

THIAGO RESENDE LARQUER

**SINCRONIZAÇÃO DE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA
COM PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2015

THIAGO RESENDE LARQUER

**SINCRONIZAÇÃO DE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA COM PROCESSOS
DE SOLDAGEM A ARCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA - MG
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

L332s Larquer, Thiago Resende, 1985-
2015 Sincronização de oscilação magnética com processos de soldagem a
arco / Thiago Resende Larquer. - 2015.
 191 f. : il.

Orientador: Ruham Pablo Reis.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem elétrica - Teses. 3.
Oscilações - Teses. I. Reis, Ruham Pablo, 1979- II. Universidade
Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Dedico,
Aos meus pais, Hudson e Lenir.
Aos meus irmãos, William e Vitor Hugo.
À minha esposa, Ludiele.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e oportunidade de aprimorar os meus conhecimentos em uma instituição tão renomada.

Ao meu orientador, Ruham Reis, pela oportunidade, confiança, orientação, amizade e incentivo, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho;

À minha esposa Ludiele, pelo apoio, suporte, compreensão, carinho, amizade e motivação em superar dificuldades;

Aos meus pais Hudson e Lenir, aos meus irmãos William e Vitor Hugo, à minha sobrinha Laura, pelo apoio, carinho, compreensão e inspiração;

Aos meus avós, José, Celina e Rita, e a Dona Coraci, pelos ensinamentos, orações, carinho e inspiração;

Ao meu sogro e minha sogra Ednilson e Teresinha, aos meus cunhados Ludimila, Lucas e Rafaela, juntamente com os demais familiares, pelo apoio e carinho;

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU pela oportunidade concedida;

Ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro – IFTM, pela disponibilidade de horário especial para conclusão deste trabalho;

À CAPES/PROEX, à FAPEMIG e ao CNPq pelo suporte financeiro;

Ao Laprosolda/UFU pela disponibilidade física para realização dos experimentos;

Aos Profs Valtair Ferraresi, Louriel Vilarinho e Américo Scotti pelos ensinamentos na área;

Aos colegas Iaroslav Skhabovsky, Darlan Souza e Lucas Alves Nascimento pelo apoio e contribuição direta na realização deste trabalho;

Aos colegas Diandro Fernandes, Luiz Carlos de Menezes Júnior, Edmundo Benedetti Filho, Cleudes Guimarães e Armando Marques, pelo apoio e suporte;

Aos técnicos Lazinho e Ângela Maria da Silva Andrade, pelo apoio e suporte.

LARQUER, T. R. **Sincronização de Oscilação Magnética com Processos de Soldagem a Arco.** 2015. 191 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Atualmente a busca por melhorias de processos e técnicas de soldagem mecanizados/automatizados tem sido intensa devido à escassez de mão de obra qualificada. Nesta linha, a combinação de processos e mesmo de modos operacionais (polaridade e/ou modo de transferência metálica) dentro de um só processo, em adição à possibilidade de combinar níveis de corrente de soldagem, vem ganhando espaço. Por meio dos modos operacionais e/ou dos níveis de corrente, é possível variar a energia do arco (tanto térmica quanto cinética) entregue à peça de trabalho. Combinando este recurso com o movimento do arco, pode-se distribuir a energia do mesmo de forma otimizada para controlar a formação do cordão de solda. Uma forma relativamente simples de controlar o movimento do arco é por meio de oscilação magnética – deflexão do arco elétrico através de um eletroímã. Assim, este trabalho explora a sincronização da oscilação magnética com processos de soldagem a arco de modo a controlar a distribuição da energia do arco sobre a peça. Para tal, foi desenvolvido um sistema de oscilação sincronizada, incluindo hardware e software, para permitir controlar a oscilação magnética e a fonte de soldagem (multiprocesso) de forma sincronizada. Em seguida, foi feita uma caracterização da deflexão (em função da tensão do eletroímã, da corrente e do comprimento do arco de soldagem) baseada em filmagens de alta velocidade. Como forma de explorar a técnica de oscilação magnética sincronizada com diferentes processos de soldagem, foram realizadas duas abordagens, ambas com oscilação do arco transversal à direção de soldagem, e depois comparadas a condições de referência (soldagem sem oscilação e com oscilação não sincronizada). O processo TIG foi sincronizado à oscilação magnética variando o nível de corrente de soldagem de acordo com a posição do arco, tendo como base de análise o efeito sobre o controle da largura dos cordões de solda formados. Já o processo MIG/MAG foi sincronizado à oscilação magnética variando os modos operacionais de soldagem de acordo com a posição do arco, avaliando o efeito sobre o controle da geometria das áreas fundidas dos cordões resultantes. O sistema de oscilação magnética sincronizada demonstrou ser capaz de controlar a formação do cordão tanto na soldagem TIG quanto na MIG/MAG. No caso do TIG sincronizado, foi possível aumentar a largura do cordão do lado com maiores corrente e tempo de parada lateral e vice-versa. Já no caso do MIG/MAG sincronizado, foi possível controlar a geometria da zona fundida formada, podendo-se diminuir a diluição dos cordões resultantes, com pouca variação no reforço superior e ao mesmo tempo com aumento de largura dos cordões e com tendência de maior concentração da penetração nas laterais dos mesmos. Acredita-se que a técnica de oscilação magnética sincronizada com processos de soldagem possa ser explorada visando diversas aplicações, nas quais é importante otimizar a distribuição de energia do arco sobre a peça de trabalho.

