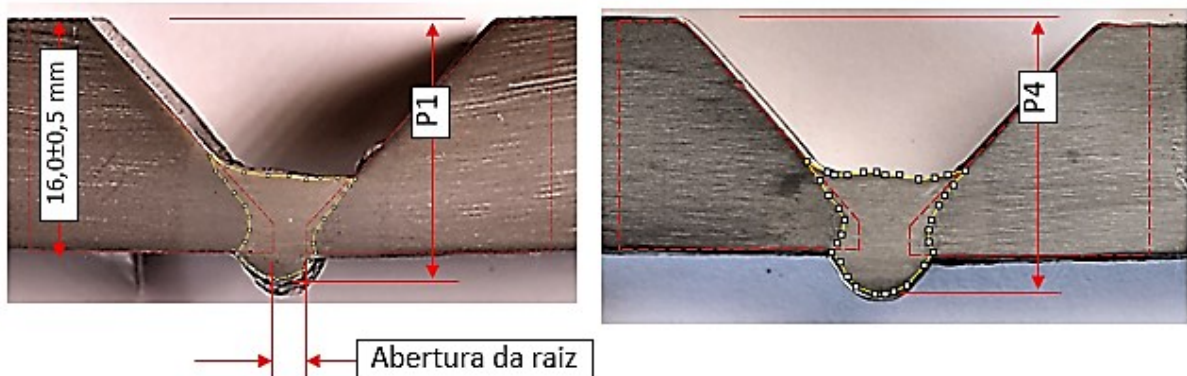


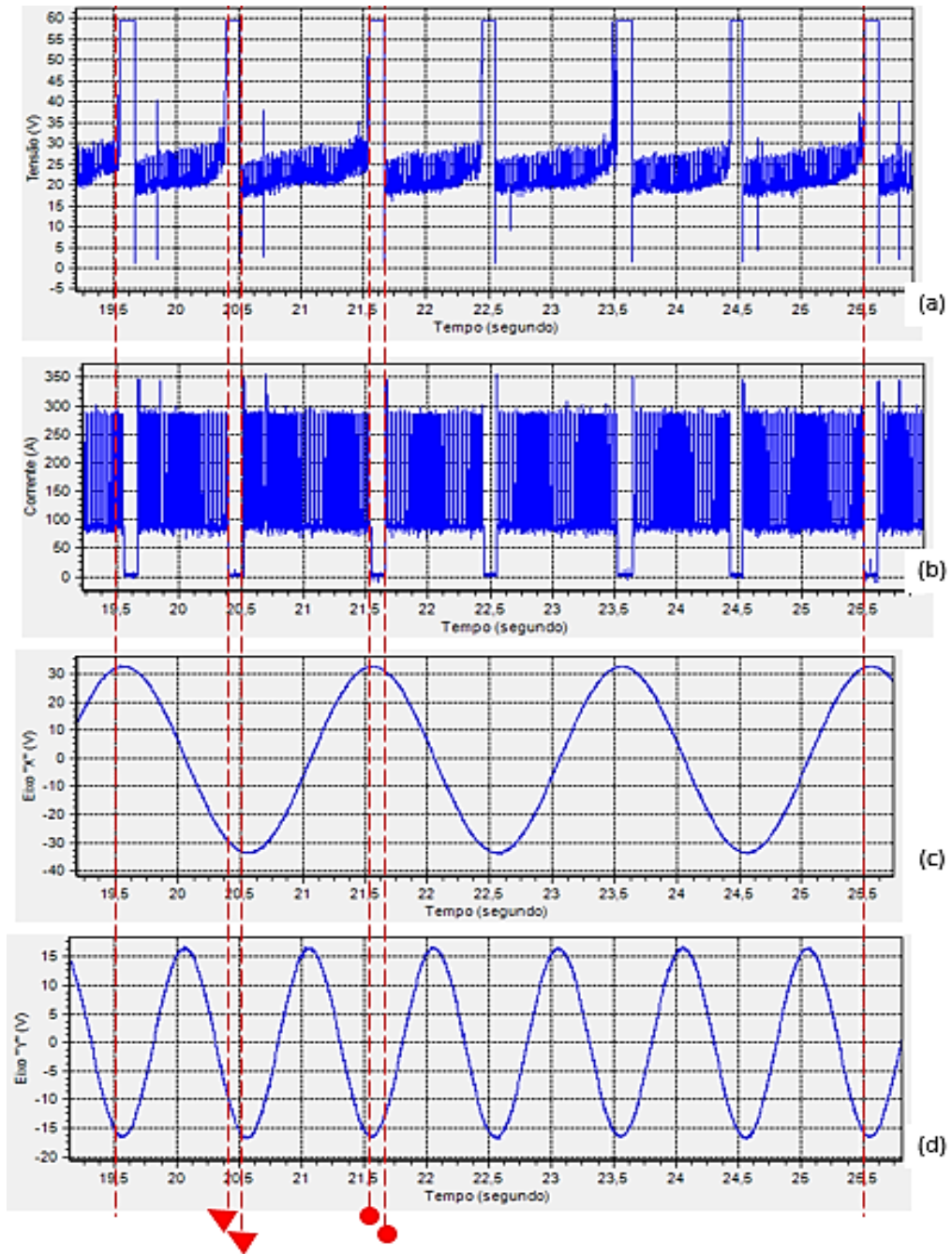
Figura 5.78: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Na Tabela 5.22 são apresentadas as médias e desvios padrões das respectivas medições de penetrações e áreas de metal de solda.

Tabela 5.22: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Meia Lua

	Meia Lua	
	Penetração	Área
Corte 1 - P1	17,4	38,6
Corte 2 - P2	18,2	48,6
Corte 3 - P3	18,9	53,9
Corte 4 - P4	18,6	52,8
Média	18,3	48,5
Desvio Padrão	0,7	7,0

Analogamente às análises que foram feitas na seção 5.5.3.2, a seguir são apresentados a Figura 5.79 (conjunto de oscilogramas de um trecho de uma das soldagens), Figura 5.80 (ciclograma), Figura 5.81 (desenho da simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento) Figura 5.82 (oscilograma obtido durante os 10 s de soldagem) e a Tabela 5.23 (cálculos para a determinação dos " β ").



(a) Oscilograma da tensão elétrica, (b) oscilograma da corrente elétrica, (c) característica da onda atuante na deflexão do arco no sentido do eixo "X" (transversal) e (d) característica da onda atuante no eixo "Y" longitudinal. Todos em função do tempo de soldagem

Figura 5.79: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo "Meia Lua", $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

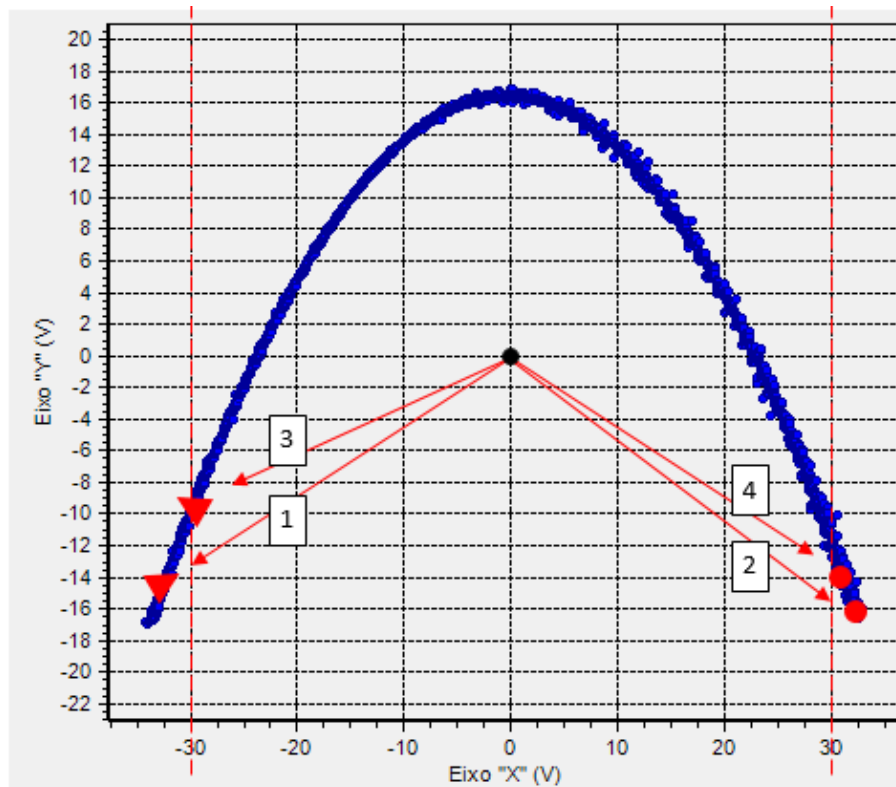


Figura 5.80: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.79

Igualmente ao que aconteceu nos testes da seção 5.5.3.2, observou-se que os indicadores numerados de 1 a 4 podem se localizar em diferentes posições sobre a trajetória de oscilação e também mantêm a tendência de apresentarem a maior incidência de extinções e curtos circuitos nas regiões com maiores deflexões do arco, mesmo não tendo ocorrido o furo na raiz.

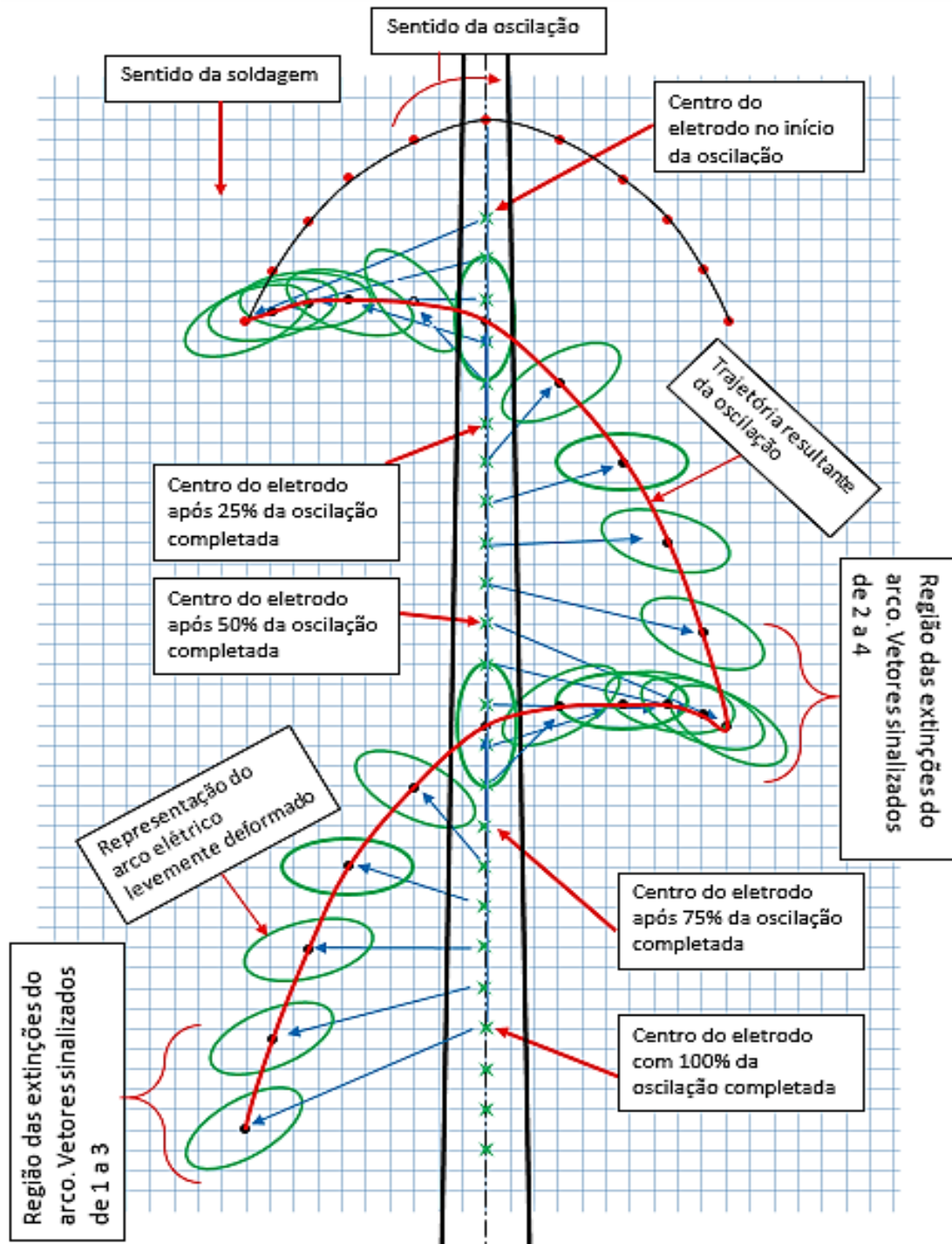


Figura 5.81: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Sob esta condição, a Figura 5.82 é um dos oscilogramas da soldagem com padrão de tecimento em forma de “Meia Lua”. Os dados obtidos foram utilizados para a determinação do seu respectivo “ β ”.

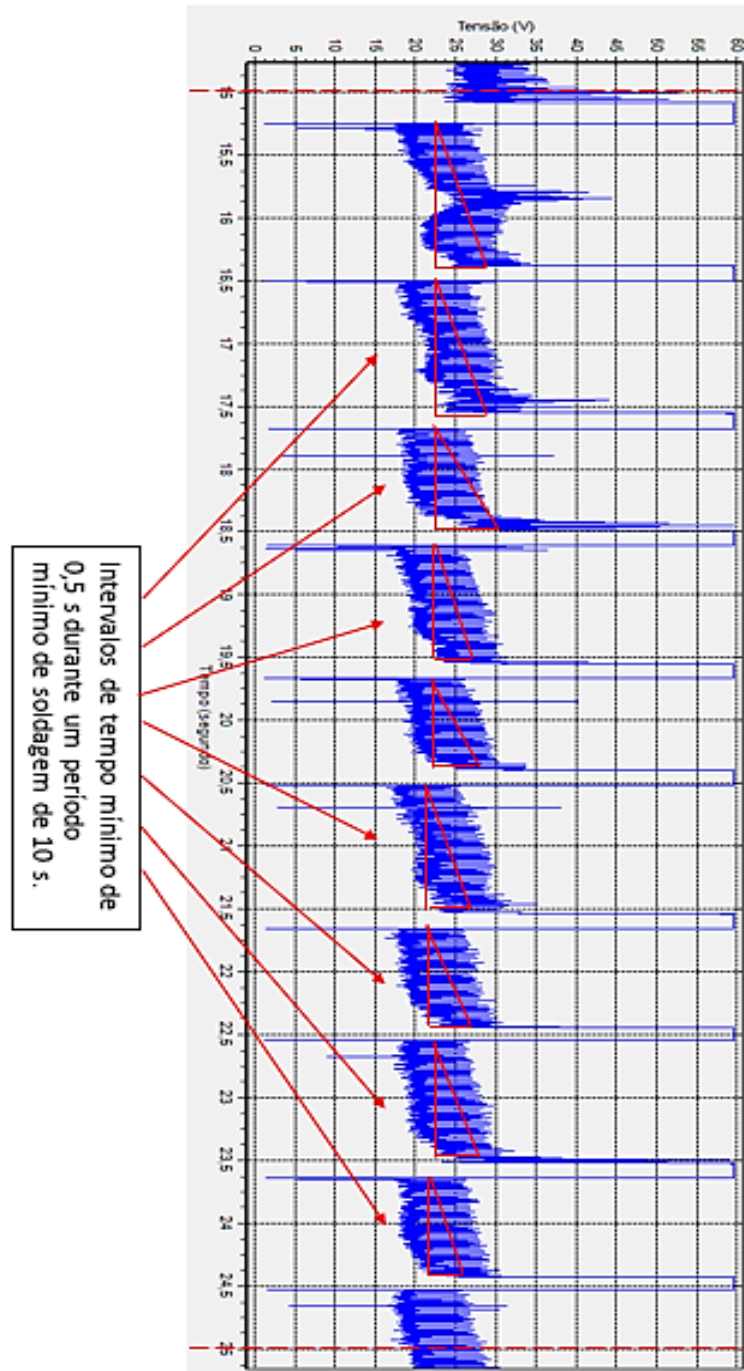


Figura 5.82: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação padrão “Meia Lua”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s

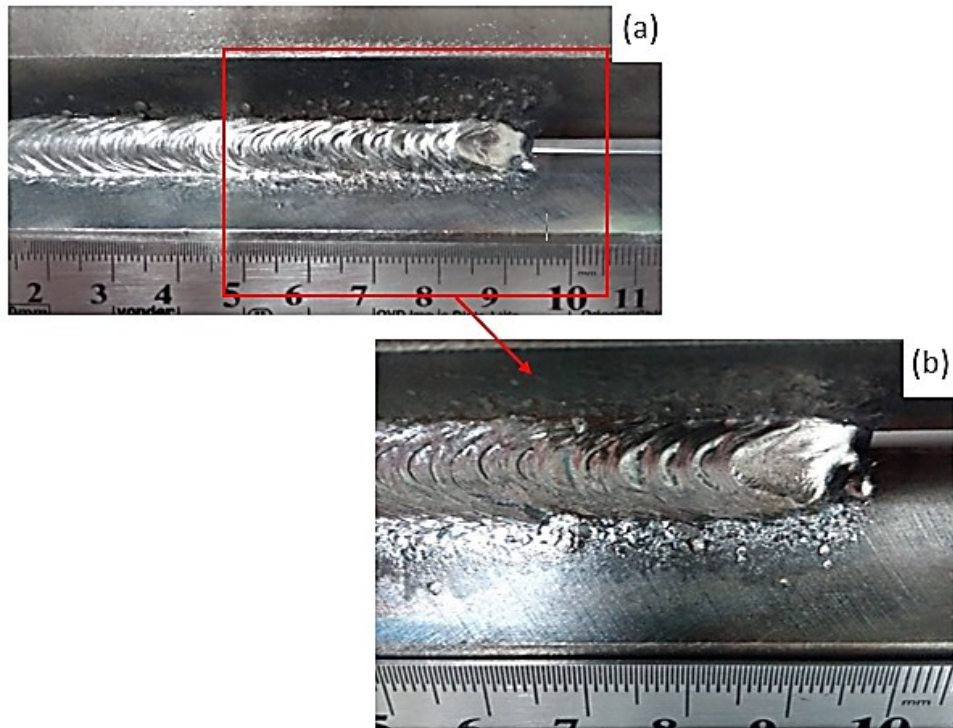
Na Tabela 5.23 são mostrados os valores que foram extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.82.

Tabela 5.23: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.82

MEIA LUA								
	U _{min} [V]	U _{máx} [V]	ΔU [V]	t _{inic} [s]	t _{fim} [s]	Intervalos de arcos extintos [s]	Intervalos soldando [s]	$\beta = \Delta U / \Delta t$ [V/s]
1	22	28	6	15,06	15,25	0,19	1,107	↓
2	23	28	5	16,357	16,505	0,148	1,022	
3	22	30	8	17,527	17,677	0,15	0,787	
4	22	27	5	18,464	18,602	0,138	0,919	
5	22	26	4	19,521	19,666	0,145	0,708	
6	22	26	4	20,374	20,515	0,141	0,99	
7	22	26	4	21,505	21,658	0,153	0,773	
8	22	28	6	22,431	22,546	0,115	0,935	
9	22	26	4	23,481	23,643	0,162	0,753	
10				24,396				
média			5,11				0,89	5,8
Desvio Padrão			1,36				0,14	
Total de tempo de arco extinto						1,342		Extinções [%]
Total de tempo de soldagem						10		13,42

5.5.3.4. Soldagem em corpos de prova chanfrados - Com aplicação de oscilação magnética em forma de Elipse.

Aplicando-se o tecimento em forma de Elipse (condição (d)), mais uma vez observou-se não ter havido furo da raiz. Como exemplo, na Figura 5.83 pode ser observado uma das soldas com tal padrão de tecimento. Na Figura 5.85 é apresentado um conjunto dos oscilogramas de um trecho de uma das soldagens, a Figura 5.86 é seu respectivo ciclograma, a Figura 5.87 é o desenho da simulação vetorial da deflexão do arco elétrico, a Figura 5.88 é o oscilograma da soldagem durante o intervalo de 10 s e na Tabela 5.25 são apresentados os valores utilizados nos cálculos para a determinação do “ β ” correspondente.



(a) Vista superior do cordão e (b) detalhe ampliado

Figura 5.83: Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo. Padrão de tecimento em forma de Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Na Figura 5.84 são apresentadas macrografias do corte “C1” e “C4” deste cordão para se visualizar a evolução da penetração até a última seção (posição “C4”).

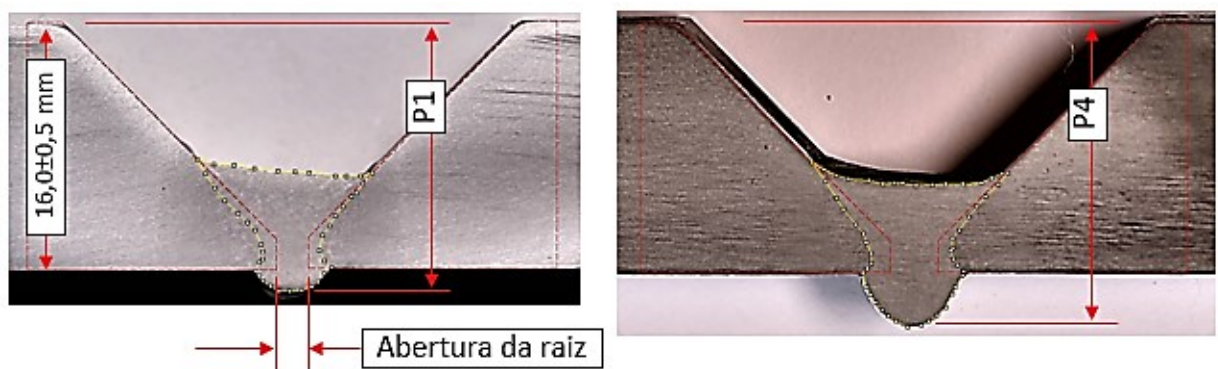
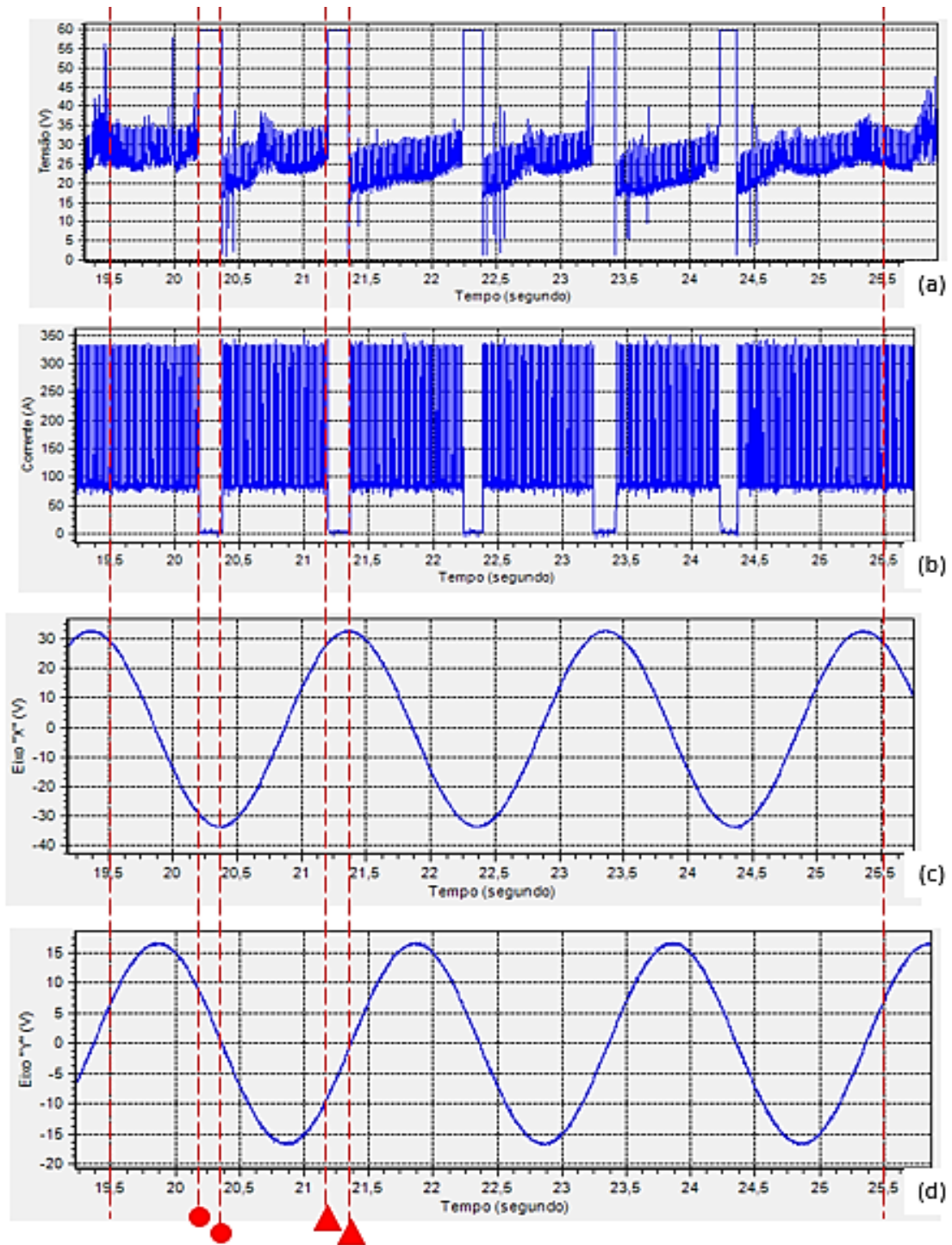


Figura 5.84: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Na Tabela 5.24 são apresentadas as médias e desvios padrões das respectivas medições de penetrações e áreas de metal de solda.