Palavras-Chave: Oscilação Magnética, Tecimento, Sincronização, Soldagem a Arco, TIG, MIG/MAG.

LARQUER, T. R. **Synchronization of Magnetic Oscillation with Arc Welding Processes.**
2015. 191 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Currently the search for improvements in processes and mechanized/automated welding techniques has been intense due to the skilled labor shortage. In this line, the combination of processes and even operational modes (polarity and/or metal transfer mode) within a process, in addition to the possibility of combining welding current levels, has gained attention. Through operational modes and/or current levels, the arc energy (both thermal and kinetic) delivered to the workpiece can be changed. By combining this feature with the arc motion, the arc energy can be optimally distributed to control the formation of the weld bead. A relatively simple way to control the arc motion is by magnetic oscillation - deflection of the electric arc by an electromagnet. Thus, this work exploits the synchronization between the arc oscillation and the welding process to control the arc energy distribution on the workpiece. To this end, a synchronized oscillation system, including hardware and software, was devised to enable to control the magnetic oscillation and a multiprocess welding power source synchronously. Then, a characterization of the magnetic arc deflection was carried out (according to the electromagnet voltage, welding current and arc length) based on high-speed filming. In order to exploit the synchronized magnetic oscillation technique with different welding processes, two approaches were executed, both with arc oscillation transverse to the welding direction, and then compared to reference conditions (welding without oscillation and with unsynchronized oscillation). The TIG process was synchronized to the magnetic oscillation varying the level of welding current according to the arc position, being the effect on the control of the weld beads width the basis for analysis. The MIG/MAG process was synchronized to the magnetic oscillation with different welding operational modes according to the arc position, being the effect on the control of the molten zone geometry the basis for evaluation. The synchronized oscillation system was able to control the formation of the weld beads for the TIG as well as for the MIG/MAG welding. In the case of the synchronized TIG, it was possible to increase the weld bead width on the side with higher current and lateral stop time and vice versa. In the case of the synchronized MIG/MAG, it was possible to control the molten zone geometry, besides reduce the dilution of the resulting beads, with little variation in the top reinforcement and at the same time with increasing in the bead widths and with tendency for more side penetration. It is believed that the magnetic oscillation technique synchronized with the welding processes can be exploited in several applications, where it is important to optimize the arc energy distribution on the workpiece.

Keywords: Magnetic Oscillation, Weaving, Synchronization, Arc Welding, GTAW, GMAW.