Tabela 5.24: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Elipse

	Elipse	
	Penetração	Área
Corte 1 - P1	16,9	44,31
Corte 2 - P2	17,7	47,46
Corte 3 - P3	18,4	52,07
Corte 4 - P4	19,0	56,46
Média	18,0	50,1
Desvio Padrão	0,9	5,3



(a) Oscilograma da tensão elétrica, (b) oscilograma da corrente elétrica, (c) característica da onda atuante na deflexão do arco no sentido do eixo "X" (transversal) e (d) característica da onda atuante no eixo "Y" longitudinal. Todos em função do tempo de soldagem

Figura 5.85: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

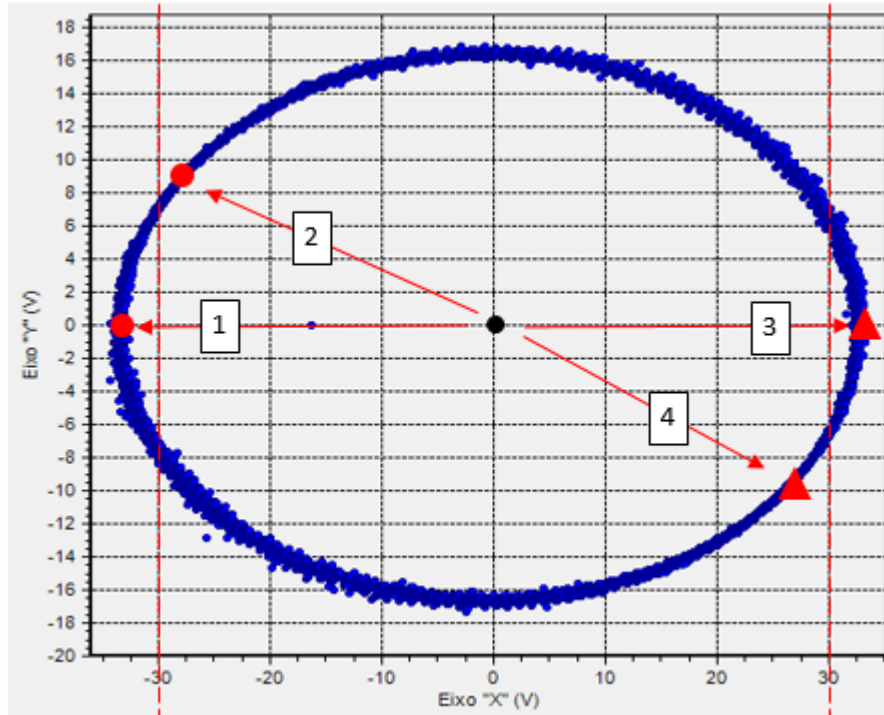


Figura 5.86: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.85

A Figura 5.87 é o desenho da simulação vetorial da deflexão do arco elétrico para o padrão de tecimento em forma de Elipse.

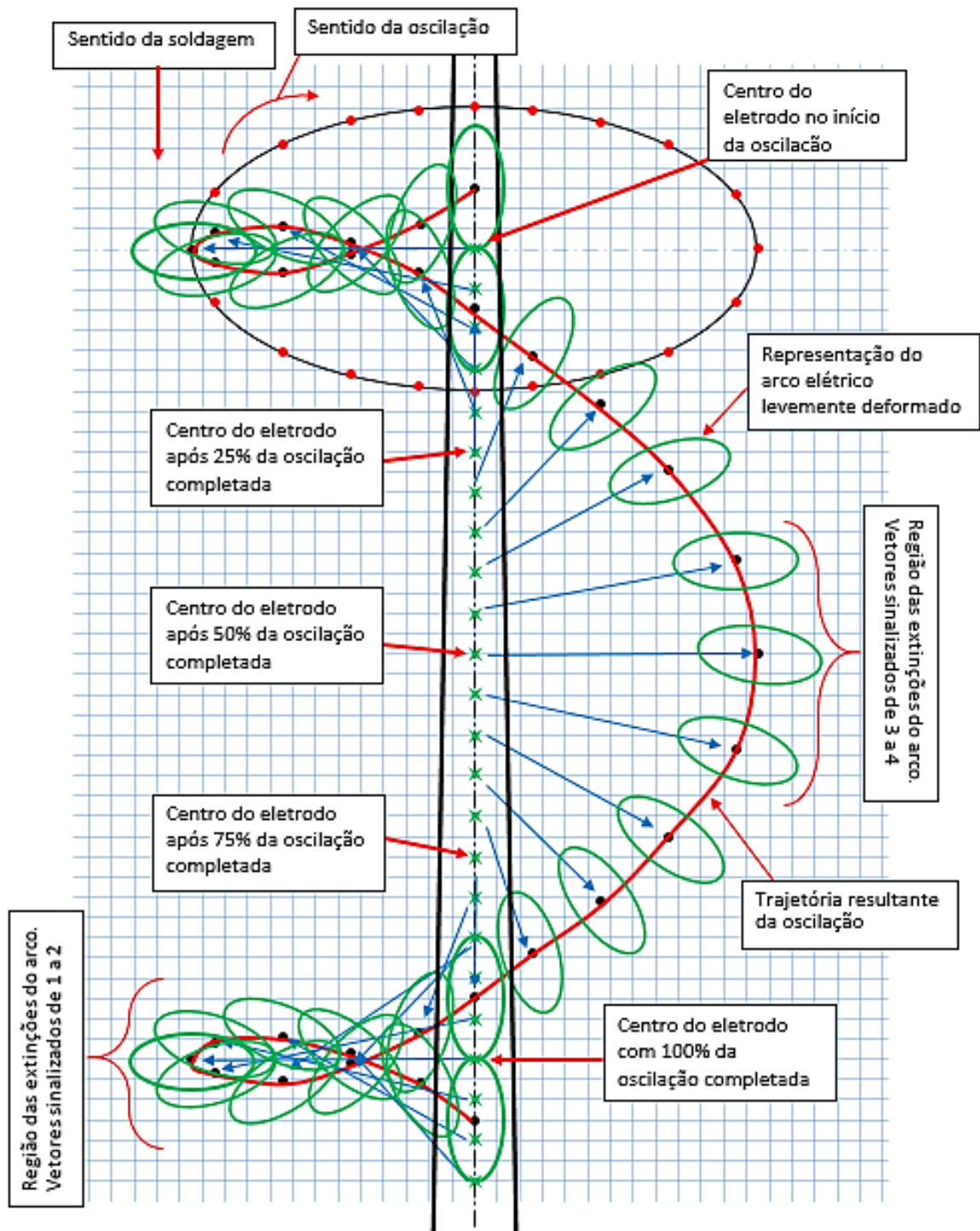


Figura 5.87: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento em forma de Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

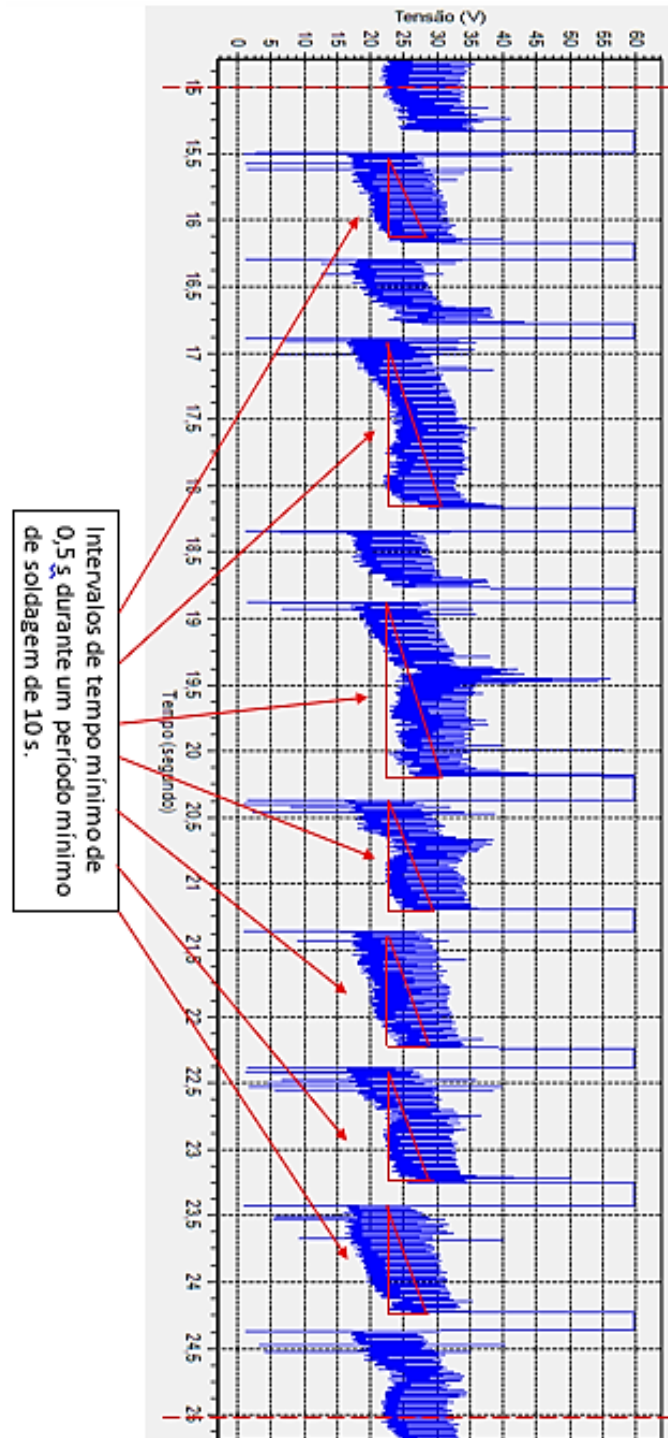


Figura 5.88: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação em forma de Elipse, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s

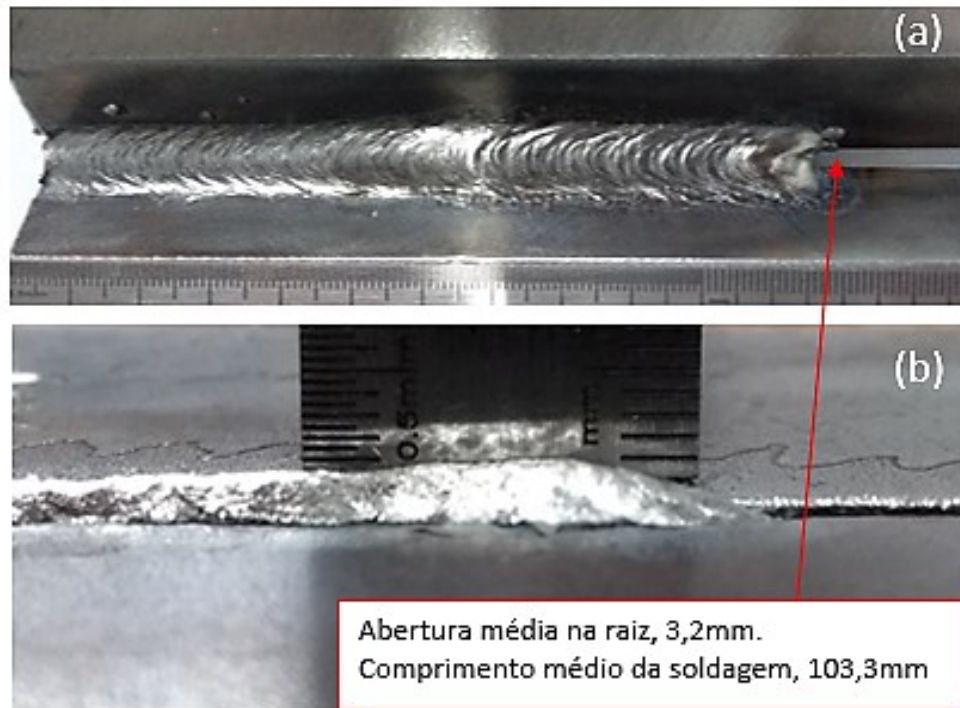
Tabela 5.25: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.88

	ELIPSE								$\beta = \Delta U / \Delta t$ [V/s]
	Umin [V]	Umáx [V]	ΔU [V]	t inic [s]	t fim [s]	Intervalos de arcos extintos [s]	Intervalos soldando [s]		
1	22	27	5	15,303	15,49	0,187	0,635	↓	
2	23	28	5	16,125	16,295	0,17	0,467		
3	23	30	7	16,762	16,89	0,128	1,262		
4	22	26	4	18,152	18,344	0,192	0,39		
5	23	30	7	18,734	18,878	0,144	1,279		
6	22	29	7	20,157	20,364	0,207	0,801		
7	23	28	5	21,165	21,351	0,186	0,867		
8	22	29	7	22,218	22,386	0,168	0,838		
9	22	28	6	23,224	23,419	0,195	0,787		
10				24,206					
média	→		5,89	→			0,92	6,4	
Desv Pad	→		1,17	→			0,25		
Total de tempo de arco extinto	→					1,577		Extinções [%]	
Total de tempo de arco soldando	→					10		15,77	

Importante lembrar que, os cálculos são realizados com os intervalos maiores ou iguais a 0,5 s, portanto as interrupções de número 2 e 4 da Tabela 5.25 não foram consideradas.

5.5.3.5. Soldagem em corpos de prova chanfrados - Com aplicação de oscilação magnética em forma de “Deslocamento Lateral”.

Aplicando-se o tecimentos em forma de “Deslocamento Lateral” (condição (g)), mais uma vez foi observado não ter havido sinais de furo da raiz em consequência das instabilidades e posteriores interrupções no processo. Na Figura 5.89 pode ser observado uma das soldagens com este padrão de tecimento.



(a) Vista superior do cordão e (b) vista da face oposta das peças

Figura 5.89: Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo. Padrão de tecimento “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

Na Figura 5.90 são apresentadas macrografias do corte “C1” e “C4” deste cordão para se visualizar a evolução da penetração até a última seção (posição “C4”).

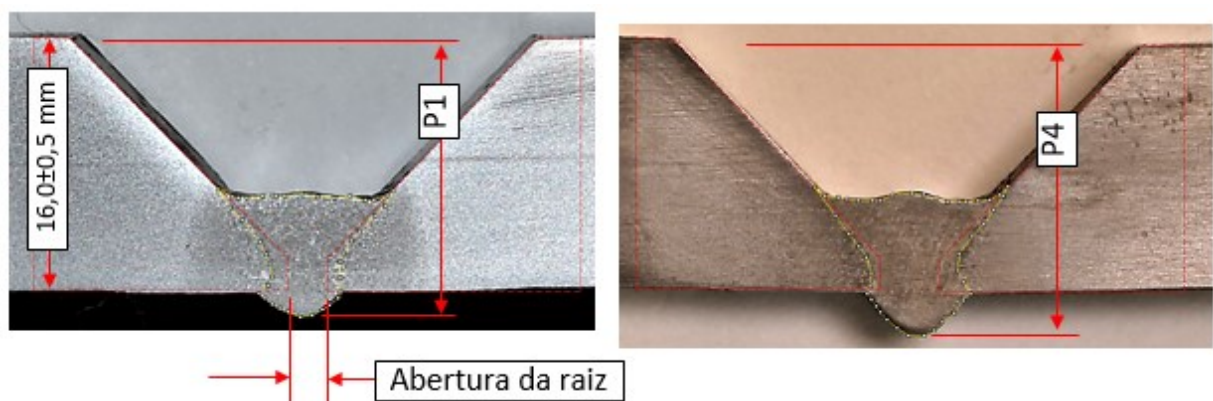


Figura 5.90: Macrografias dos cortes C1 e C4 de uma soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação do arco “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

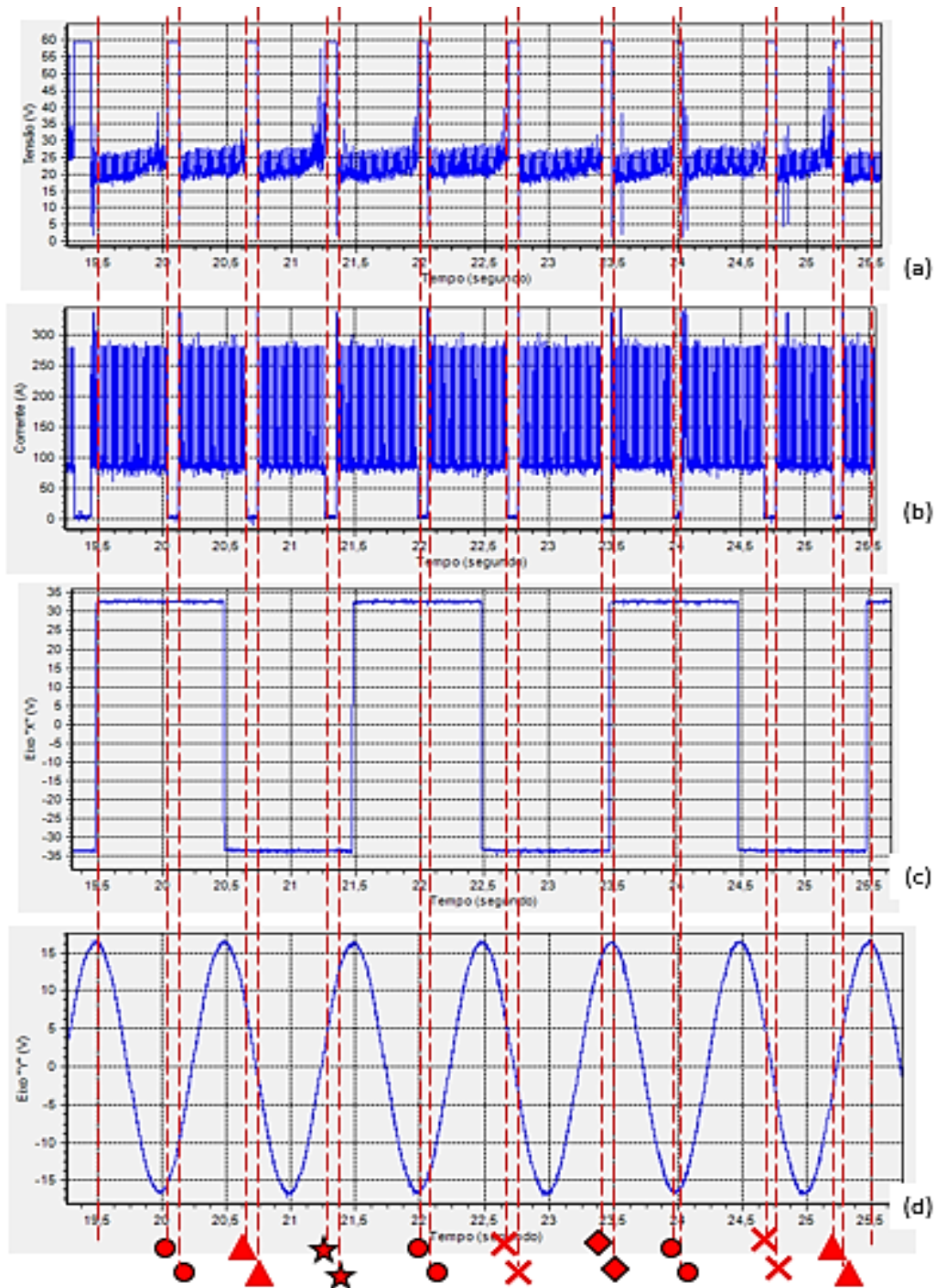
Na Tabela 5.26 são apresentadas as médias e desvios padrões das respectivas medições de penetrações e áreas de metal de solda.

Tabela 5.26: Resultado das medições de penetrações e áreas de metal de solda. Soldagem em chanfro de $45\pm 1^\circ$ com afastamento progressivo, oscilação Deslocamento Lateral

	Deslocamento Lateral	
	Penetração	Área
Corte 1 - P1	17,0	41,74
Corte 2 - P2	17,7	52,66
Corte 3 - P3	18,5	54,41
Corte 4 - P4	18,5	57,34
Média	17,9	51,5
Desvio Padrão	0,7	6,8

Na Figura 5.91 é apresentado o conjunto de oscilogramas de um trecho de um dos cordões. Este padrão de tecimento possui a característica de manter o arco em seu máximo alongamento quase que a totalidade do tempo da deflexão. Com a frequência regulada em 0,5 Hz, ou seja, um ciclo demora dois segundos para ser completado, o arco praticamente permanece um segundo sobre cada lateral do chanfro. Contudo, a inércia de movimentação da massa fundida não responde imediatamente ao pulso magnético que desloca o arco, por isso, o tempo consumido para o reposicionamento lateral (de uma parede para a outra) do arco é quase que instantâneo, porém, o comportamento da poça dentro do chanfro não e nesta etapa do estudo, tal efeito não foi mensurado. Por este motivo, o intervalo de tempo dos oscilogramas apresentados na Figura 5.91 foi todo sinalizado para que, no ciclograma apresentado na Figura 5.92, pudessem ser visualizadas as regiões onde ocorreram os curtos circuitos e/ou extinções do arco (indicadores numerados de 1 até 8).

A Figura 5.93 é o desenho da simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento. A Figura 5.94 é o oscilograma da soldagem durante o intervalo de 10 s e na Tabela 5.27 são apresentados os valores utilizados nos cálculos para a determinação do “ β ” correspondente.



(a) Oscilograma da tensão elétrica, (b) oscilograma da corrente elétrica, (c) característica da onda atuante na deflexão do arco no sentido do eixo “X” (transversal) e (d) característica da onda atuante no eixo “Y” longitudinal. Todos em função do tempo de soldagem

Figura 5.91: Oscilogramas de um trecho de uma das soldagens com oscilação do tipo

“Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT

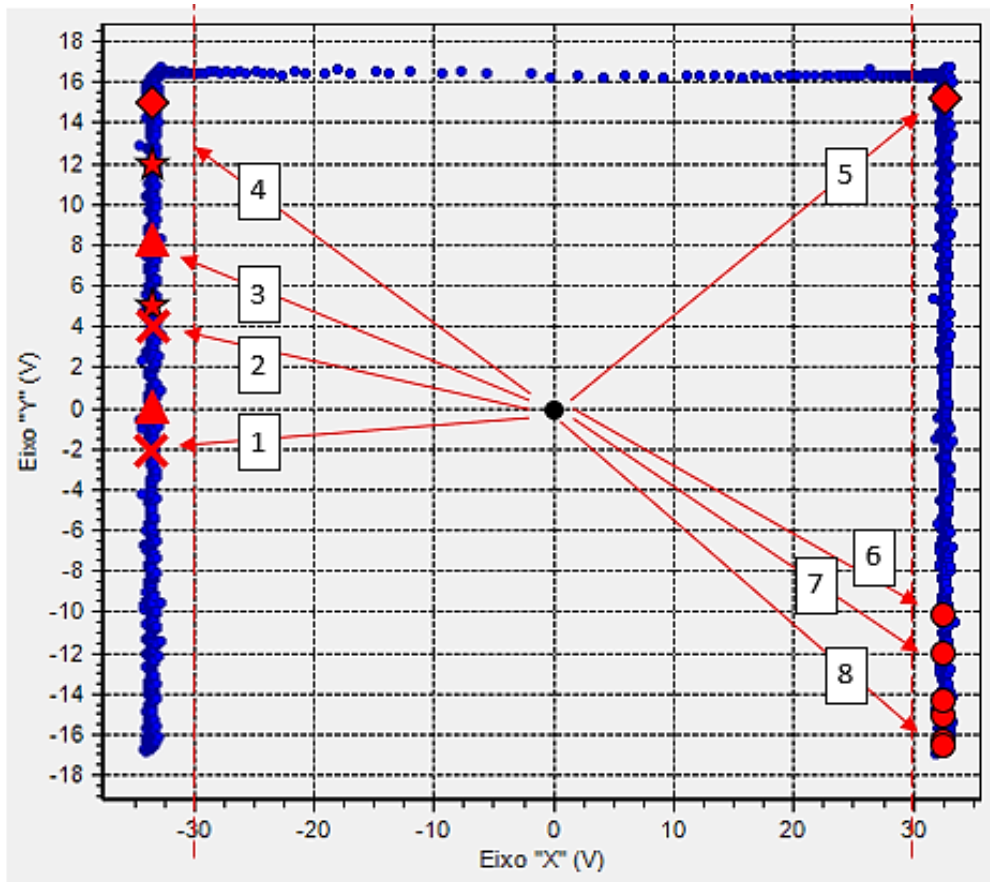


Figura 5.92: Ciclograma correspondente às ocorrências identificadas nos oscilogramas da Figura 5.91

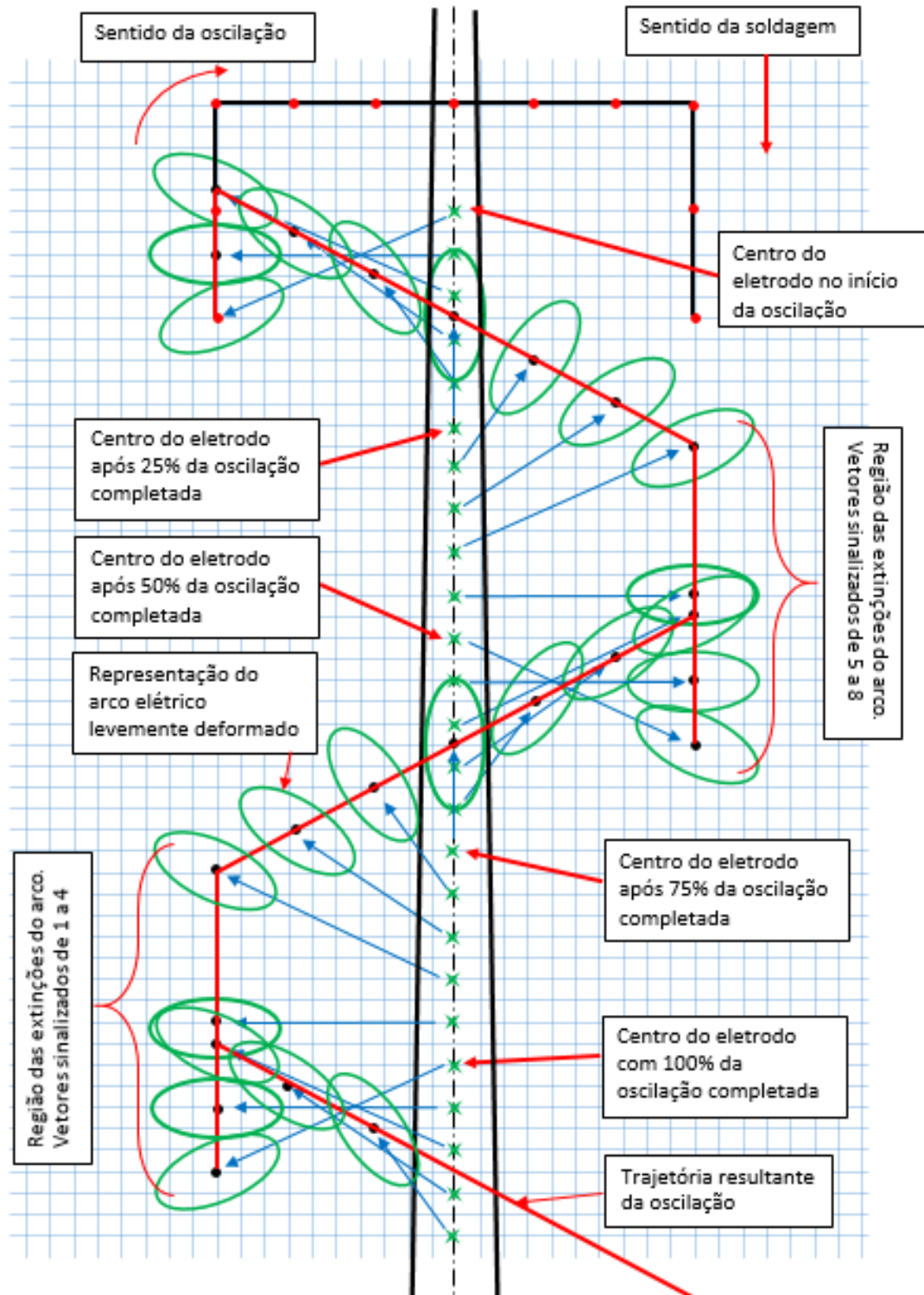


Figura 5.93: Desenho de uma simulação vetorial da deflexão do arco elétrico em função do padrão de tecimento em forma de "Deslocamento Lateral", $B_x=11,6 \text{ mT}$ e $B_y=6,8 \text{ mT}$

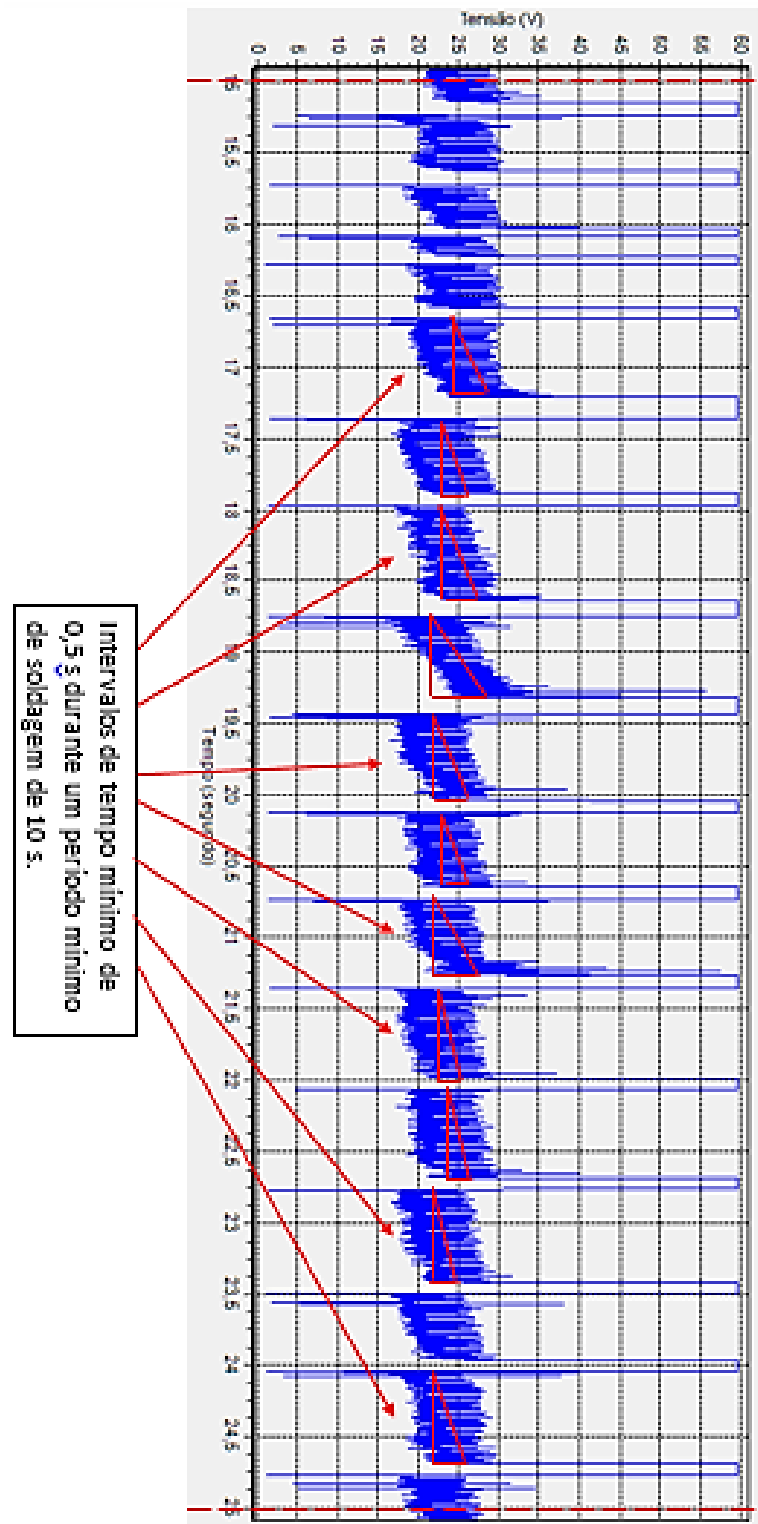


Figura 5.94: Oscilograma da tensão de um dos testes de soldagem em chanfro para o passe de raiz com abertura progressiva. Oscilação padrão em forma de “Deslocamento Lateral”, $B_x=11,6$ mT e $B_y=6,8$ mT e intervalo de soldagem de 10 s

Tabela 5.27: Determinação do “ β ” para os valores extraídos do oscilograma da tensão da Figura 5.94

	Deslocamento Lateral								$\beta = \Delta U / \Delta t$ [V/s]
	U _{min} [V]	U _{máx} [V]	ΔU [V]	t _{inic} [s]	t _{fim} [s]	Intervalos de arcos extintos	Intervalos soldando		
1	25	26	1	15,103	15,237	0,134	0,373		
2	23	25	2	15,61	15,721	0,111	0,279		
3	23	25	2	16	16,089	0,089	0,11		
4	24	26	2	16,199	16,28	0,081	0,283		
5	24	25	1	16,563	16,662	0,099	0,528		
6	24	26	2	17,19	17,366	0,176	0,502		
7	22	25	3	17,868	17,969	0,101	0,634		
8	22	25	3	18,603	18,751	0,148	0,528		
9	22	28	6	19,279	19,438	0,159	0,574		
10	22	24	2	20,012	20,126	0,114	0,506		
11	22	25	3	20,632	20,733	0,101	0,513		
12	22	26	4	21,246	21,352	0,106	0,622		
13	22	25	3	21,974	22,06	0,086	0,612		
14	22	25	3	22,672	22,768	0,096	0,609		
15	22	25	3	23,377	23,485	0,108	0,5		
16	22	25	3	23,985	24,041	0,056	0,613		
17	22	24	2	24,654					
média			2,65				0,56	4,7	
Desv Pad			1,17				0,05		
Total de tempo de arco extinto						1,765		Extinções [%]	
Total de tempo de soldagem						10		17,65	

Importante lembrar que, os cálculos são realizados com os intervalos maiores ou iguais a 0,5 s, portanto as interrupções de número 1, 2, 3 e 4 da Tabela 5.27 não foram consideradas.

No Gráfico 5.7 que basicamente é uma reprodução do Gráfico 5.6, pode-se observar os “ β ” de cada padrão de oscilação que foi ensaiado neste subgrupo de testes para os campos magnéticos atuantes no sentido transversal de soldagem.

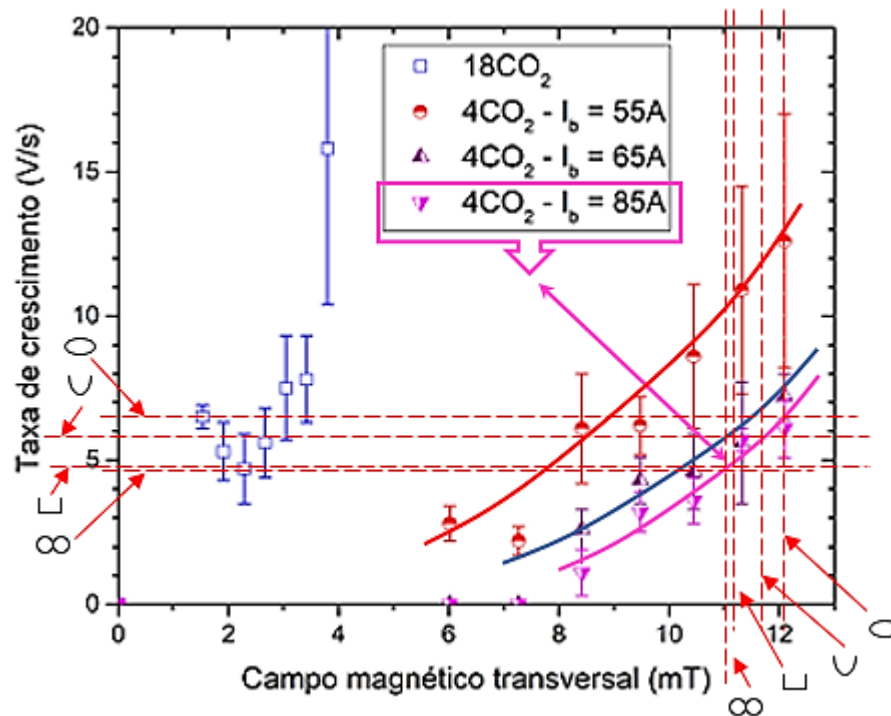


Gráfico 5.7: Gráfico resumo dos “ β ” para tecimento em forma de Lemniscata, “Meia Lua”, Elipse e “Deslocamento Lateral”

Pode-se observar que, para o “ β ” Lemniscata de 4,6 V/s, o campo magnético atuante corresponde a $B \sim 11,1$ mT. Estes números apontam um erro de aproximadamente 4,3% entre o valor obtido na prática e o calculado por meio da equação 5.4, a qual resultou em $B \sim 11,6$ mT.

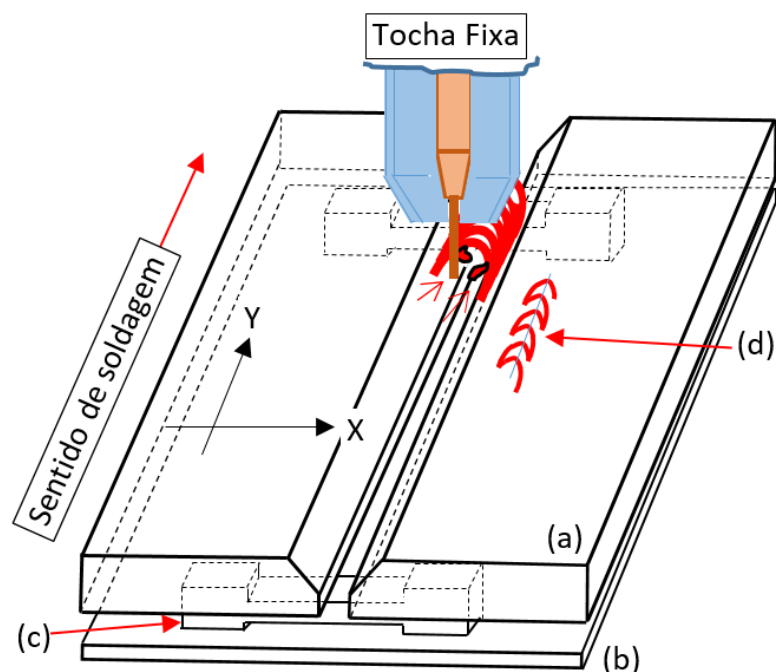
Com o “ β ” “Meia Lua” de 5,8 V/s, o campo magnético atuante corresponde a $B \sim 11,6$ mT. Estes números apontam um erro de aproximadamente “zero por cento” entre o valor obtido na prática e o calculado por meio da equação 5.4.

Para o “ β ” Elipse de 6,4 V/s, o campo magnético atuante corresponde a $B \sim 12,1$ mT. Estes números apontam um erro de aproximadamente 4,3% entre o valor obtido na prática e o calculado por meio da equação 5.4.

E com o “ β ” “Deslocamento Lateral” de 4,7 V/s, o campo magnético atuante corresponde a $B \sim 11,2$ mT. Estes números apontam um erro de aproximadamente 3,4% entre o valor obtido na prática e o calculado por meio da equação 5.4.

Conforme foi observado, a interrupção da soldagem ocorreu não apenas devido às extinções do arco (principalmente em função do aumento do seu comprimento “*La*”), eventos de curtos circuitos e/ou furo da raiz, com isso, estes fatos levaram a mais algumas considerações, são elas:

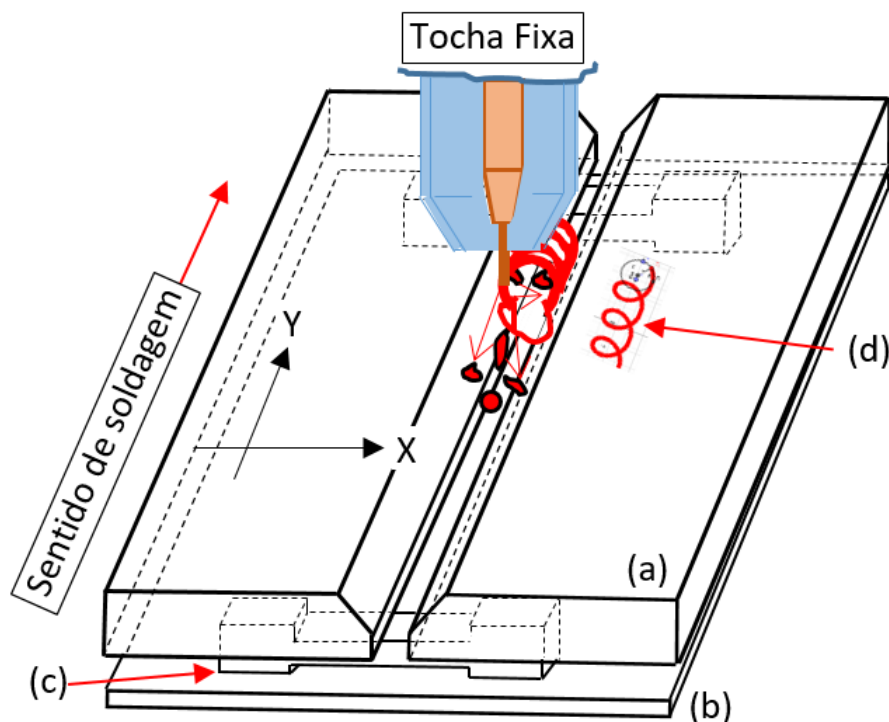
- Quando um pulso, de pico ou de base, ocorre na fresta ou muito próximo dela, por vezes isso pode provocar a extinção prematura do arco por não haver uma ponte de condução de energia entre a peça e a extremidade do eletrodo. Então, o arame passa através das peças e não encontra onde tocar para que o processo possa se reestabelecer. Verdadeiramente, isso pode acontecer com qualquer padrão de tecimento, mas, algumas Figuras de Lissajous favorecem a deflexão do arco preferencialmente para trás referente ao sentido de soldagem e isso oferece melhores condições para que o arco seja mantido “estável” ou se reestabeleça, pois, fica quase todo o tempo da soldagem sobre uma porção metálica. A Figura 5.95 é um desenho que exemplifica a montagem dos corpos de prova mas também é uma ilustração de um ensaio de soldagem aplicando-se o padrão de tecimento em forma de “Meia Lua”. Nota-se que, periodicamente, o arco é defletido para trás do sentido do cordão, então, supostamente se mantém uma ponte de condução de energia, com isso, gotas de metal de adição podem ser lançadas nesta direção para se manter a formação da poça.



(a) São os corpos de prova, (b) base de apoio, (c) calços de trava/distanciadores e (d) padrão de oscilação

Figura 5.95: Desenho da montagem dos corpos de prova simulando as soldagens realizadas com oscilação do arco em forma de “Meia Lua” para trás

- Uma vez adotado determinado padrão de tecimento e relação de amplitudes, torna-se necessário adequar seus valores em ambas as direções, ou seja, no sentido longitudinal para favorecer a deposição de material de adição ao entorno da poça e não através da fresta e no sentido transversal, para favorecer a solidificação do metal de solda nas paredes do chanfro com a intenção de dificultar o seu acúmulo no fundo do chanfro.
- Exceto em condições específicas e/ou testes prévios que confirmem que um determinado padrão de tecimento seja adequado, padrões que tendem a jogar as gotas metálicas para frente do sentido de soldagem podem não funcionar muito bem. Como exemplo, a Figura 5.96 é o desenho da montagem dos corpos de prova e ilustração de um ensaio de soldagem aplicando-se um padrão circular de tecimento. Nota-se que, periodicamente o arco é defletido tanto para trás como para a frente do sentido do cordão e gotas de metal de adição são lançadas através da fresta existente entre as peças. Outro resultado indesejado causado por este tipo de tecimento é o surgimento de um princípio de fusão à frente da soldagem o qual aumenta o tamanho da fresta antes da poça e colabora para fusão exagerada da raiz.



(a) São os corpos de prova, (b) base de apoio, (c) calços de trava/distanciadores e (d) padrão de oscilação

Figura 5.96: Montagem dos corpos de prova simulando os ensaios de soldagem aplicando-se oscilação com padrão circular de tecimento

Estas observações podem ser visualizadas na Figura 5.97. Nesta figura é apresentada a imagem da superfície de uma das chapas metálicas que serviram de base de apoio para corpos de prova durante as soldagens. Esta imagem exemplifica o que foi relatado quanto ao lançamento de gotas através da fresta dos corpos de prova.



Figura 5.97: Gotas de metal de adição que foram lançadas através da fresta de corpos de prova

De forma oposta, na Figura 5.98 é apresentada a imagem de uma das bases de apoio que exemplifica o que foi relatado quanto ao lançamento de gotas para trás ao sentido de soldagem, ou seja, sobre a poça de fusão.

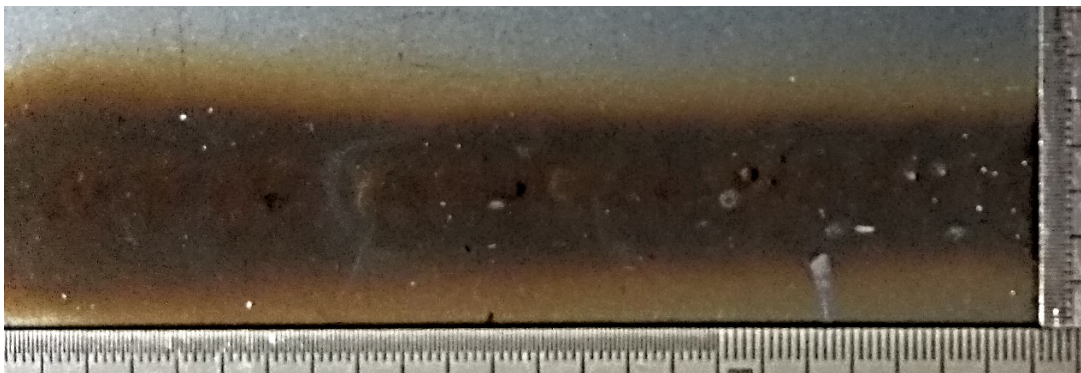






Figura 5.98: Base de apoio para as soldagens com oscilação para trás do sentido da soldagem

Outros Resultados e Discussões quanto ao terceiro subgrupo de testes são apresentados a seguir.

Na Tabela 5.28 notam-se os valores dos comprimentos médios dos cordão e médias dos preenchimentos de abertura da raiz que foram alcançados.

Tabela 5.28: Resultados e médias dos comprimentos de cordões e preenchimento de abertura da raiz alcançados no terceiro subgrupo de testes

	Condição (e)			Condição (g)			Condição (d)			Condição (c)			Sem oscilação		
	“X”	“Y”		“X”	“Y”		“X”	“Y”		“X”	“Y”				
Tipo de onda	Seno			Quadr.			Seno			Seno					
Amplitude (mT)	11,6			11,6			11,6			11,6					
Comprimento dos cordões (mm)	194	92	155	82	118	110	82	98	98	83	72	117	50	47	37
Média dos comprimentos dos cordões (mm)	147,0			103,3			92,7			90,7			44,7		
Desvio padrão do comprimento dos cordões	51,5			18,9			9,2			23,5			6,8		
Aberturas das raízes (mm)	4,5	3,0	3,8	2,8	3,5	3,3	2,7	3,0	3,0	2,8	2,7	3,1	2,4	2,4	2,4
Média das aberturas das raízes (mm)	3,8			3,2			2,9			2,9			2,4		
Desvio padrão das aberturas das raízes (mm)	0,8			0,4			0,2			0,2			0		
Figura de Lissajous	“Lemniscata” 			“Desloc. lateral” 			“Elipse” 			“Meia-Lua” 					
Obs.: “X” – Oscilação transversal, “Y” – Oscilação longitudinal															

Nos Gráfico 5.8 e Gráfico 5.9 são apresentados os resultados médios das soldagens quanto à maior abertura da raiz que foi alcançada e qual foi o maior comprimento de cordão de solda conseguido conforme os padrões de tecimento aplicados nas condições deste estudo.