Lista de Símbolos e Abreviaturas

CI	Círculo Integrado
CMT	<i>Metal cold transfer</i>
DBCP	Distância bico de contato peça
DC	<i>Direct Current</i>
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i>
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i>
DEA	Distância Eletroímã Arco
DEP	Distância Eletrodo Peça
EBSM	<i>Electron Back Scattered Diffraction</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas-Shielded Tungsten Arc Welding</i>
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i>
NI	<i>National Instruments</i>
RMD	<i>Regulated Metal Deposition</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SP-GMAW	<i>Synchronized Polarity – Gas Metal Arc Welding</i>
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
Ti	Titâneo
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TTL	<i>Transistor – Transistor Logic</i>
UTS	<i>Ultimate Tensile Strength</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Deflexão Magnética	23
2.1.1 Características da deflexão magnética	25
2.1.2 Vantagens da oscilação magnética.....	28
2.1.3 Limitações da oscilação magnética.....	30
2.2 Aplicações de deflexão magnética	33
2.2.1 Refinamento de grão.....	33
2.2.2 Controle da geometria do cordão.....	39
2.3 Modos operacionais do processo TIG e MIG/MAG	43
2.3.1 Modos operacionais do processo TIG.....	43
2.3.2 Modos operacionais do processo MIG/MAG	45
2.4 Modelos de deflexão.....	50
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL GERAL, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	53
3.1 Procedimento Experimental Geral e Materiais.....	53
3.2 Equipamentos	54
3.2.1 Fonte de soldagem.....	56
3.2.2 Sistema de aquisição dos sinais elétricos	59
3.2.3 Mesas para movimentação de tochas/corpos de prova	62
3.2.4 Câmera de alta velocidade.....	63
3.2.5 Suporte do eletroímã	63
3.2.6 Sistema de Sincronização	64
3.3 Avaliação do Sistema de Sincronização	75
3.3.1 Avaliação do sincronismo.....	75
3.3.2 Análise da tensão <i>versus</i> corrente do eletroímã	77
CARACTERIZAÇÃO DA DEFLEXÃO DO ARCO.....	80
4.1 Modelo teórico simplificado para deflexão magnética em soldagem TIG	80
4.2 Deflexão magnética experimental em soldagem TIG	84
4.3 Deflexão magnética experimental <i>versus</i> teórica	90
4.4 Avaliação “visual” da capacidade de resposta da deflexão magnética	91
4.5 Avaliação “visual” do sincronismo entre oscilação magnética e corrente de soldagem	92
OSCILAÇÃO MAGNÉTICA SINCRONIZADA COM O PROCESSO TIG	95
5.1 Materiais e equipamentos utilizados na soldagem TIG.....	95
5.2 Parâmetros gerais da soldagem TIG	96
5.3 Grandezas elétricas resultantes da soldagem TIG	100
5.4 Oscilogramas resultantes da soldagem TIG	101
5.5 Imagens dos cordões da soldagem TIG	104
5.6 Medidas relacionadas à largura dos cordões da soldagem TIG	105
5.7 Análise dos parâmetros de largura dos cordões da soldagem TIG	107
5.8 Efeito “visual” da sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem	114
OSCILAÇÃO MAGNÉTICA SINCRONIZADA COM O PROCESSO MIG/MAG	117

6.1 Materiais e equipamentos utilizados na soldagem MIG/MAG.....	117
6.2 Parâmetros gerais da soldagem MIG/MAG	118
6.3 Spray polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-)	119
6.3.1 Parâmetros.....	119
6.3.2 Grandezas elétricas resultantes	121
6.3.3 Oscilogramas e imagens em alta velocidade da soldagem.....	124
6.3.4 Imagens dos cordões	132
6.3.5 Medidas relacionadas à geometria da zona fundida	135
6.3.6 Análise das medidas relacionadas à geometria da zona fundida.....	135
6.4 Spray polaridade positiva (CC+) e Pulsado polaridade positiva (CC+).....	140
6.4.1 Parâmetros.....	140
6.4.2 Grandezas elétricas resultantes	144
6.4.3 Oscilogramas e imagens em alta velocidade da soldagem.....	147
6.4.4 Imagens dos cordões	154
6.4.5 Medidas relacionadas à geometria da zona fundida	157
6.4.6 Análise das medidas relacionadas à geometria da zona fundida.....	158
6.5 Spray polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-) versus Spray polaridade positiva (CC+) e Pulsado polaridade positiva (CC+) ..	163
CONCLUSÕES	165
TRABALHOS FUTUROS	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168
APÊNDICE I	172
Oscilogramas resultantes da soldagem TIG	172
APÊNDICE II	182
Imagens dos cordões da soldagem TIG	182
APÊNDICE III	188
Medidas relacionadas à largura dos cordões da soldagem TIG	188
APÊNDICE IV	189
Medidas relacionadas à geometria da zona fundida dos cordões da soldagem MIG/MAG.....	189
APÊNDICE V	191
Medidas relacionadas à largura dos cordões da soldagem MIG/MAG	191