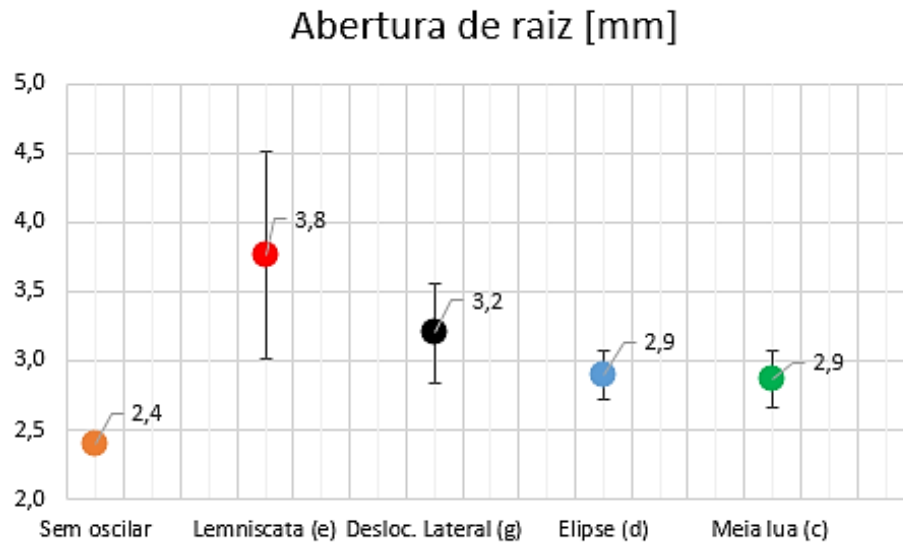


Gráfico 5.8: Abertura da raiz em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão

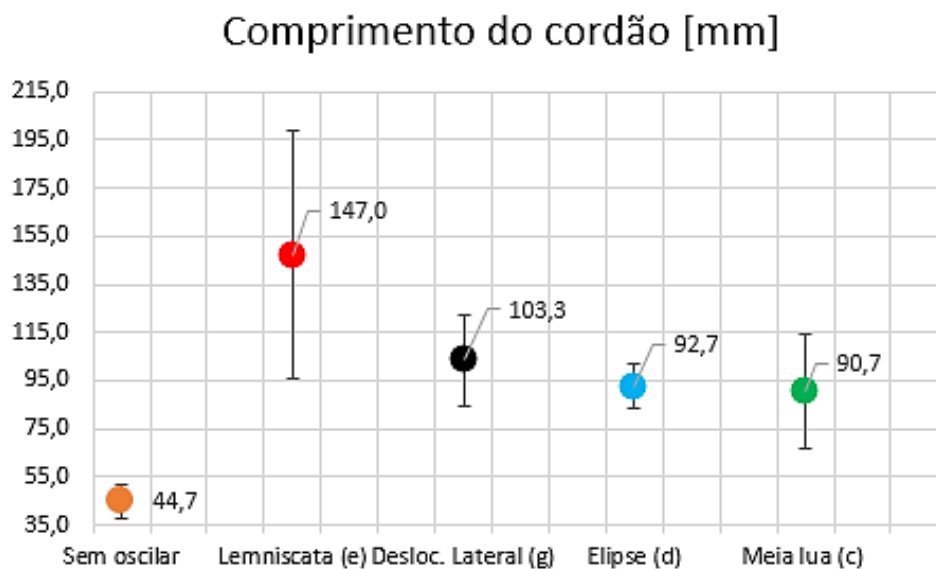


Gráfico 5.9: Comprimento do cordão em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão

No Gráfico 5.10, que correspondente às médias das áreas do metal de solda, é possível notar, considerando-se seus respectivos valores médio, que os tecimentos que produziram as maiores áreas também apresentaram a mesma tendência quanto a atingirem grandes comprimentos de solda e abertura da raiz. Contudo, grandes áreas também representam maior acúmulo de metal de solda e isso pode ser observado no cordão que foi feito sem oscilação

magnética atuante no processo. Em contrapartida, conforme a oscilação magnética atuou no processo seguindo diferentes Figuras de Lissajous, a deposição de metal de adição, distribuição de calor e movimentação da poça de fusão, nas condições deste estudo, podem ter influenciado na morfologia do metal de solda. Este fato é baseado tomando-se como exemplo a Figura 5.74, Figura 5.81, Figura 5.87 e Figura 5.93 (simulações dos movimentos de tecimento seguindo suas respectivas Figuras de Lissajous). Nestas figuras observa-se que as trajetórias percorridas pelo arco, além de promover a distribuição de metal de adição na região do cordão e em particular, nas laterais do chanfro, também passam maior ou menor número de vezes pelo mesmo local. Isso contribui com a tendência de acumular maior ou menor quantidade de metal de solda no fundo do chanfro formando assim, poças de fusão mais volumosas e conseqüentemente com maiores áreas.

Outro fator relevante a ser considerado refere-se às médias e desvios padrões das áreas apontarem poucas variações entre seus valores. Isso pode indicar que o processo decorreu de forma a depositar, praticamente, a mesma quantidade de metal de adição em todos os testes independentemente do padrão de oscilação aplicado. A variação que foi encontrada pode significar maior ou menor distribuição de metal de solda na região do cordão.

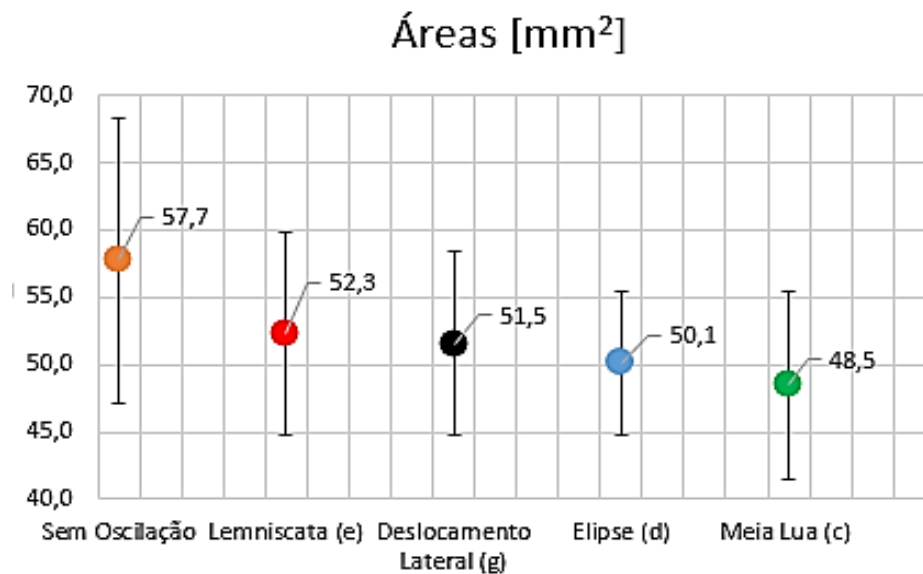


Gráfico 5.10: Área do metal de solda em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão

Com o Gráfico 5.11, que correspondente às médias das penetrações do metal de solda, é possível observar que:

- Considerando-se apenas os valores médios das soldagens onde aplicou-se oscilação magnética, o padrão de tecimento em forma de Lemniscata, nas condições deste estudo, produziu as maiores penetrações da raiz em comparação com os outros padrões. Isso corrobora com o argumento de que, uma maior área de metal de solda pode produzir a maior penetração da raiz.
- Contudo, os tecimentos “Deslocamento Lateral”, Elipse e “Meia Lua” apresentaram suas respectivas penetrações na ordem inversa.

Tomando-se como exemplo o tecimento “Deslocamento Lateral”, este produziu maior área de metal de solda, porém, menor penetração do que o tecimento “Meia Lua”. Esta razão pode ser explicada devido ao fato da oscilação “Deslocamento Lateral” manter o arco quase que todo o seu ciclo direcionado para as laterais do chanfro enquanto que, o “Meia lua”, percorre sua trajetória de forma mais concentrada na região da poça de fusão. Esta característica pode ser observada comparando-se o ciclograma da Figura 5.92 (ciclograma “Deslocamento Lateral”) com o da Figura 5.80 (ciclograma “Meia Lua”).

- Embora não tenha sido mensurado, ao se empregar na soldagem o tecimento seguindo a Figura de Lissajous Elipse, certa quantidade de metal de adição foi lançada através da abertura da raiz, ver Figura 5.97. Isso contribuiu para que, tanto a área quanto a penetração deste cordão também não tenham alcançado valores mais próximos ao do tecimento em forma de Lemniscata.

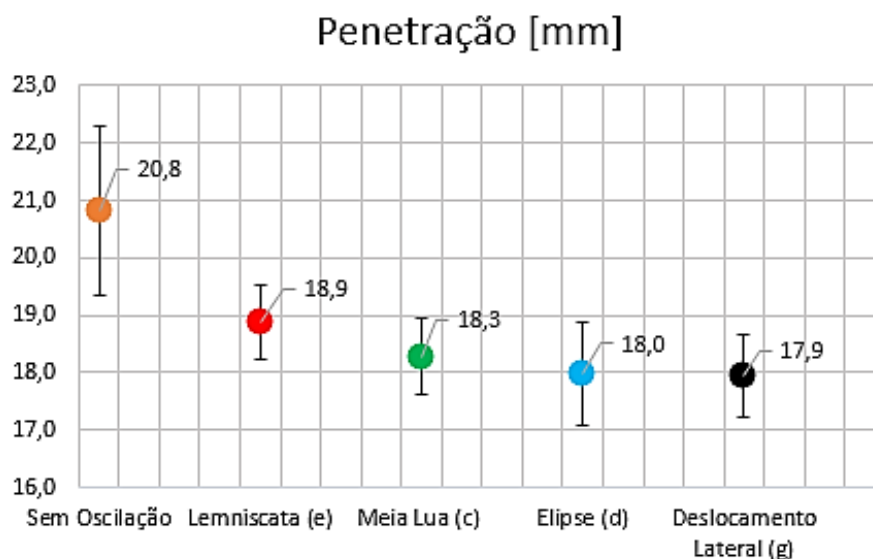


Gráfico 5.11: Penetração do metal de solda em função do padrão de tecimento. Obs.: meia barra de erro corresponde a um desvio padrão

O fato da oscilação magnética controlada atuar no processo e ser capaz de promover a deflexão do arco seguido Figuras de Lissajous, indica que o perímetro do percurso de oscilação pode estar relacionado com as razões para se conseguir adequada deposição de metal de adição, distribuição de calor e movimentação da poça de fusão.

Observou-se também que, maiores perímetros percorridos pelo arco tendem a gerar maior área de metal de solda, maior distribuição de calor e maior quantidade de metal de adição depositado na região do cordão. Contudo, isso não significa alcançar maior penetração ou melhores condições para se formar um cordão, mesmo porque, parte do metal de adição pode não ser lançado para a poça de fusão, mas sim para as paredes do chanfro ou para fora da poça através da abertura da raiz, ver Figura 5.83(a) e (b), Figura 5.70(c) e Figura 5.97.

Uma forma de se conseguir demonstrar tal observação foi elaborar uma correlação adimensional entre o formato da Figura de Lissajous e seu perímetro ao longo de um ciclo completo admitindo-se que as amplitudes das oscilações são correspondentes a iguais valores que, proporcionalmente, formam as respectivas figuras. Na Figura 5.99 são apresentados os desenhos das Figura de Lissajous que se fez corresponder a tal correlação. Por meio do *software Image J* foram obtidos os valores adimensionais que se utilizou como forma de determinação do perímetro para cada padrão de tecimento. No Gráfico 5.12 são apresentados os valores adimensionais proporcionais aos padrões de tecimento.

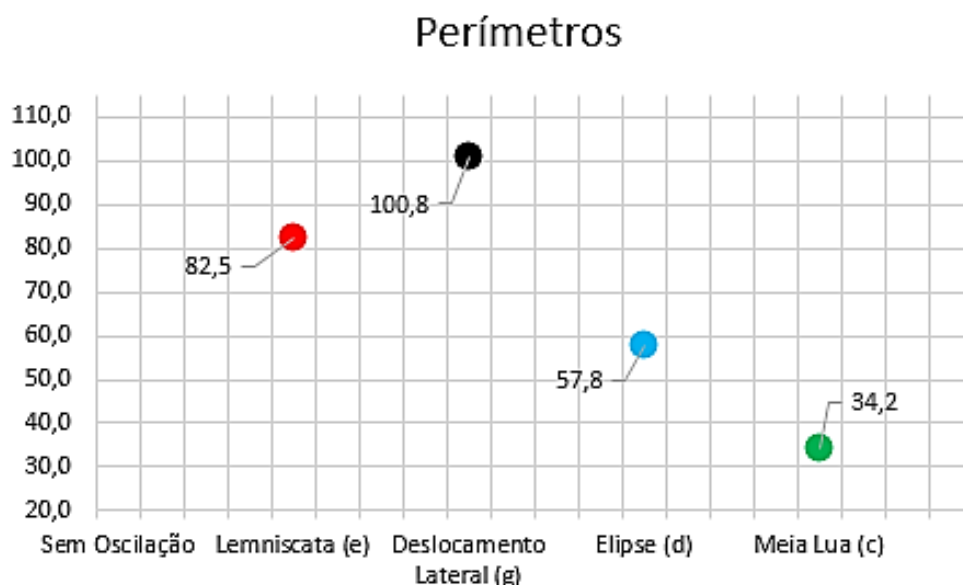


Gráfico 5.12: Perímetros adimensionais proporcionais, em função do padrão de tecimento

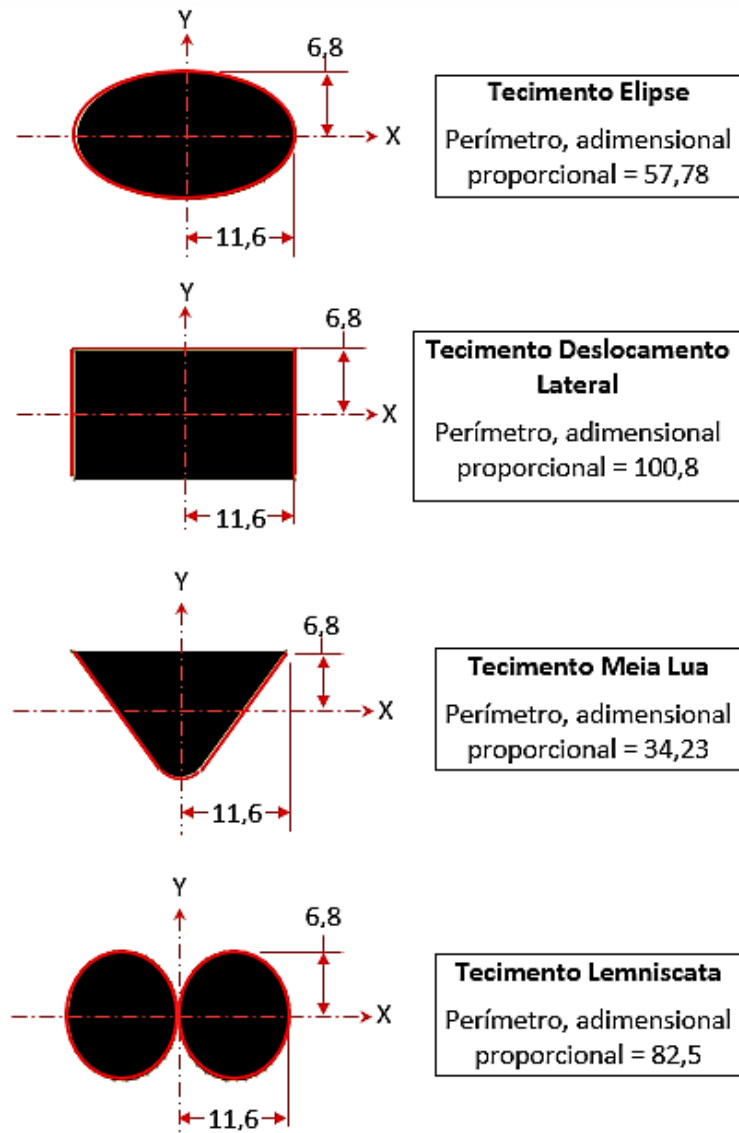


Figura 5.99: Determinação dos Perímetros adimensionais proporcionais, em função do padrão de tecimento

6. Conclusões

O presente trabalho descreveu sobre a aplicação da oscilação magnética controlada do arco elétrico na soldagem GMAW no modo pulsado, tanto na direção transversal como longitudinal ao eixo da solda, seguindo Figuras de Lissajous como forma de tecimento.

Nos resultados deste estudo, o campo magnético gerado por meio do sistema de oscilação magnética controlada, foi capaz de influenciar, tanto o arco como a massa fundida, a ponto de ser possível visualizar os desvios promovidos ao longo dos cordões de solda. Tais desvios ocorreram em função de padrões de deflexão do arco, suas frequências e amplitudes principalmente nos testes sobre chapa na posição plana onde foram evidenciados os efeitos referentes ao controle da movimentação do arco e deposição localizada de metal de adição no processo GMAW pulsado e, no GTAW autógeno foi possível movimentar a poça de fusão.

Nas soldagens GMAW, o efeito da oscilação magnética do arco foi mais evidente em testes com transferência pulsada do que com transferência por curto circuito. Essa diferença foi associada principalmente ao maior comprimento médio do arco na operação com corrente pulsada. Também, tratando-se especificamente do GMAW com transferência por curto circuito, esta acontece por tensão superficial e isso gera maior dificuldade de movimentação da poça porque o metal de adição é conduzido da ponta do eletrodo até a poça de fusão e não lançado em forma de gotas em voo livre como acontece na corrente pulsada.

Neste trabalho, foi observado que o fluxo magnético externo, atuando continuamente durante as soldagens, promoveu a deflexão controlada do arco para fora do seu eixo de simetria axial (similar a um sopro lateral) e por vezes, tal deslocamento quando intenso o suficiente, contribuiu com a extinção do arco.

No processo GMAW pulsado a instabilidade foi causada, principalmente pela extinção do arco que tendeu a ocorrer, preferencialmente, quando a sua deflexão causada pelo campo magnético foi máxima, pelo aumento do teor de CO_2 no gás de proteção, pelo aumento da indução magnética aplicada para oscilação do arco e por menores valores da corrente de base. Essa deflexão resultou em um grande aumento do comprimento efetivo de arco aumentando a sua tensão de operação, perda de energia do arco para o meio ambiente e favoreceu o seu apagamento. Analisando-se apenas as soldagens que utilizaram o gás de proteção Ar-4% CO_2 , conseguiu-se maior estabilidade no processo quando, basicamente foram aumentados os valores dos parâmetros de base (corrente de base com 85 A proporcionou um processo mais estável do que quando aplicado corrente com 55 A ou 65 A). Atentar para o fato de que, se a

deflexão está em uma posição de amplitude reduzida e/ou o arco é defletido com pequena amplitude o processo mantém-se estável.

Para uma dada intensidade de campo magnético, nos testes de soldagem GMAW pulsada, a deflexão do arco foi limitada pela frequência de oscilação. Esta afirmativa é baseada nos testes exploratórios onde aplicou-se a movimentação imediata no descolamento do arco (acionamento eletrônico para uma posição de oscilação lateralmente oposta) e ocorreu uma certa demora para que o resultado de tal deslocamento acontecesse (aproximadamente 1,8 s, lembrando que a literatura recomenda oscilação magnética controlada limitada a trabalhar com frequências até 60 Hz).

No chanfro, os cordões que foram realizados no terceiro subgrupo de testes se mostraram promissores ao unir juntas de topo com afastamento médio de 3,8 mm utilizando-se a oscilação “Lemniscata”. Por outro lado, as soldagens produzidas sem o recurso da oscilação magnética furaram a raiz alcançando abertura média de 2,4 mm.

As outras três formas de oscilação ensaiadas no terceiro subgrupo de testes, “Deslocamento Lateral”, “Elipse” e “Meia Lua”, as quais representam 60% das soldas executadas, não furaram a raiz, mas sim, o processo foi interrompido devido à extinção do arco que, por vezes, coincidiu com a fresta entre as peças permitindo que o arame passasse direto por esta abertura dificultando o restabelecimento do processo.

Esta tese, também apresentou que, aplicar a técnica de tecimento seguindo Figuras de Lissajous pode fazer o arco “retroceder” ao sentido da soldagem (dependendo da amplitude de oscilação aplicada no sentido longitudinal) como forma de fazê-lo permanecer, se não sobre a poça de fusão, ao menos próxima dela (região que possibilita interações elétricas) e isso mostrou-se potencialmente importante porque na eminência de uma extinção, o arco terá maiores chances de ser reestabelecido para que o arame eletrodo não passe através da fresta. Esta pode ser uma boa vantagem em comparação com os sistemas de que se tem notícia, pois, eles normalmente deslocam a tocha/arco para o lado enquanto a soldagem segue progressivamente adiante, movimentam-se para frente e para traz, mas, não simultaneamente para os lados ou, as figuras que se consegue produzir causam uma fusão prévia à frente do cordão com trajetórias elípticas ou circulares.

Este trabalho apresentou que a frequência de oscilação, forma de tecimento conforme Figuras de Lissajous, densidade de campo magnético (amplitude utilizada nos eixos “X” e “Y”), modo de transferência metálica, gás de proteção, característica do tecimento associados ao sentido de soldagem, ângulo do bisel, tipo de afastamento entre as faces da junta, velocidade

e parâmetros de soldagem, são os principais agentes influenciadores no processo e devem ser testados previamente à realização do cordão para a finalidade que se destinar.

A soldagem do passe de raiz, nas condições desta tese, apresentou bom potencial de utilização industrial e, conforme foi relatado, algumas variáveis necessitam ser controladas para que, em cada processo, sejam estabelecidos os parâmetros mais adequados e tipo de oscilação mais eficiente para serem aplicados.

A informação da taxa de crescimento da tensão " β " em função da densidade de campo magnético aplicado e frequência de extinção do arco apresentou-se como uma potencial ferramenta para se identificar padrões de variação no processo de soldagem. Também oferece potencial de ser incorporado a algum sistema de soldagem para que correções possam ser inferidas a tempo antes de ocorrências danosas ao processo. Lembrando que, para este estudo, foi utilizado uma fonte eletrônica regulada para trabalhar com imposição de corrente, portanto, esta sugestão deve ser testada em outros equipamentos e condições de soldagem antes de ser colocada em prática.

Até este trabalho, não foi encontrado referências sobre o cálculo de " β " utilizado em processos de soldagem. Com este cálculo foi possível apontar as soldagens com maior ou menor "estabilidade", pois quanto mais próximo de zero, o processo apresentou-se mais "estável" e quanto mais afastado de zero, apresentou-se menos "estável". Por exemplo, nas condições operacionais deste trabalho, o gás de proteção Ar-4%CO₂ ofereceu maior estabilidade para o processo do que o Ar-18%CO₂. Também a oscilação em forma de Lemniscata na soldagem em chanfro mostrou-se mais estável do que os demais tanto na determinação do " β " como na frequência de perturbações.

7. Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar soldagens GMAW no modo de transferência por curto circuito com menores teores de CO₂ e aplicação de oscilação magnética controlada seguindo Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento.

- Estudar padrões de tecimento mais eficientes conforme uma prática de soldagem no processo GMAW pulsado, seguindo Figuras de Lissajous. Por exemplo, juntas de topo sem chanfro ou em chapas finas.

- Estudar soldagens GMAW pulsado com misturas ternárias contendo Argônio, CO₂ e O₂ conforme Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento.

- Estudar soldagens GMAW pulsada em ligas de alumínio, cobre, aço inox seguindo Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento.

- Determinar a maior frequência de oscilação magnética controlada que pode ser aplicada em soldagens GMAW pulsada conforme Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento.

- Produzir um software e integrá-lo em um sistema de soldagem para que a taxa de crescimento da tensão em função da densidade de campo magnético aplicado " β ", ou frequência de extinção do arco possa ser aplicado como recurso sinérgico.

- Estudar soldagens GMAW no modo de transferência por spray conforme várias Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento

- Estudar a aplicação da oscilação magnética controlada, seguindo várias Figuras de Lissajous, em outros processos de soldagem, por exemplo, SAW e GTAW alimentado.

- Estudar os efeitos da aplicação da oscilação magnética controlada do arco seguindo Figuras de Lissajous como forma de tecimento para superar limitações na soldagem GMAW pulsada em alta velocidade.

- Estudar os efeitos da aplicação de padrões de oscilação magnética controlada do arco na soldagem GMAW pulsada, simulando diferentes tipos de acomodação de faces entre peças a serem soldadas.

- Desenvolvimento de um *software* que, com a informação da taxa de crescimento da tensão em função da densidade de campo magnético aplicado " β " e frequência de extinção do arco, seja possível identificar um determinado padrão de variação e uma vez incorporado a

algum sistema de soldagem, correções possam ser inferidas em tempo antes de ocorrências danosas ao processo.

- Estudar soldagens GMAW pulsada seguindo Figuras de Lissajous aplicadas como forma de tecimento para o passe de raiz em tubulações na posição 5G. Figura 7.1 é o projeto de um manipulador robótico que foi construído o qual pode servir para a aplicação nesta sugestão de estudo.

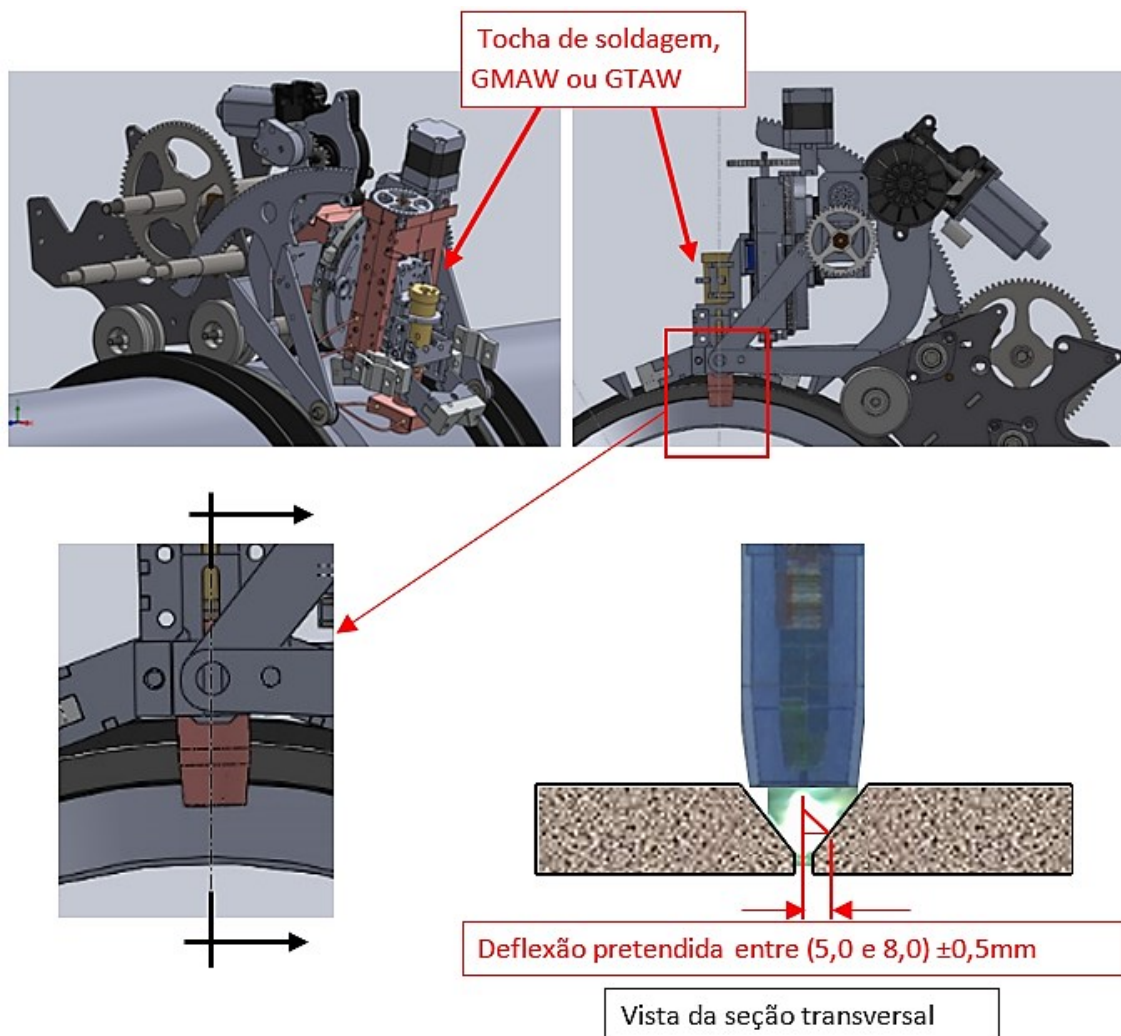


Figura 7.1: Proposta para aplicação do tecimento conforme Figuras de Lissajous para ser aplicado em soldagens de tubulação na posição 5G

8. Bibliografia

1. BENARDOS, N. D., OLSZEWSKI, S., Process of and Apparatus for Working Metals by the Direct Application of the Electric Current, 363.320, 17 Maio 1887
2. MUSTAFIN, F. M., et al., Soldagem de tubulações. Moscou, Nedra, 2002, pag. 65, 343 páginas. Editora Mockba – Escola Superior
3. AKULOV, A. I., et al., Tecnologia de soldagem por fusão elétrica, Moscou, Mashinostroenie, 1977, pag. 21, 426 páginas. Editora Mockba - Escola Superior
4. POLUXIN, P. I., et al., Tecnologia dos materiais e soldagem. Moscou, 1977, pag. 312, 464 páginas. Editora Mockba – Escola Superior
5. FONSECA, C. S., PINHEIRO I. P., SILVA S. N., Influência do aporte térmico sobre a morfologia da austenita e na quantidade das fases em chapas soldadas de aço inoxidável duplex SAF2205. ISSN 1517-7076 artigo 11694, pp. 227-234, 2016 - Revista MATÉRIA, V.21 N.01 - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG
6. CASTRO, R. M., Efeito do Aporte Térmico na Soldagem de Reparos Embutidos em Minerodutos. REDEMAT, Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP – CETEC – UEMG, Junho de 2011, Dissertação de Mestrado
7. LINS, Jr. A. S., Avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas de aço HY-80. Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET, Rio de Janeiro, Julho de 2013, Dissertação de Mestrado
8. POLYSOUDE SAS, 2 rue Paul Beaupère, 44300 NANTES, France. Disponível em: <<https://www.polysoude.com/orbital-and-automated-welding/automated-welding/>>, acessado em 15/02/2019
Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Wo4eWH04gTI&feature=emb_title>, acessado em 21/11/2020
9. SERIMAX HOLDINGS Welding Technology Centre (WTC), Roissy en France 95926, 346 rue de la belle étoile – CS 90023, Disponível em: <<http://www.serimax.com/en/about-us-premium-welding-solutions/>>, acessado em 15/02/2019

10. LINCOLN Controle magnético de arco - DirectArc – Arc Products – A. Disponível em: <<https://www.arcproducts.com/product/directarc-magnetic-arc-control/>>, acessado em 08/10/2019
11. HAN GIL Industry Co – COREIA – Magnetic Arc Weave, Disponível em: <<http://www.autowelding.com/eproduct29.htm>>, acessado em 08/10/2019
12. CRC-EVANS PIPELINE INTERNATIONAL, C. E. P., Houston, Texas 77066 EUA. Disponível em: < <https://all.biz/uz-en/welding-head-of-p600-crc-evans-g83350>>, acessado em 03/05/2019

acesso em 09/06/2019
13. BONACORSO, N. G., HUBERT, I. L., et al., Desenvolvimento de um braço robótico portátil para a execução de soldagens automatizadas, Instituto Federal de Santa Catarina-IFSC, Novembro 2014
14. REIS, R.P, SOUZA, D., SCOTTI, A., Models to describe Plasma Jet, Arc Trajectory and arc blow formation in arc welding - Doc. IIW-2089, recommended for publication by Study Group SG-212 “The Physics of Welding.” –. N°03 e 04 – 2011, vol.55 – Welding in the Word Peer-reviewed Section
15. CLAIN, F. M., TEIXEIRA, P. R. D. F., ARAÚJO, D. B., Two heat source models to simulate welding processes with magnetic deflection. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRG, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, 2017
16. WANG, L., WU, CHEN J., JINQIANG, G., Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017
18. EMMERSON, J. G., Fcaw Orbital Pipe Welding Technology Improves Fab Shop Productivity, Welding journal, November 1999. p. 1 até 4
19. SILVA, R. H. G. E., Soldagem MIG/MAG em Transterência Metálica por Curto Circuito, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Fevereiro 2005

20. WELDERS AP Automation, <http://www.ap-automation.com/products.AUTOMATION>, A., Arc Welding Products. https://www.youtube.com/watch?v=F53q50_IHdQ&t=3s, San Diego, California 92154, USA, acessado em 15/02/2019, www.ap-automation.com
21. MAGNATECH LLC., Estados Unidos da América, U.S.A., 6 Kripes Road, East Gramby, Connecticut 06026, acessado em 15/02/2019, www.magnatechllc.com/products.php
22. SARTORI, F., Tecnologias e Técnicas Modernas do Processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 13 Julho 2016
23. KINDERMANN, R. M., Soldagem Orbital do Passe de Raiz – Algoritmos para Controle Adaptativo por meio de Sensoriamento Laser, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 18 Agosto 2016
24. PEREZ, F. R. D. C., A influência da temperatura de pré-aquecimento e tecimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem MIG/MAG robotizada de aços SAE 8620 com ABNT LN28. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Bauru, 2007
25. ZIBEROV, M., Avaliação da Pulsação Térmica para Controle da Poça de Fusão em Soldagem de Raiz com MIG/MAG Automatizado. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia, 2013
26. LEI de AMPERE, Campo magnético da corrente em um fio, Cap. 8, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 10/03/2014. Disponível em: <<http://lilith.fisica.ufmg.br/~feletro/TRANSPARENCIAS/Transp-Cap8.pdf>> acessado em: 10/01/2019.
27. LANDGRAF, F. J. G., Propriedades Magnéticas de Aços para Fins Elétricos, IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2014
28. MATERIAIS MAGNÉTICOS, Capítulo II, Universidade Federal de Santa Catarina, 06/07/2014, Disponível em: <<https://silو.tips/download/capitulo-ii-materiais-magneticos>> acessado em 11/05/2017.

29. BATISTELA, N. J., Carlson R., Sadowski N., Leite J. V., Caracterização Magnética de Lâminas de Aço Silício e Avaliação das Perdas no Ferro sob Vários Regimes de Indução. Revista Controle & Automação, Santa Catarina, Maio/Junho/Julho/Agosto 2002. Volume 13, N°2
30. JULIANI, L., Utilização de um sistema de controle por oscilação magnética para a deposição de metal em passe de raiz utilizando o processo GMAW. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2014
31. RAZMYSHLYAEV, A. D., VYDMYSH, P. A. E. A., Modelling the transverse magnetic field generated by equipment in arc welding. Priazovsk State Technical University and Donbass State Engineering Academy, Ukraine, Mariupol and Kramatorsk, 2016
32. GUILHERME, L. A., Estudo do Efeito da Geometria das Extremidades do Núcleo do Eletroímã sobre a Deflexão do Arco de Soldagem. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica. 8, 2012
33. ECER, G. M., Magnetic Deflection of the Pulsed Current Welding Arc - Welding Research Supplement - 183-s, Junho 1980
34. KANG, Y. H., NA, J. S., Study on the Modeling of Magnetic Arc Deflection and Dynamic Analysis, AWS – American Welding Society, Welding Journal, Janeiro 2002
35. LARQUER, T. R., SOUZA D. M., REIS R. P., Soldagem TIG com Oscilação Magnética Sincronizada, Soldagem & Inspeção, 2016;(3) pag. 363 até 378
36. CLAIN, F. M., TEIXEIRA, P. R. D. F., ARAÚJO, D. B., Two heat source models to simulate welding processes with magnetic deflection. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRG, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, 2017
37. WU, H., CHANG, Y., LU, L., BAI, J., Review on magnetically controlled arc welding process. Springer-Verlag London 2017, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, January 2017, 91:4263–4273, DOI 10.1007/s00170-017-0068-9
38. GREENE, W. J., Magnetic Oscillation of Welding Arc., Patente 2.920.183, 5 Janeiro 1960.

39. WANG, J., SUN, Q., et al., Characteristics of welding and arc pressure in TIG narrow gap welding using novel magnetic arc oscillation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016
40. SOARES, L. F., *Uso de Oscilação Magnética do Arco Elétrico para Preenchimento do Passe de Raiz em Juntas Chanfradas de Aço Baixo Carbono com o Processo GMAW*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica – PPGMEC, Belo Horizonte, Outubro 2010
41. ANDRADE, B. C. Jr., *Uso de oscilação Magnética na Transferência Metálica para Preenchimento de Passe de Raiz com Arame Tubular*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica - PPGMEC, Belo Horizonte, Agosto 2010
42. WANG, L., WU, CHEN, J., JINQIANG, G., Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017
43. MODENESI, P. J., *Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais*. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2017. Capítulo 11, pag. 77 até 105, Capítulo 12, pag. 113 até 126
44. SCOTTI, A., PONOMAREV, V., *Soldagem MIG/MAG*, Editora Artliber, Edição de 2008, Capítulo 2, pag. 121 até pag.156, Edição de 2014, Capítulo 1, seção 1.8 – Gases de proteção, pag. 96 até 108
45. ANDRADE, A.F.C., *Influência da Corrente de Pulso, Tempo de Pulso e Diâmetro de Gota sobre a Estabilidade da Transferência Metálica no Processo MIG-P*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2012
46. CAMARGO, L. G., DRECHSLER, M. F. E. A., *Proposta e Análise de Dispositivo para Otimização do Destacamento da Gota na Soldagem MIG/MAG*. Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Março 2016, *Soldagem & Inspeção*, <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2101.08>
47. TATAGIBA, L.C.S., GONÇALVES, R.B., PARANHOS, R., *Tendência no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG – Soldagem e Inspeção*, São Paulo, Vol. 17, N°3, pag. 218 até 228, Julho/Setembro 2012

48. LISKÉVYCH, O., Estudo da Influência do Teor de CO₂ na Regularidade da Transferência de Metal e Estabilidade do Processo MIG/MAG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Minas Gerais, 2010
49. YONG Z., XIAOJIAN S., KENG Y., et al. Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel - Journal of Materials Processing Tech, July 2018, <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.003>>
50. RAM J., G. D., MURUGESAN, R., SUNDARESAN, S., Fusion zone grain refinement in aluminum alloy welds through magnetic arc oscillation and its effect on tensile behavior. Journal of Materials Engineering and Performance, 1998
51. KOU S., Welding Metallurgy, Wiley Interscience Publication, Edição de 2003, Capítulo 7, pag 194
52. CIRCUITOS RESISTIVOS ALIMENTADOS COM ONDA SENOIDAL. INDUTÂNCIA MÚTUA, Capítulo 6, pag. 79 até 88. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/55142279-Circuitos-resistivos-alimentados-com-onda-senoidal-indutancia-mutua.html>>, acessado em 14/01/2020
53. MODENESI, P. J., MATILDE, S., et al., Um programa de computador para simular alguns aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG, Soldagem e Inspeção, Vol 17, n°1, Março 2012
54. BY, E., SODERSTROM, J., MENDEZ, P. F., Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO₂ Shielding Gas Mixtures, Welding Journal, Vol 87, May 2008
55. ZIELINSKA, S., PELLERIN, S. et al., Gas influence on the arc shape in MIG-MAG Welding, The European Physical Journal Applied Physics, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 43, 111–122 (2008), DOI: 10.1051/epjap:2008106
56. WANG, L., S., CHEN, J., WU, C. et al., Numerical analysis of arc and droplet behaviors in gas metal arc welding with external compound magnetic field, Journal of Materials Processing Technology, Febr. 2020, <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116638>>
57. SOUZA, D., ROSSI, M. L., VILARINHO, L. O., et al., Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito, Soldagem & Inspeção, São Paulo, Vol.16, No. 2, p.114-122, Abr/Jun 2011

58. LEE, S. H., KIM J.S., et al., The Effect of External Electromagnetic Force in Gas Metal Arc Welding on The Transfer Mode, Key Engineering Materials, Vols 297-300, Nov.2005, pag 2825-2830, Trans Tech Publications, Switzerland
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.297-300.2825
59. SENAPATI, A., MOHANTY, S. B., Effects of External Magnetic Field on Mechanical properties of a welded M.S metal through Metal Shield Arc Welding, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 10 Number 6 - Apr 2014, disponível em: <<http://www.ijettjournal.org>>, acessado em: 28/01/2021
60. HAN, Y., CHEN, J., et al., Numerical Investigation of Arc-Pool-Metal Vapor Behavior in GTAW with an External Magnetic Field, Metals, MDPI, September 2020, DOI:10.3390/met10091199, disponível em: <www.mdpi.com/journal/metals>
61. KOBAYASHI, H., NAKAHARA, S., The effects of filler wire and magnetic control in MIG arc welding, Welding International 1990, 4 (10) 761-767 Selected from Quarterly Journal of the Japan Welding Society 1989 7 (3) 57-63; Reference QJ189131S7: Translation 814
62. SHARMA, P., CHATTOPADHYAYA, S., et al., The Effect of an External Magnetic Field on the Aspect Ratio and Heat Input of Gas-Metal-Arc-Welded AZ31B Alloy Weld Joints Using a Response Surface Methodology, Materials, MDPI, November 2020, DOI:10.3390/ma13225269, disponível em: <www.mdpi.com/journal/materials>
63. LARQUER, T. R., Sincronização de Oscilação Magnética com Processos de Soldagem a Arco, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, M.G., Escola de Engenharia Mecânica, 2015
64. BRAGA N. C., Figuras de Lissajous, Instituto NCB, publicado em Novembro, 2009, disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/usando-os-instrumentos/689-figuras-de-lissajous.html>> acessado em: 16/03/2021
65. WANG, L., CHEN J., WU C. S., Numerical investigation on the effect of process parameters on arc and metal transfer in magnetically controlled gas metal arc welding, Elsevier Vacuum, journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/vacuum>, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109391>>, April 2020

66. FISCHER, A., Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW-Arco Pulsado, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Mecânica - PPGMEC, Setembro 2011
67. MELO, V. S., Efeito do tipo corrente usada em soldagem GMAW na resistência ao riscamento de depósitos de Fe-Cr-C, Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PR, Curitiba, Departamento de Engenharia Mecânica – PPGEM, 2018

9. Apêndice

9.1. Áreas de concentração de calor GMAW transferência por curto circuito sobre chapa

Conforme consta na seção 4.0 Metodologia, as filmagens termográficas foram realizadas com a câmera FLIR SC660. Posteriormente, o arquivo desta filmagem foi transferido para o *software Quick Report*. Este *software* interpreta e converte cada um dos pixels da imagem termográfica em um valor numérico que corresponde à temperatura naquele ponto. Em seguida este arquivo foi exportado para o Excel.

No Excel foi possível elaborar uma planilha sendo que, cada célula correspondeu ao valor numérico de temperatura identificada pelo *Quick Report*. Por meio da ferramenta de formatação condicional do Excel, pode-se estabelecer uma escala de cores para valores sendo, por exemplo, verde para temperatura de 200°C, laranja de 201°C até 350°C e vermelho de 351°C até 600°C, este exemplo pode ser visualizado na Figura 9.1.

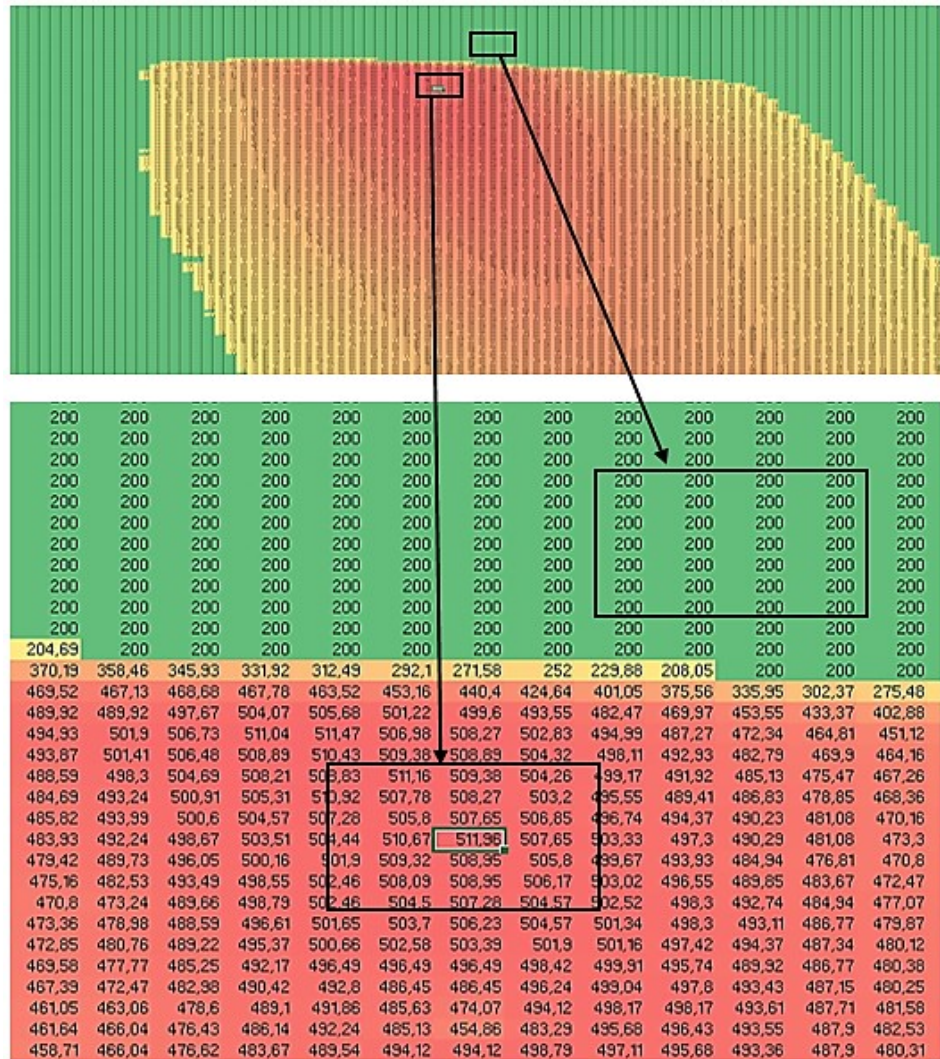


Figura 9.1: Exemplo da ferramenta do Excel para formatação condicional

Posteriormente, ainda no Excel, utilizando as ferramentas estatísticas pode-se obter o valor numérico máximo de uma região selecionada. Então, selecionando toda a região da tabela que corresponde à imagem termográfica, obtém-se o máximo valor de temperatura daquela imagem, ver Figura 9.2. Portanto, como foram selecionadas 90 imagens dentro do percurso diametral de 65 mm as Tabela 9.1, Tabela 9.2, Tabela 9.3 e Tabela 9.4 possuem estes 90 valores dos quais foram obtidas as médias das maiores temperaturas ao longo da soldagem e assim foi produzido o Gráfico 5.3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1			máximo	511,96					
2			eixo x	342					
3			eixo y	88					
4									
5		máximo	200	200	200	200	200	200	
6	máximo		1	2	3	4	5	6	
7	200	1	200	200	200	200	200	200	
8	200	2	200	200	200	200	200	200	
9	200	3	200	200	200	200	200	200	
10	200	4	200	200	200	200	200	200	
11	200	5	200	200	200	200	200	200	
12	200	6	200	200	200	200	200	200	
13	200	7	200	200	200	200	200	200	
14	200	8	200	200	200	200	200	200	
15	200	9	200	200	200	200	200	200	
16	200	10	200	200	200	200	200	200	
17	200	11	200	200	200	200	200	200	
18	200	12	200	200	200	200	200	200	

Figura 9.2: Exemplo da obtenção do maior valor conforme a ferramenta estatística do Excel

Tabela 9.1: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem sem oscilação magnética