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes sentidos de deflexão do arco, obtidos através do posicionamento do eletroímã: em (a), campo magnético paralelo/alinhado à direção de soldagem (deflexão transversal/lateral) e em (b), campo magnético transversal à direção de soldagem (deflexão longitudinal)	21
Figura 2. Fluxograma da sequência de execução/apresentação do trabalho	22
Figura 3. Ilustração do campo magnético e as forças radias numa coluna de arco de soldagem (REIS et al., 2011)	23
Figura 4. Ilustração do oscilador magnético desenvolvido por Greene (1960).....	24
Figura 6. Exemplo de equipamento (eletroímã) comercial para defletir arcos de soldagem (HANGIL, 2012)	25
Figura 7. Força produzida em uma carga elétrica positiva se movendo através de um campo magnético (a direção da força aponta para o sentido oposto se a carga elétrica é negativa, se os polos magnéticos são invertidos ou se a velocidade aponta para o sentido oposto ao indicado) (REIS, 2009)	26
Figura 8. Esquema de como a deflexão de um arco elétrico ocorre na presença de um campo magnético externo (REIS, 2009).....	27
Figura 9. Ilustração de um arco longo defletido por um campo magnético externo (REIS, 2009).....	28
Figura 10. Exemplos de configurações de eletroímãs utilizados como osciladores de arco (AP AUTOMATION, 2009)	29
Figura 11. Formas de arco diversas geradas utilizando o eletroímã (c) da Figura 10 (AP AUTOMATION, 2009)	29
Figura 12. Controlador e eletroímã comerciais (HANGIL INDUSTRY, 2012).....	29
Figura 13. Controlador e eletroímã comerciais para até 600 Gauss (JETLINE ENGINEERING, 2012)	30
Figura 14. Exemplo de interrupção de arco em soldagem MIG/MAG Duplo Arame (UEYAMA et al, 2005)	31
Figura 15. Extinção de arco TIG (corrente de soldagem = 50 A; comprimento de arco = 10 mm) (REIS et al., 2012).....	32
Figura 16. Relação entre corrente de soldagem e resistência à extinção de arcos TIG (REIS et al., 2012)	32
Figura 17. Relação entre comprimento de arco, corrente de soldagem e resistência à extinção de arcos TIG (REIS et al., 2013)	33
Figura 18. Efeito da frequência (para diferentes amplitudes) de oscilação do campo magnético - corrente de 80 A e velocidade de soldagem de 230 mm/min: (a) UTS (Limite de Resistência a Tração), (b) <i>yield strength</i> (limite de escoamento), (c) <i>percent elongation</i> (porcentagem de deformação) e (d) micro dureza (KUMAR et al., 2008)	34
Figura 19. Efeito da amplitude (para diferentes frequências) de deflexão do arco - corrente de 80 A e velocidade de soldagem de 230 mm/min: (a) UTS (limite de resistência a tração), (b) <i>yield strength</i> (limite de escoamento), (c) <i>percent elongation</i> (porcentagem de deformação) e (d) micro dureza (KUMAR ET AL., 2008)	35
Figura 20. Padrão de deflexão circular do arco realizado através de um sistema de deflexão magnética (<i>Cyclomatic 90A control, 4613A magnetic probe</i>) (LIM at al., 2010b)	36