(a) - sem oscilação							
Ponto n°	Temperatura	x	y				
12	538,03	382	319	58	546,97	364	208
13	540,12	383	316	59	544,77	361	198
14	542,75	382	313	60	545,37	361	195
15	544,59	381	312	61	545,90	361	195
16	544,89	381	310	62	545,37	360	193
17	545,19	381	310	63	544,74	359	192
18	546,49	380	306	64	543,34	360	190
19	546,08	380	306	65	540,60	360	190
20	544,53	379	299	66	540,42	359	183
21	545,37	379	297	67	539,16	358	181
22	545,66	379	297	68	538,15	358	178
23	546,08	378	291	69	538,45	357	174
24	547,15	378	291	70	538,51	357	173
25	548,04	377	287	71	539,34	356	169
26	548,04	377	287	72	539,70	356	168
27	547,92	377	284	73	540,42	355	163
28	548,69	375	279	74	541,61	355	160
29	549,52	375	275	75	542,98	354	157
30	550,17	375	272	76	544,77	354	155
31	551,53	375	272	77	544,95	354	155
32	551,95	375	270	78	543,22	354	155
33	552,54	374	265	79	542,03	353	151
34	553,90	374	265	80	542,86	351	144
35	554,96	372	261	81	543,94	351	144
36	555,08	372	261	82	545,19	351	138
37	554,37	372	258	83	545,78	351	137
38	552,36	372	258	84	547,50	350	134
39	549,22	371	253	85	547,62	350	134
40	548,69	369	245	86	547,09	350	133
41	550,47	370	244	87	547,50	349	126
42	551,00	369	243	88	548,10	349	126
43	550,70	368	239	89	549,34	348	121
44	551,24	368	239	90	549,52	348	121
45	551,65	368	235	91	548,69	347	117
46	551,83	368	235	92	549,28	346	113
47	554,78	366	227	93	549,40	346	113
48	556,55	366	227	94	548,10	346	113
49	556,78	366	227	95	547,03	345	108
50	555,78	367	223	96	545,96	345	108
51	557,20	365	217	97	544,47	345	106
52	557,90	365	217	98	542,92	344	102
53	557,43	365	217	99	541,19	344	102
54	555,66	365	215	100	537,79	344	102
55	554,78	364	211	101	534,07	344	102
56	552,66	364	211	Media	547,2		
57	550,17	364	211	Desvio padrão	5,3		
				Coef. Variação	1,0		

Tabela 9.2: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem com oscilação magnética padrão Lemniscata com frequência 0,4 Hz

(b) - Lemniscata - frequência 0,4 Hz							
Ponto n°	Temperatura	x	y				
12	502,65	363	346	58	523,44	356	226
13	504,26	363	342	59	523,20	356	220
14	506,36	363	339	60	523,32	356	220
15	507,65	363	336	61	521,92	356	220
16	509,56	363	336	62	522,77	354	212
17	509,56	363	336	63	523,32	354	211
18	509,38	362	329	64	522,95	355	211
19	510,18	362	327	65	521,37	355	208
20	510,67	362	327	66	519,24	355	208
21	511,04	361	322	67	516,49	355	208
22	513,25	361	314	68	513,07	354	204
23	516,13	361	314	69	510,43	353	192
24	518,33	360	309	70	511,90	353	192
25	521,92	361	307	71	511,96	353	192
26	523,68	361	307	72	511,29	353	188
27	523,92	361	307	73	511,29	353	185
28	522,53	361	307	74	511,10	353	185
29	521,74	361	302	75	509,81	353	185
30	520,95	361	302	76	509,63	352	179
31	521,01	361	297	77	508,89	352	177
32	520,58	361	297	78	508,39	352	171
33	519,30	360	292	79	508,95	352	163
34	519,42	359	288	80	511,47	351	160
35	519,36	359	288	81	514,17	351	160
36	519,18	360	284	82	516,19	351	158
37	518,27	360	284	83	518,39	351	155
38	517,41	359	279	84	519,48	351	153
39	517,96	359	272	85	520,34	351	152
40	518,88	359	272	86	520,22	351	150
41	518,63	359	272	87	520,52	350	146
42	517,47	359	268	88	520,64	350	146
43	517,53	358	266	89	520,70	350	142
44	517,17	359	264	90	520,46	350	142
45	517,72	358	257	91	520,16	349	138
46	518,02	358	257	92	519,91	349	134
47	517,35	358	257	93	519,85	349	133
48	515,64	358	254	94	519,42	349	129
49	513,86	358	254	95	518,94	349	129
50	511,59	357	248	96	518,20	349	126
51	510,92	357	246	97	518,51	348	121
52	512,08	356	234	98	518,27	348	121
53	514,05	356	234	99	516,49	348	118
54	518,02	356	229	100	515,94	348	115
55	521,07	356	228	101	515,45	347	112
56	522,77	356	226	Media	516,6		
57	523,68	356	226	Desvio padrão	5,0		
				Coef. Variação	1,0		

Tabela 9.3: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem com oscilação magnética padrão Elipse com frequência 0,4 Hz

(c) - Elipse - frequência 0,4 Hz							
Ponto n°	Temperatura	x	y				
12	491,42	311	344	58	527,07	298	224
13	494,93	311	344	59	527,68	298	222
14	494,93	311	344	60	527,92	298	222
15	497,30	311	344	61	527,50	298	221
16	498,11	311	344	62	526,41	298	221
17	500,16	310	338	63	524,11	298	221
18	501,72	310	335	64	520,95	298	221
19	502,27	310	335	65	518,02	298	215
20	500,85	309	329	66	515,64	298	215
21	500,66	309	329	67	512,08	298	215
22	500,35	308	321	68	508,15	298	214
23	503,14	307	317	69	505,43	298	205
24	505,37	308	316	70	503,14	298	205
25	507,10	308	313	71	502,46	298	195
26	508,76	307	309	72	502,03	298	195
27	511,35	308	307	73	501,03	297	192
28	513,86	308	305	74	499,98	297	184
29	515,52	308	304	75	500,54	297	184
30	515,58	307	300	76	500,23	297	184
31	516,19	307	300	77	500,04	297	178
32	516,31	307	297	78	500,66	297	173
33	516,25	307	297	79	501,34	296	172
34	515,58	306	289	80	501,96	296	166
35	516,37	306	289	81	503,64	296	164
36	516,56	306	289	82	504,81	296	163
37	516,01	306	287	83	505,12	296	163
38	515,21	305	284	84	506,11	296	158
39	516,37	306	275	85	506,73	295	154
40	518,02	305	274	86	507,59	295	152
41	518,75	304	274	87	507,78	295	152
42	518,39	304	274	88	506,61	295	151
43	517,90	305	270	89	506,67	294	146
44	515,88	305	270	90	507,10	295	141
45	513,68	304	266	91	507,72	295	141
46	512,15	304	264	92	507,78	293	135
47	512,51	303	257	93	508,52	294	134
48	512,64	303	257	94	508,76	293	132
49	511,47	303	257	95	508,76	293	128
50	510,67	303	252	96	509,01	293	128
51	510,36	302	246	97	507,22	293	128
52	511,35	302	243	98	505,18	293	125
53	511,72	302	243	99	502,71	293	125
54	513,19	300	232	100	500,66	292	121
55	517,19	300	228	101	498,48	291	119
56	521,98	298	225	Media	509,6		
57	525,50	298	224	Desvio padrão	8,3		
				Coef. Variação	1,6		

Tabela 9.4: Pontos de maior temperatura ao longo da soldagem com oscilação magnética padrão Elipse com frequência 1,0 Hz

(d) - Elipse - frequência 1 Hz							
Ponto n°	Temperatura	x	y				
12	478,09	354	320	58	502,71	337	205
13	481,90	354	320	59	502,58	335	201
14	485,51	353	317	60	502,34	335	201
15	487,59	353	317	61	500,04	335	201
16	489,35	352	313	62	497,36	335	201
17	492,55	352	309	63	496,36	334	193
18	494,12	352	309	64	495,12	333	188
19	494,93	352	309	65	494,74	333	188
20	495,43	351	300	66	494,18	334	183
21	498,36	351	300	67	493,99	332	179
22	499,29	351	300	68	493,99	331	177
23	499,29	351	300	69	494,74	331	173
24	497,99	351	297	70	495,24	330	169
25	498,67	349	292	71	495,49	330	169
26	498,55	349	292	72	495,93	330	166
27	497,67	349	292	73	495,62	329	163
28	495,99	348	289	74	495,55	330	163
29	494,30	349	287	75	496,18	329	158
30	492,30	347	284	76	495,62	329	158
31	490,04	347	284	77	497,30	328	150
32	488,28	347	280	78	497,42	328	150
33	487,52	346	269	79	496,93	326	145
34	488,85	345	266	80	497,05	326	145
35	489,92	345	262	81	496,11	326	141
36	490,92	344	260	82	496,24	326	141
37	490,92	344	260	83	496,55	325	135
38	494,93	343	253	84	496,30	326	134
39	496,61	343	253	85	496,24	326	132
40	497,18	343	253	86	496,11	324	127
41	496,49	342	252	87	497,24	323	123
42	495,68	342	248	88	497,18	323	123
43	495,12	342	247	89	497,05	322	119
44	495,24	342	241	90	496,74	322	118
45	496,05	340	235	91	495,62	322	118
46	496,74	340	235	92	493,93	322	115
47	497,11	339	229	93	491,80	322	115
48	498,05	339	226	94	489,85	321	111
49	498,98	339	226	95	486,96	321	108
50	498,73	339	222	96	484,56	321	107
51	499,42	337	219	97	482,53	320	102
52	500,91	337	216	98	480,89	321	100
53	502,15	337	212	99	480,12	320	94
54	503,20	337	212	100	479,74	320	93
55	503,02	337	212	101	479,30	319	87
56	502,40	337	208				
57	503,14	337	205				
				Mediã	494,5		
				Desvio padrão	5,7		
				Coef. Variação	1,1		

A imagem que foi gerada pela câmera termográfica FLIR SC660 pode ser filtrada no próprio *software* da câmera de modo a fornecer uma imagem correspondente a uma faixa de temperatura específica. Com este recurso, a cada 5 imagens termográficas, uma foi configurada para se apresentar com faixa de temperatura entre 450° e 560°C e posteriormente esta foi transferida para o *software Image J*. Neste *software* foi possível converter tais imagens em padrões de cinza e desta forma o número de pixels correspondente à imagem determinou a área. Estas imagens em padrão de cinza estão nos cantos inferiores esquerdos de cada imagem termográfica das, Figura 9.3, Figura 9.4, Figura 9.5, Figura 9.6, Figura 9.7, Figura 9.8, Figura 9.9, Figura 9.10 e Figura 9.11.

Cada pixel da imagem termográfica corresponde a uma área de 0,37 mm². Então, no Excel, montou-se a Tabela 9.5 que correlaciona o número de pixels com a área de cada um deles para serem obtidas as regiões correspondentes às temperaturas entre 450°C e 560°C ao longo das soldagens. Assim foi produzido o Gráfico 5.4.

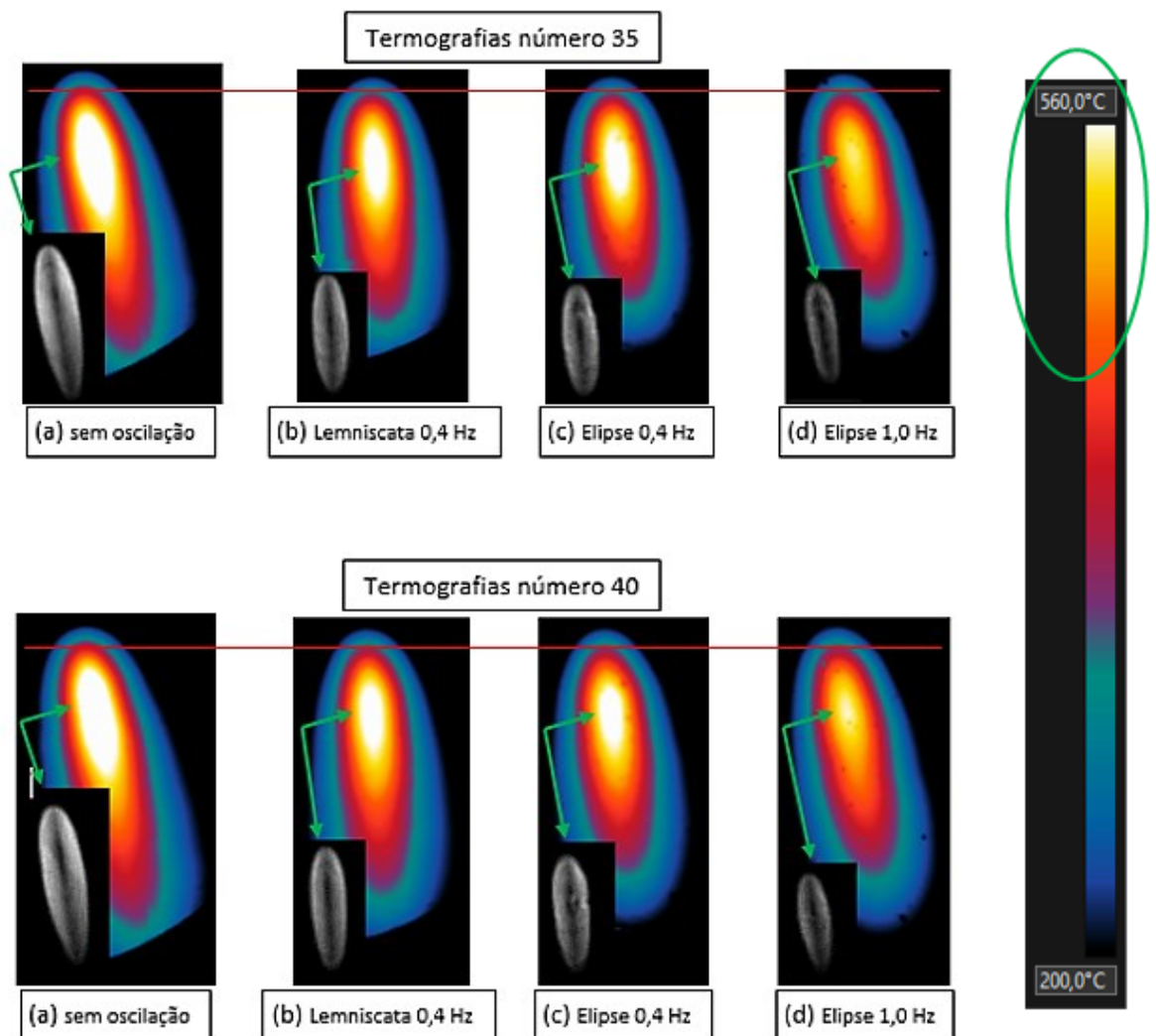


Figura 9.3: Imagens termográficas n° 35 e n° 40

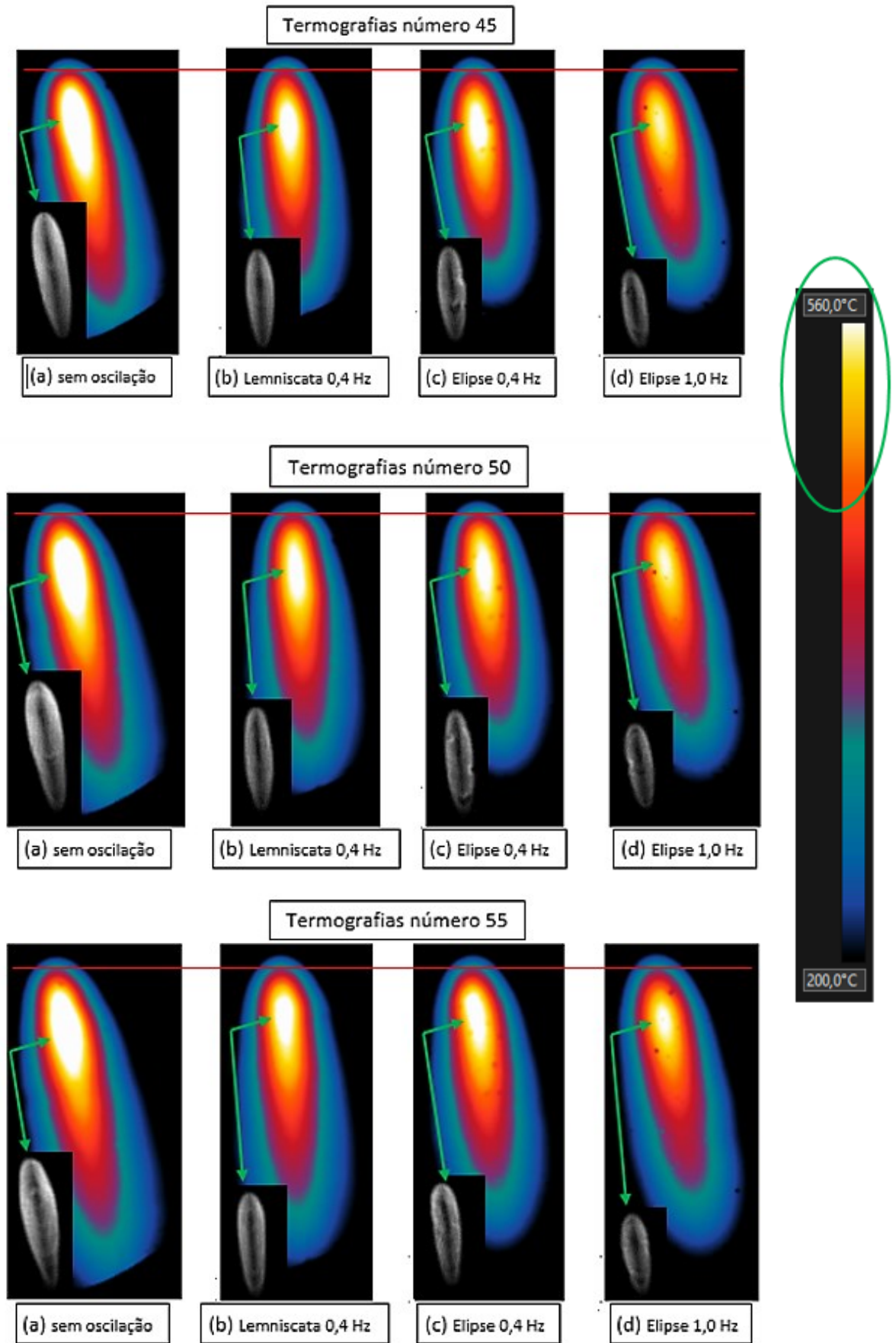


Figura 9.4: Imagens termográficas n° 45, n° 50 e n° 55

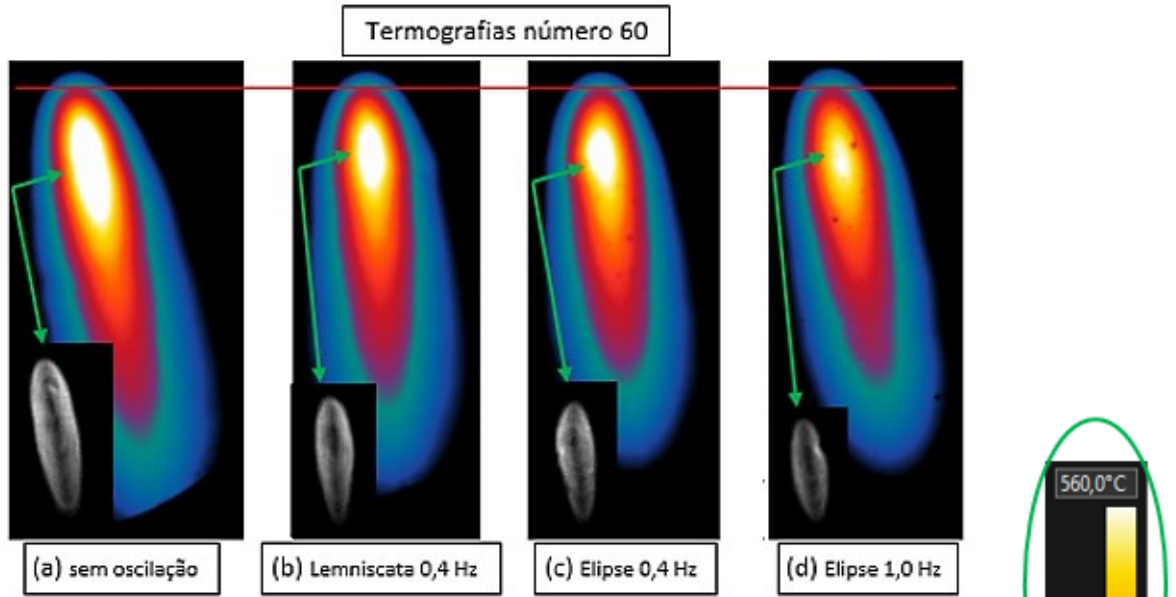


Figura 9.5: Imagem termográfica n° 60

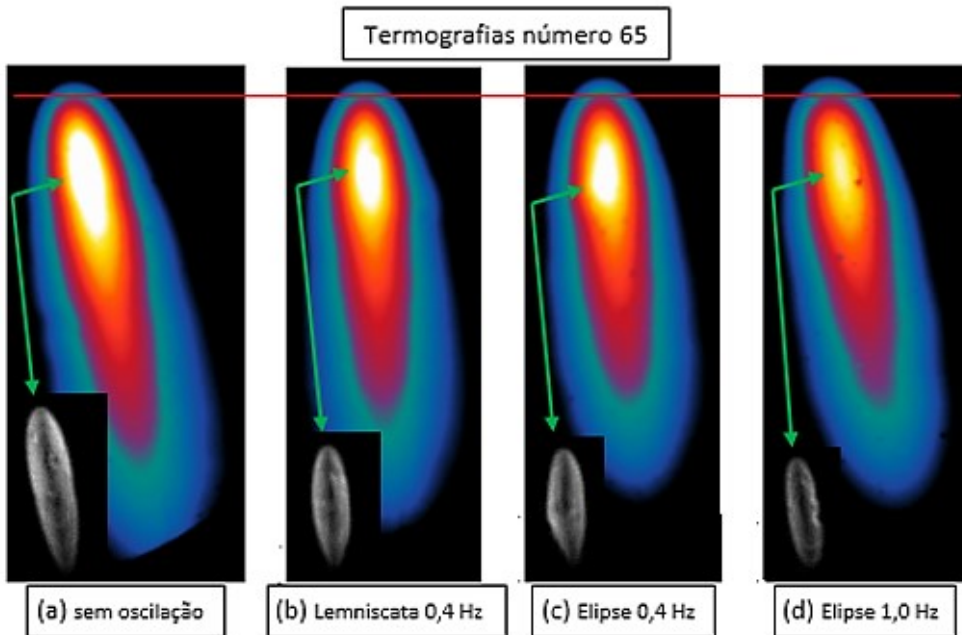


Figura 9.6: Imagem termográfica n° 65

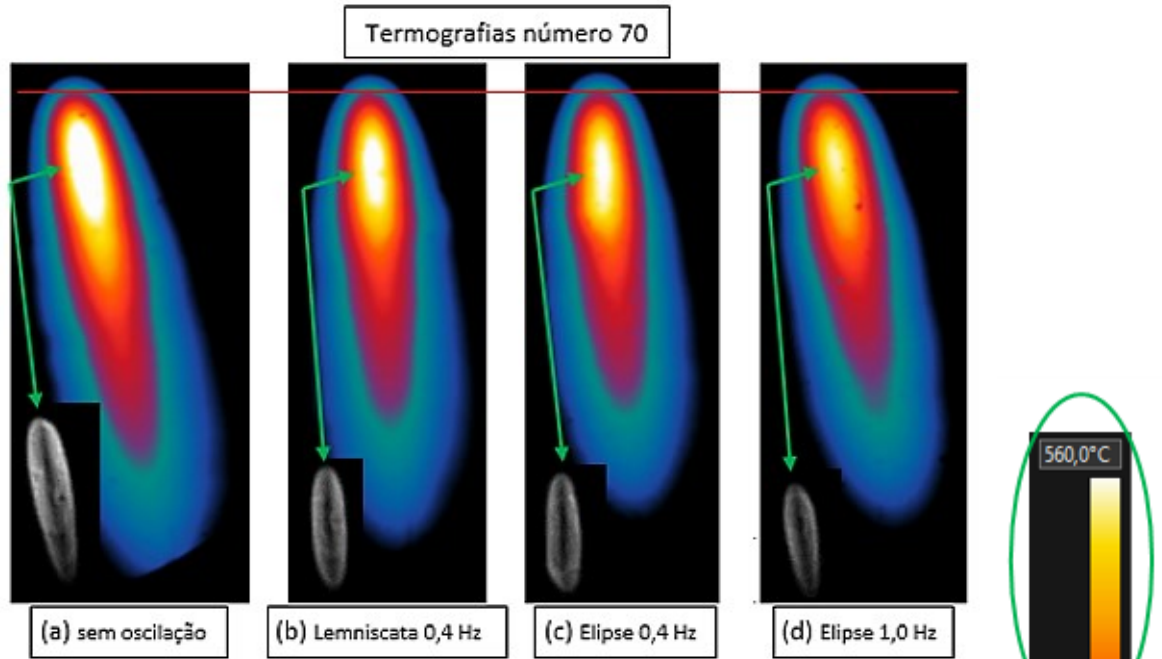


Figura 9.7: Imagem termográfica n° 70

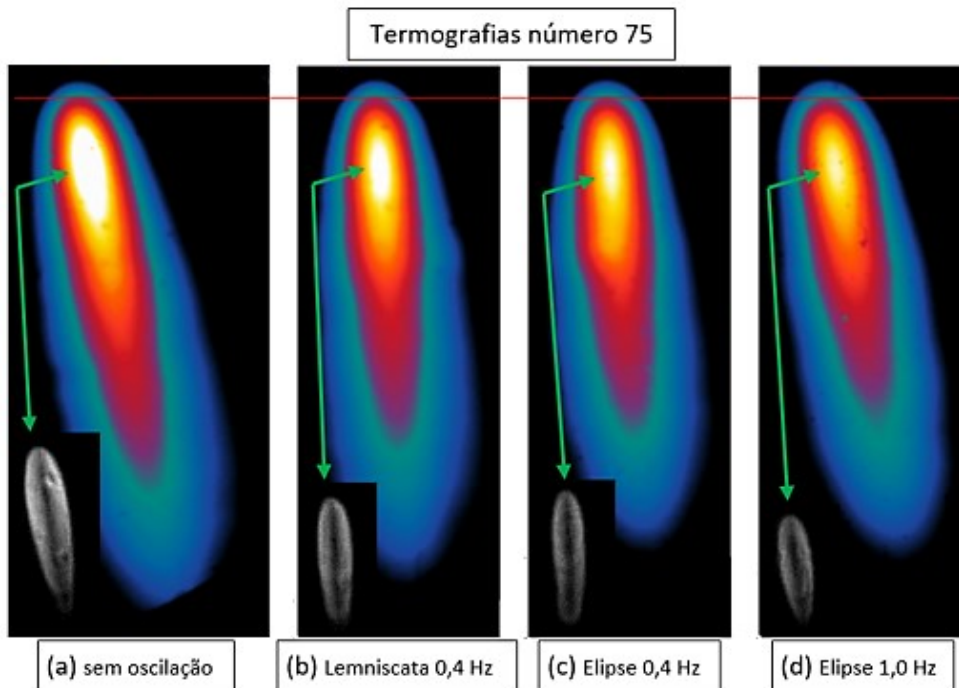


Figura 9.8: Imagem termográfica n° 75

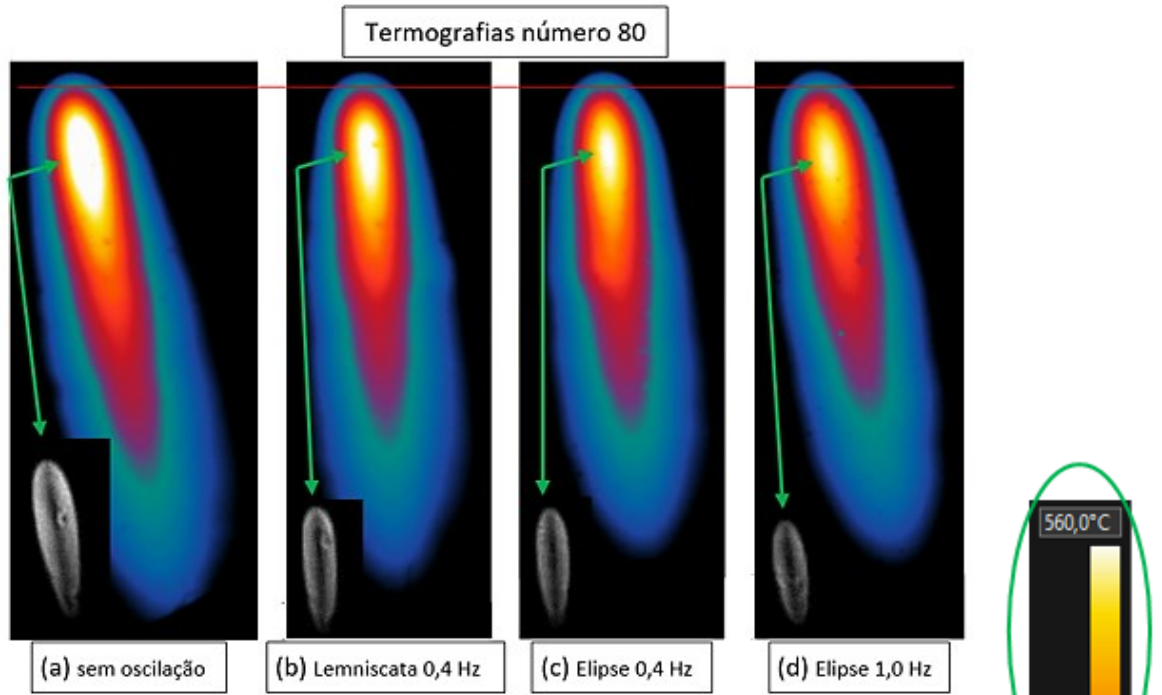


Figura 9.9: Imagem termográfica n° 80

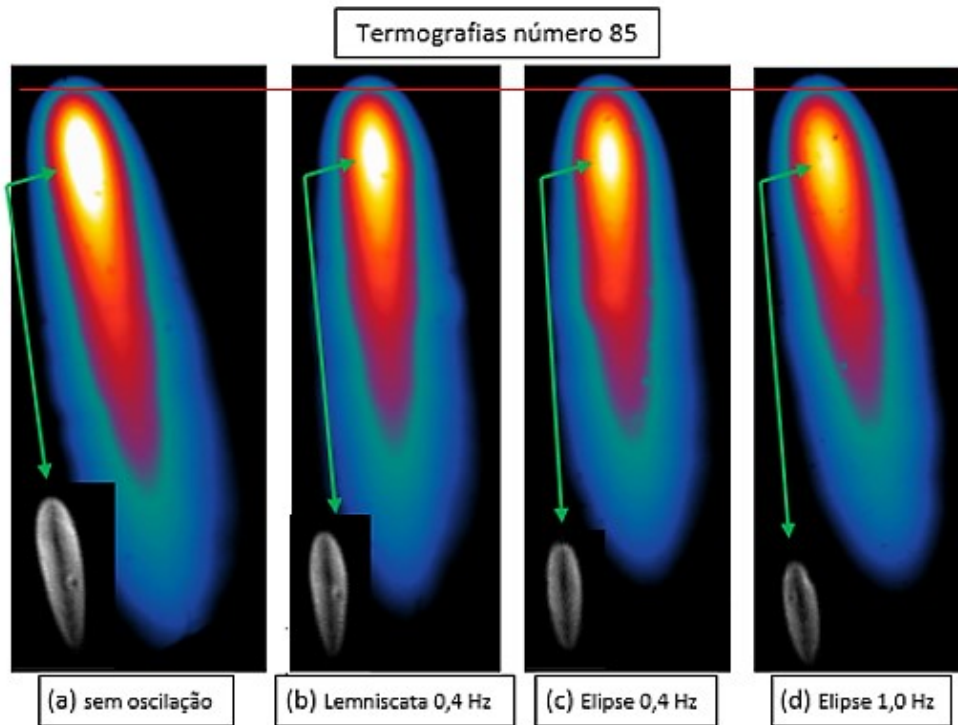


Figura 9.10: Imagem termográfica n° 85

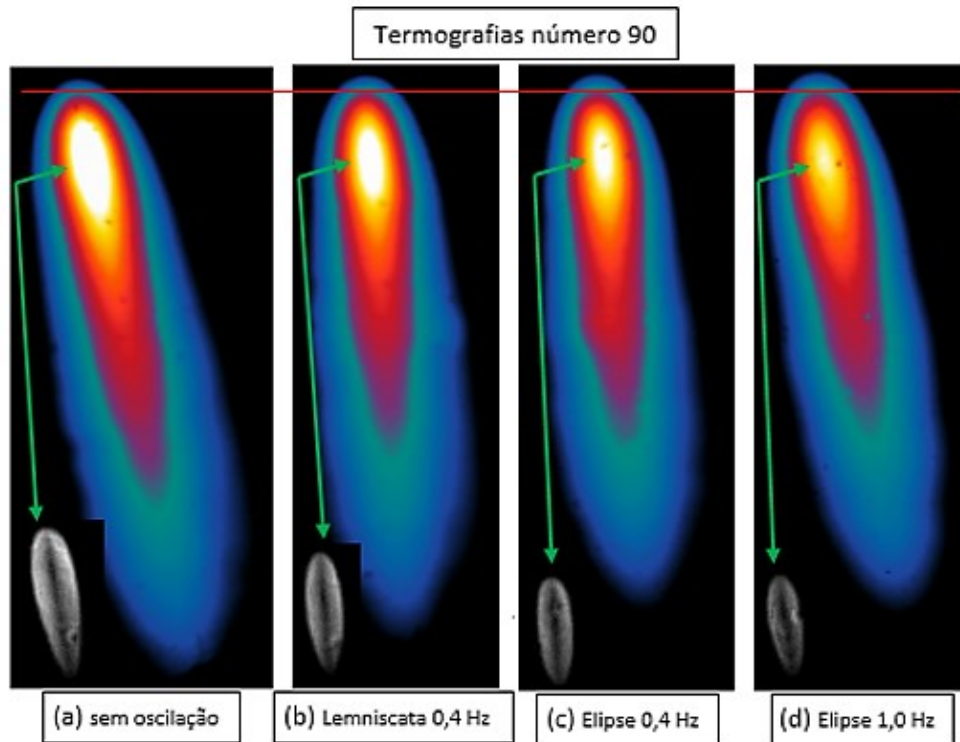


Figura 9.11: Imagem termográfica n° 90

Tabela 9.5: Áreas a cada 5 imagens termográficas dentre as 90 termografias dos padrões de oscilação que foram ensaiados

Termometria	(d) Elipse 1,0 Hz		(c) Elipse 0,4 Hz		(b) Lemniscata 0,4 Hz		(a) Sem Oscilação	
	Número de pixels por área	Área	Número de pixels por área	Área	Número de pixels por área	Área	Número de pixels por área	Área
35	728	269,4	901	333,4	1021	377,8	1533	567,2
40	661	244,6	940	347,8	1027	380,0	1547	572,4
45	690	255,3	942	348,5	1024	378,9	1591	588,7
50	796	294,5	1010	373,7	1013	374,8	1585	586,5
55	758	280,5	1028	380,4	1044	386,3	1542	570,5
60	750	277,5	928	343,4	997	368,9	1505	556,9
65	758	280,5	922	341,1	952	352,2	1523	563,5
70	769	284,5	834	308,6	972	359,6	1477	546,5
75	754	279,0	943	348,9	939	347,4	1405	519,9
80	733	271,2	818	302,7	924	341,9	1381	511,0
85	752	278,2	813	300,8	965	357,1	1383	511,7
90	710	262,7	799	295,6	938	347,1	1390	514,3
média das áreas termográficas	→ 273,2		→ 335,4		→ 364,3		→ 550,7	
Desvio Padrão	→ 13,6		→ 28,1		→ 15,3		→ 29,3	
área de 1 pixel termográfico [mm ²]	0,37							

	(a) sem oscilar	(b) Lemniscata 0,4 Hz	(c) Elipse 0,4 Hz	(d) Elipse 1,0 Hz
média das áreas termográficas	550,7	364,3	335,4	273,2
Desvio padrão	29,3	15,3	28,1	13,6

9.2. Exemplos de oscilogramas e fotos GMAW pulsado sobre chapa

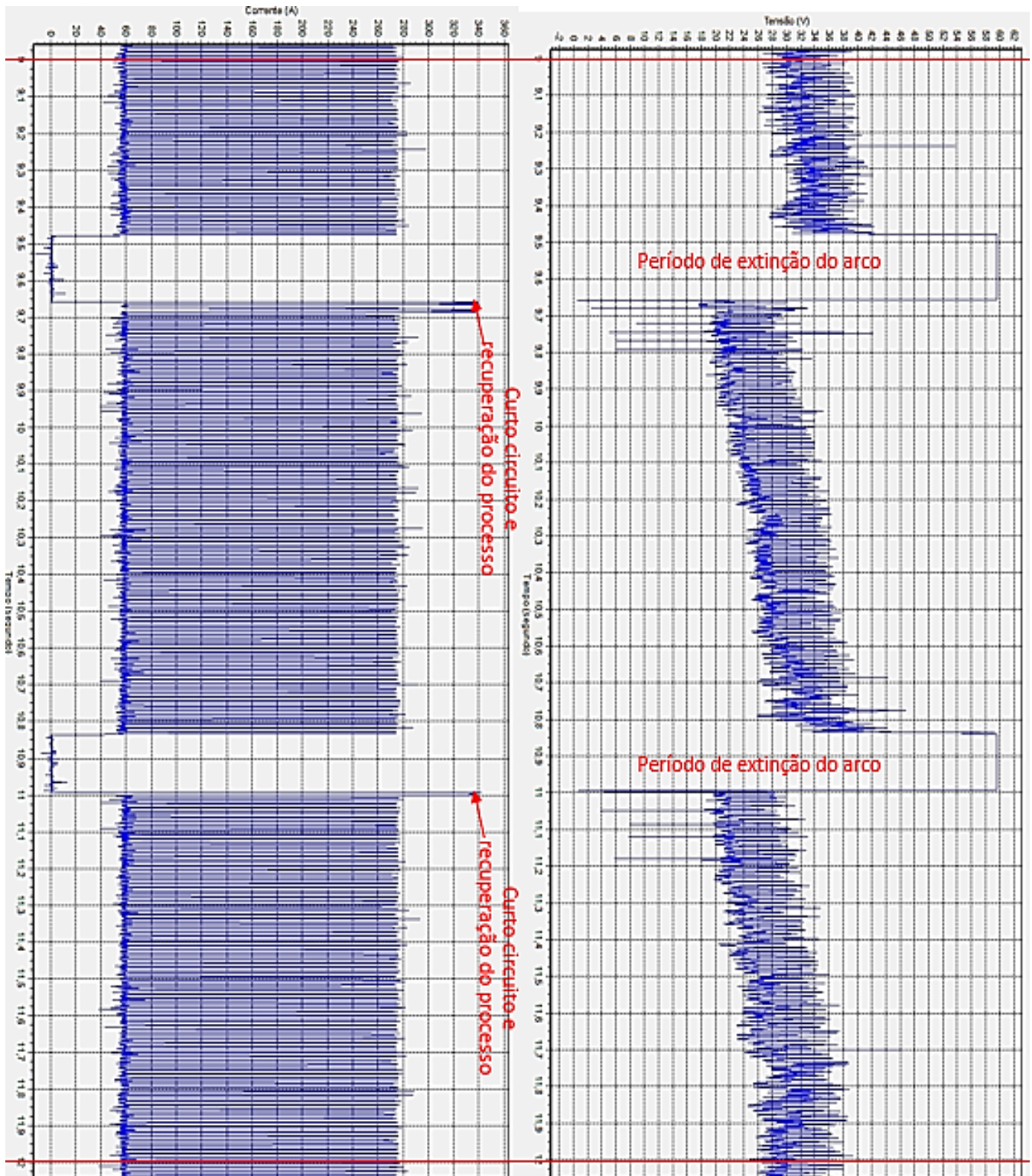


Figura 9.12: Gás 18%CO₂. Sem oscilação

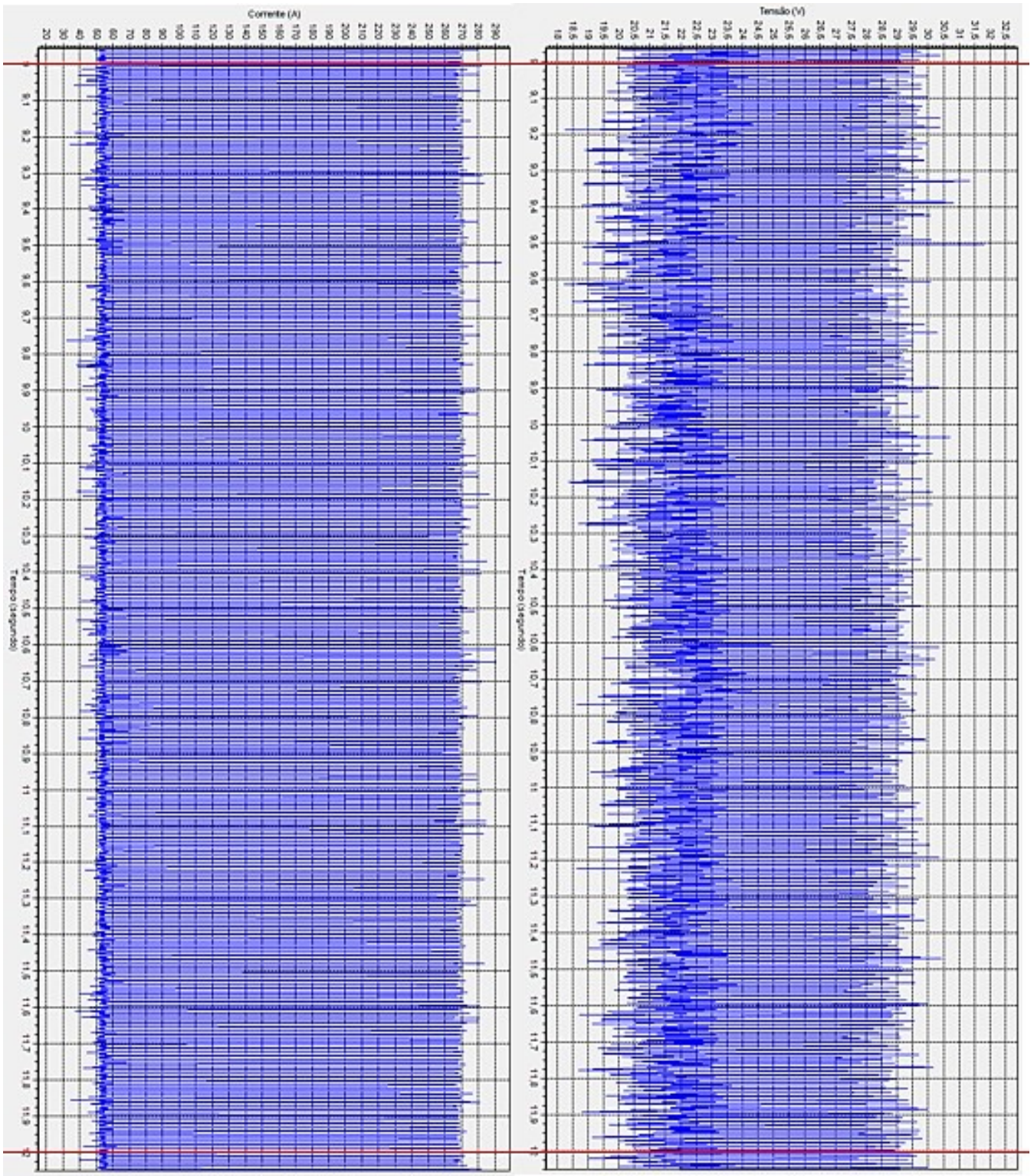


Figura 9.13: Gás 4%CO₂ – 55A. Sem oscilação

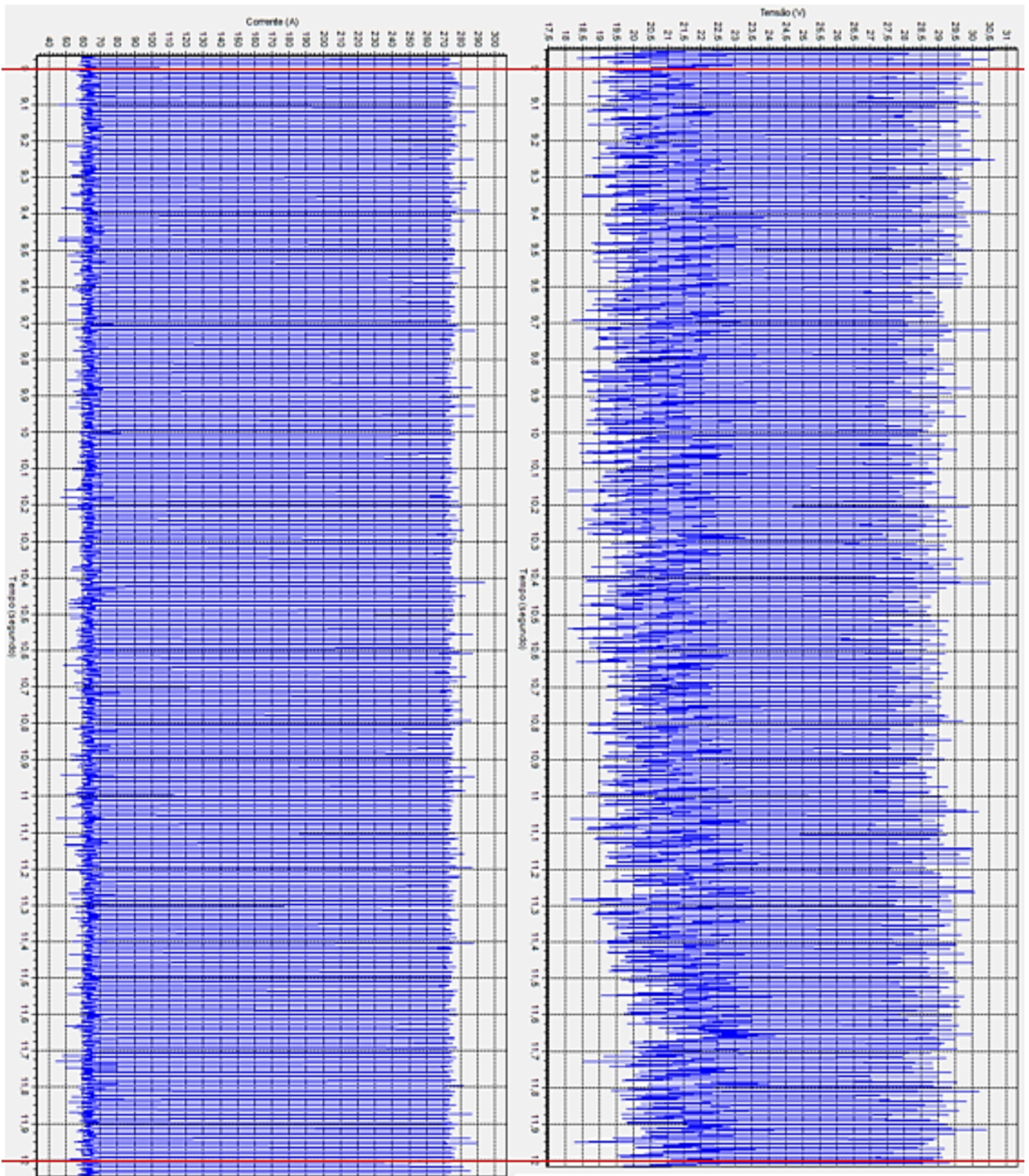


Figura 9.14: Gás 4%CO₂ – 65A. Sem oscilação

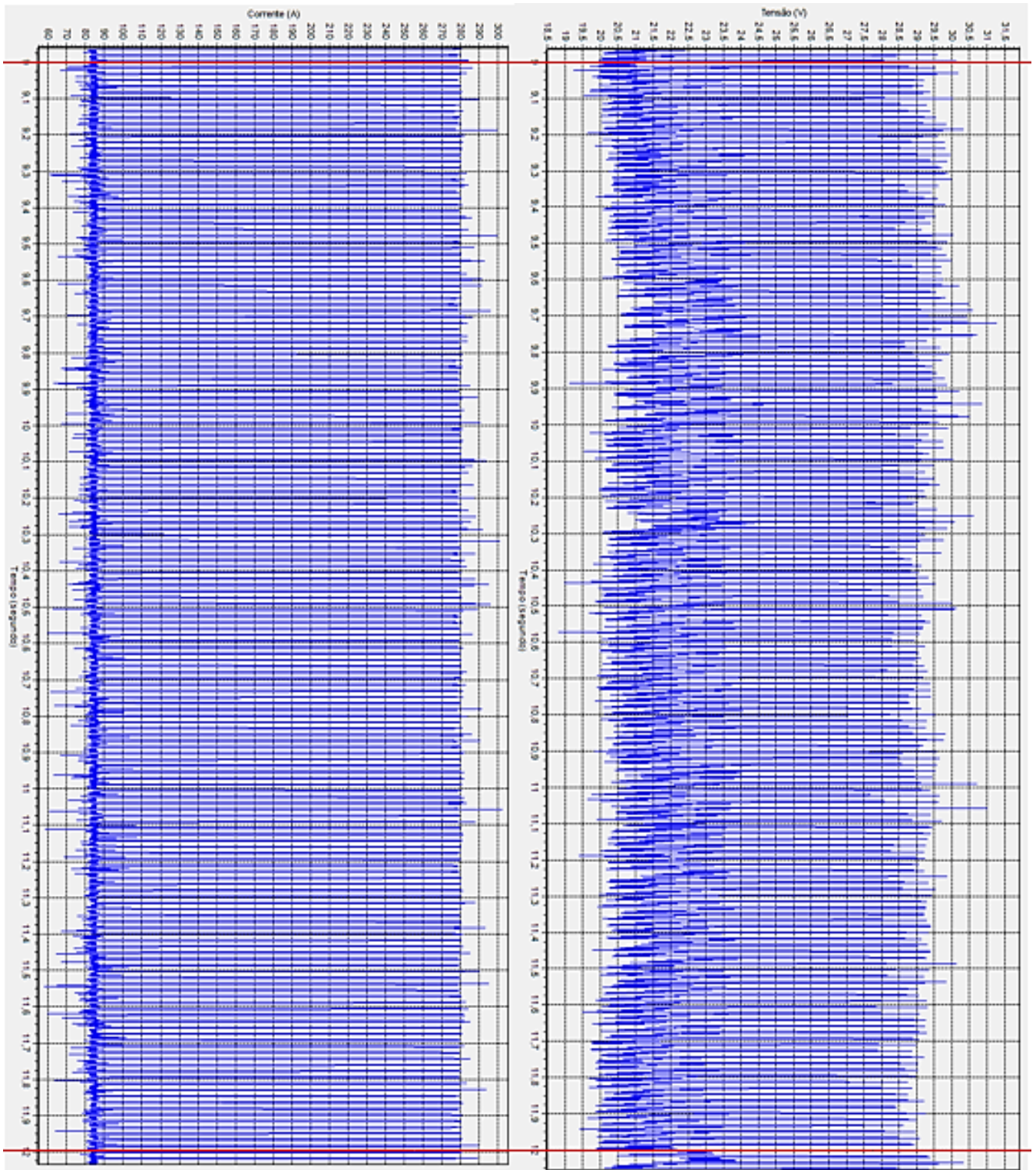


Figura 9.15: Gás 4%CO₂ – 85A. Sem oscilação

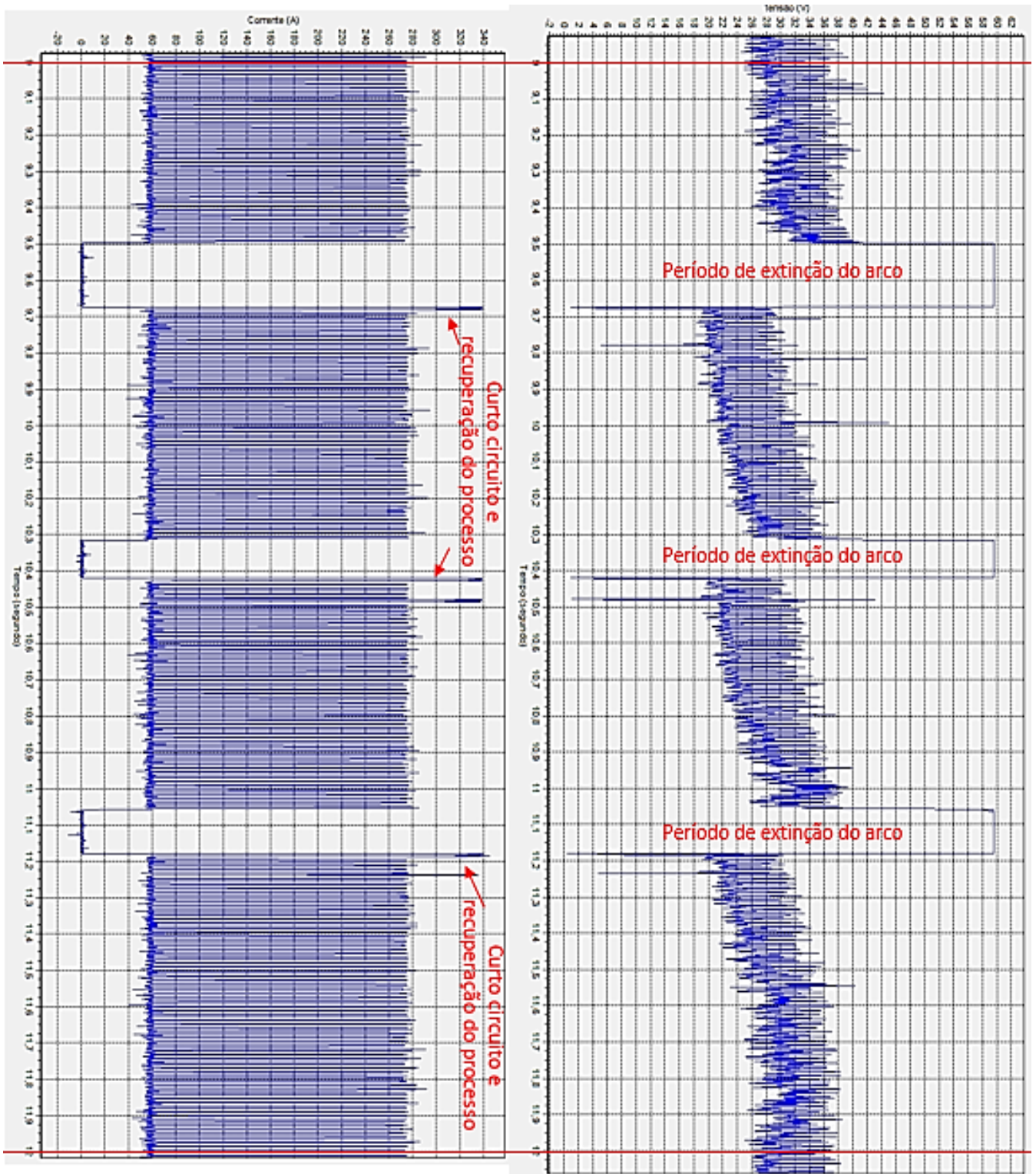


Figura 9.16: Gás 18%CO₂ – Bx=2,8 mT. Uma bobina

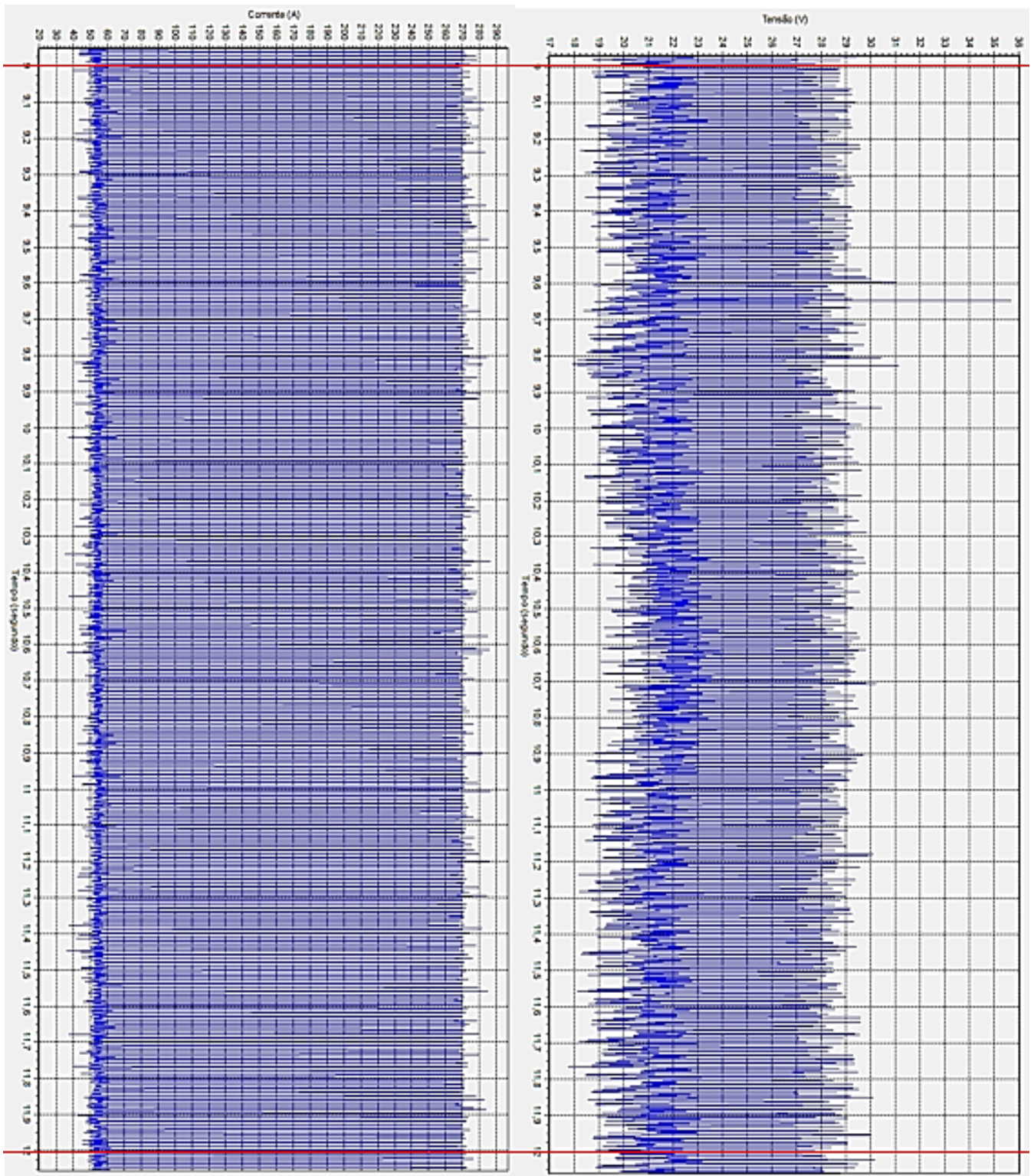


Figura 9.17: Gás 4%CO₂ – 55A – Bx=2,8 mT. Uma bobina

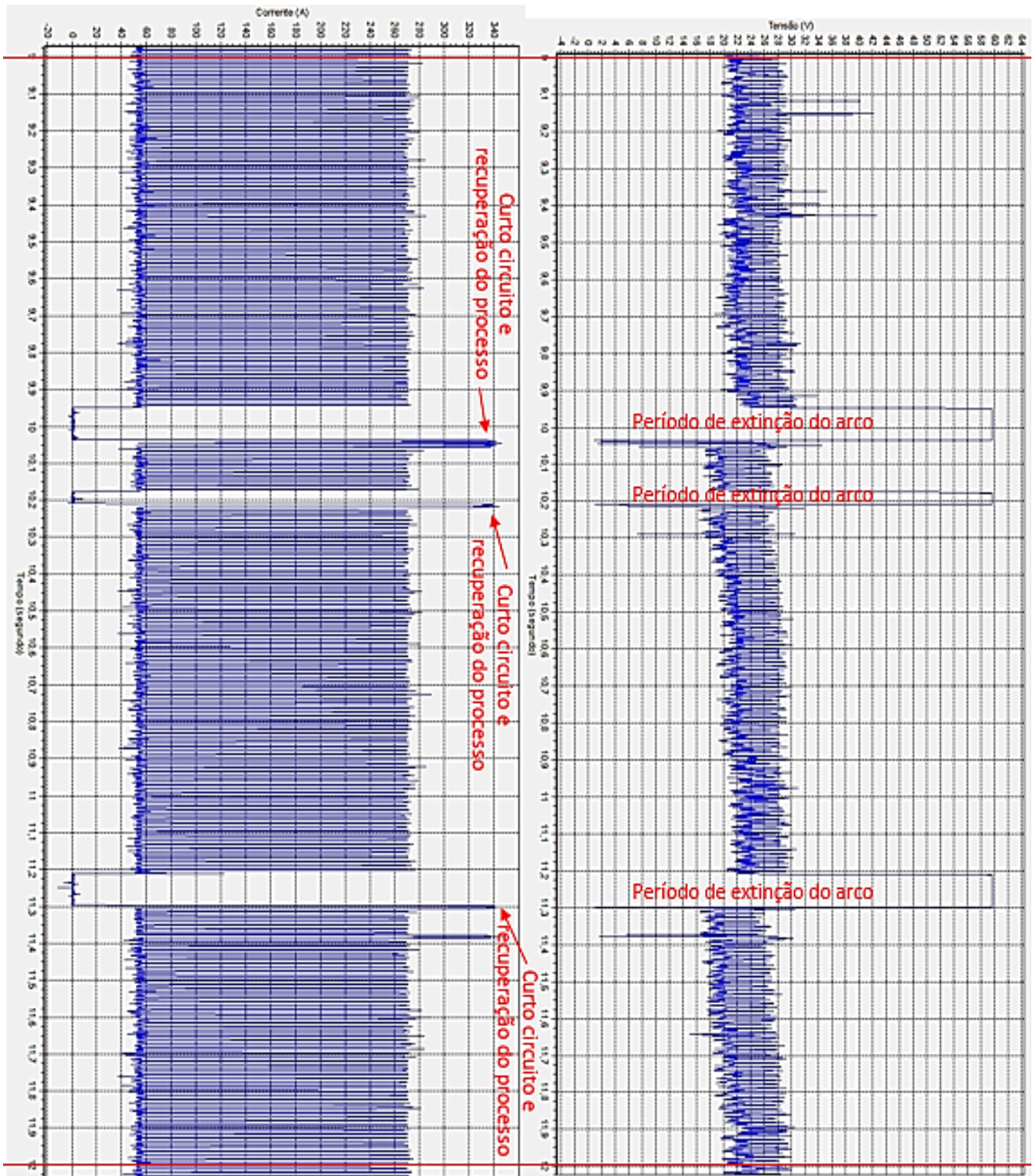


Figura 9.18: Gás 4%CO₂ – 55A – Bx=10 mT. Duas bobinas

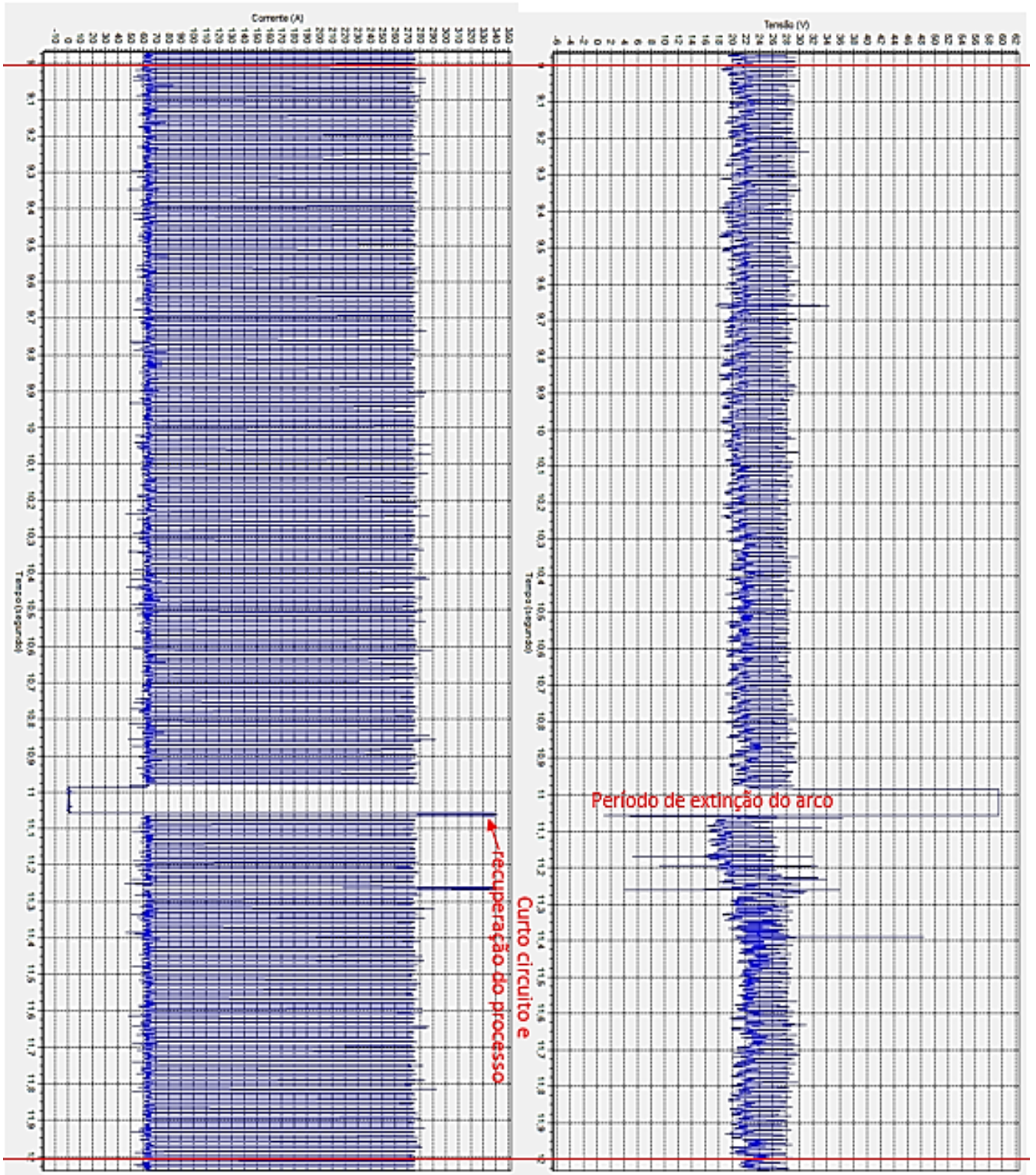


Figura 9.19: Gás 4%CO₂ – 65A – Bx=10 mT. Duas bobinas

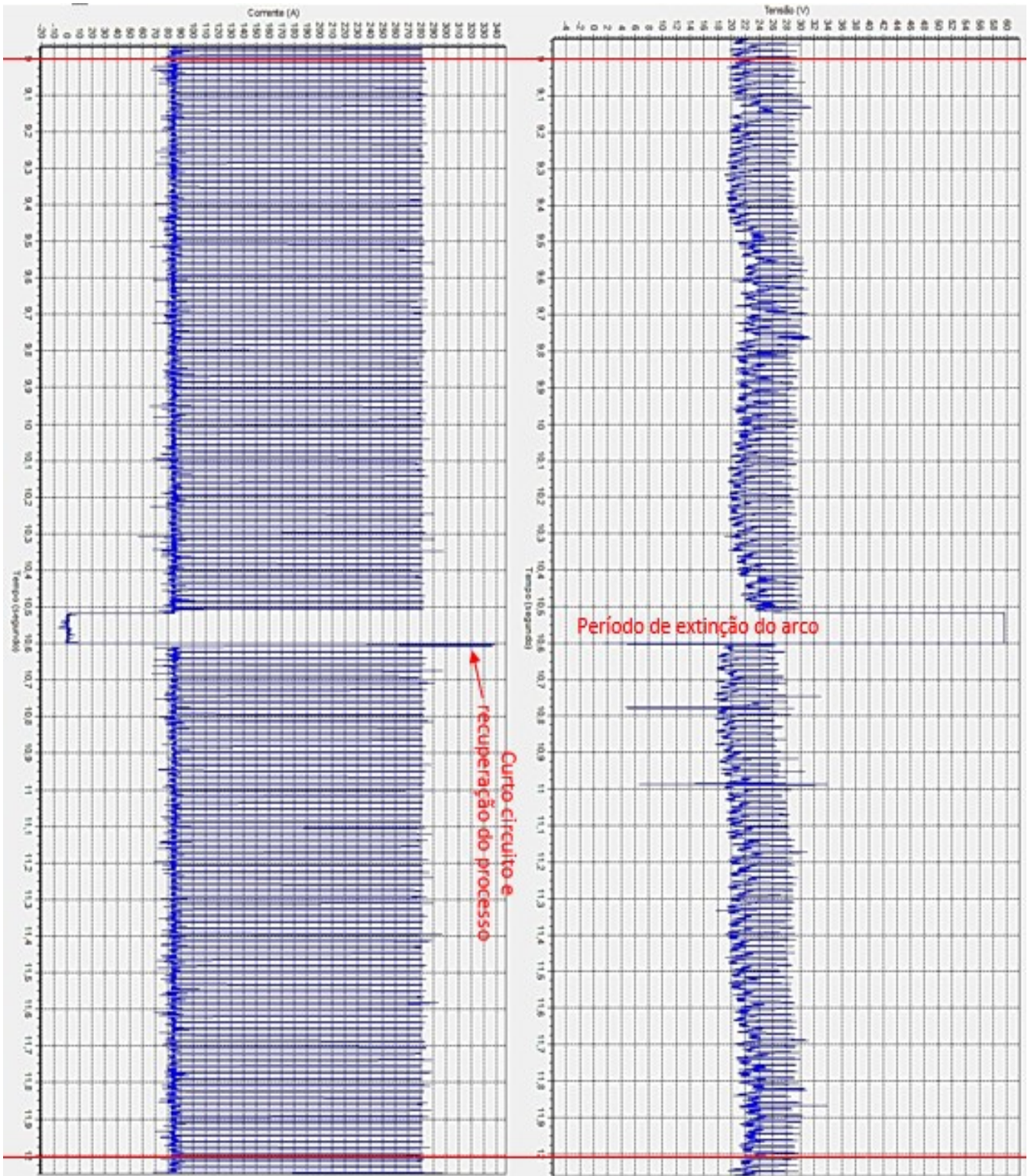


Figura 9.20: Gás 4%CO₂ – 85A – Bx=10 mT. Duas bobinas



Figura 9.21: Soldagens GMAW pulsada. Sem oscilação do arco

Soldagem sobre chapa – 18%CO₂
– Bx=2,8 mT. Uma bobina.



Soldagem sobre chapa – 4%CO₂ –
55A – Bx=2,8 mT. Uma bobina.

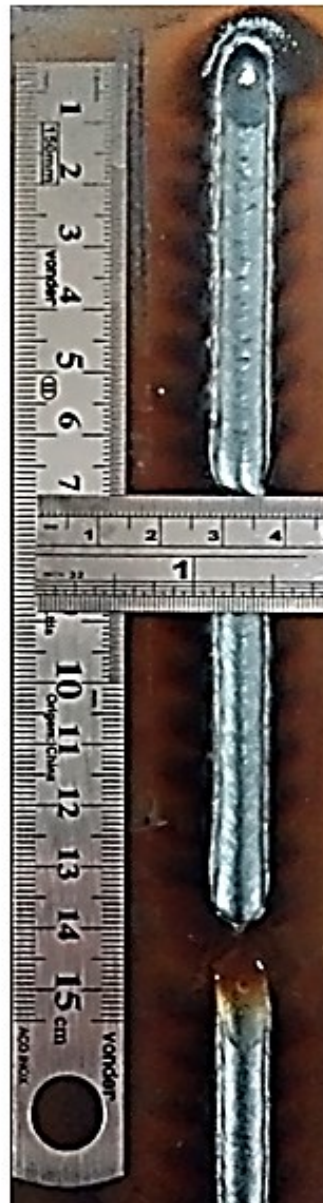


Figura 9.22: Soldagens GMAW pulsada. Com oscilação do arco Bx=2,8 mT

Soldagem sobre chapa – 4%CO₂
– 55A - Bx=9,9 mT. Duas



Soldagem sobre chapa – 4%CO₂
– 65A - Bx=9,9 mT. Duas



Soldagem sobre chapa – 4%CO₂
– 85A - Bx=9,9 mT. Duas

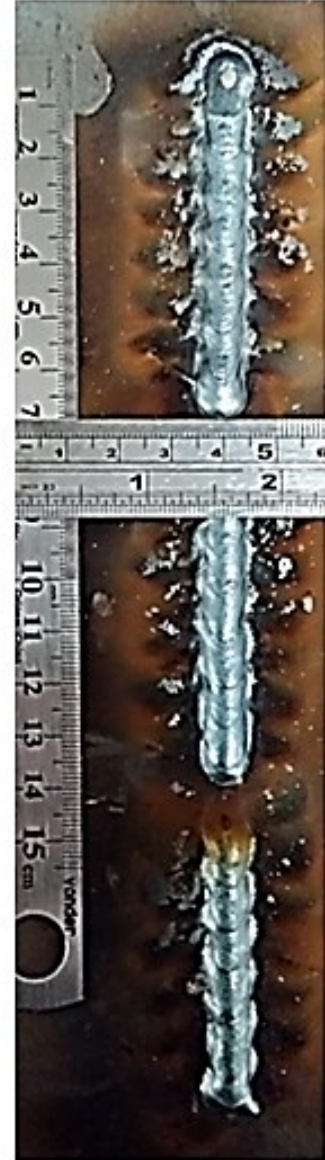


Figura 9.23: Soldagens GMAW pulsada. Com oscilação do arco Bx=10 mT