Figura 21. Microestruturas obtidas a partir da aplicação da técnica EBSD: (a) sem deflexão, (b) com deflexão (7 Hz), (c) orientações dos grãos e (d) tamanho dos grãos (LIM at al., 2010a)	37
Figura 22. Vistas superiores de (a) cordão sem deflexão com elevado aporte térmico - grãos colunares; (b) cordão sem deflexão com menor aporte térmico - grãos colunares menores; (c) cordão com deflexão transversal - grãos similares a (b) mas com linha de soldificação central menos evidente; (d) cordão com deflexão de 45º (em relação à direção de soldagem) - grãos finos equiaxiais e “sem” linha de soldificação central (FASCHING et al., 1997)	38
Figura 23. Macrografias de soldas TIG realizadas em Ti sendo (a) vista superior sem deflexão; (b) vista superior com deflexão; (c) vista longitudinal sem deflexão; (d) vista longitudinal com deflexão; (e) vista transversal sem deflexão; (f) vista transversal com deflexão (SUNDARESAN e RAM, 1999)	39
Figura 24. Efeito do aumento da amplitude do campo magnético na geometria do cordão: (a) largura e; (b) penetração (CHEN et al., 1990)	40
Figura 25. Parâmetros da curva de alimentação do eletroimã utilizada por Chen et al. (1990), onde: tw = weaving time, td = dwell time, fb = field bias, fa = field amplitude, T = time	40
Figura 26. Deflexão magnética em passe de raiz: (a) sem deflexão; (b) deflexão em 20 Hz; (c); deflexão em 10 Hz; (d) deflexão em 5 Hz (BRACARENSE e SOARES, 2010)	41
Figura 27. Deflexão magnética sobre chapa: (a) sem deflexão; (b) deflexão em 20 Hz; (c) deflexão em 10 Hz; (d) deflexão em 5 Hz (BRACARENSE e SOARES, 2010)	42
Figura 28. Lógica de sincronismo para a técnica SP-GMAW (DUTRA et al., 2013) .	43
Figura 29. Forma de onda para corrente pulsada, onde se parametriza: corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b) (VILARINHO, 2013)	44
Figura 30. Modos operacionais de soldagem TIG (Adaptado de AWS, 2004)	45
Figura 31. Onda quadrada sobreposta em um sinal senoidal (MILLER ELECTRIC MFG. CO., 2013).....	45
Figura 32. Modos de transferência naturais e controlados, segundo classificação proposta no IIW (VILARINHO, 2007)	47
Figura 33. Oscilograma representativo com valores típicos de tensão e corrente para o processo MIG/MAG na transferência por curto circuito em função do comportamento da gota (SCOTTI et al., 2012)	48
Figura 34. Mapa de transferência didática (VILARINHO, 2007)	49
Figura 35. Resultados de deflexão magnética do arco calculada e experimental – efeitos da densidade de fluxo magnético aplicado externamente na deflexão do arco para várias correntes de soldagem (KANG e NA, 2002)	51
Figura 36. Resultados de deflexão magnética do arco calculada e experimental – efeitos da densidade de fluxo magnético aplicado externamente na deflexão do arco para vários comprimentos de arco (KANG e NA, 2002)	52
Figura 37. Modelo de deflexão/interação magnética para MIG/MAG Duplo-Arame (UEYAMA et al., 2007)	52
Figura 38. Bancada experimental principal utilizada, sendo 1 - Software de controle; 2 -Computador de controle da mesa de coordenadas; 3 - Fonte de tensão ajustável DC; 4 - Sistema de controle do eletroímã; 5 - Tocha com suporte e eletroímã; 6 - Fonte de Soldagem DIGIPlus A7 da IMC Soldagem; 7 - Alimentador de arame-	

eletrodo STA-20 da IMC Soldagem; 8 - Sistema de aquisição de dados; 9 - Sistema de fixação do corpo de prova; 10 - Mesa de coordenadas.....	55
Figura 39. (a) Fonte de soldagem DIGIPlus A7 da IMC Soldagem, onde: (a) modelo comercial atual (IMC, 2012); (b) fonte utilizada - fonte antiga atualizada pela IMC Soldagem	56
Figura 40. Conector de controle externo (VIA I/O) da fonte de soldagem DIGIPlus A7	57
Figura 41. Alimentador de arame-eletrodo STA-20 da IMC Soldagem, onde (a) modelo comercial atual; (b) alimentador utilizado - alimentador antigo atualizado pela IMC Soldagem.....	58
Figura 42. Condicionador de sinais (para aquisição do sinal de tensão do eletroímã foi necessária outra unidade desta)	59
Figura 43. (a) Placa de aquisição modelo NI USB-6009; (b) Detalhamento dos terminais de entrada e saída do módulo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014)	60
Figura 44. Painel frontal do <i>software</i> de aquisição de dados	60
Figura 45. Programa para aquisição de dados.....	61
Figura 46. Mesa de coordenadas utilizada para o processo TIG	62
Figura 47. Mesa de movimentação linear utilizada para o processo MIG/MAG	63
Figura 48. Exemplo de suporte de eletroímã comercial (HANGIL, 2012)	64
Figura 49. Suporte construído para o eletroímã	64
Figura 50. Esquema simplificado do sistema de sincronização entre deflexão magnética do arco e processo de soldagem	65
Figura 51. Circuito de controle do eletroímã, cuja alimentação provém da placa de aquisição/controle e da fonte DC	65
Figura 52. Fonte de tensão DC modelo MPL-3305M Minipa	66
Figura 53. Conexão de resistores <i>pull-up</i> nas saídas da placa de aquisição	66
Figura 54. Circuito ponte H.....	68
Figura 55. Placa de controle do eletroímã, sendo: 1 - Resistores 470 Ω ; 2 - CI Acoplador Óptico 4N25; 3 - Resistores 1 k Ω ; 4 - Transistores NPN BC546; 5 - Resistores 220 Ω ; 6 - CI L293D (VE = Tensão do Eletroímã)	68
Figura 56. Versões do <i>software</i> para controle do eletroímã: (a) versão α e (b) versão β	69
Figura 57. Formato de onda para versão α do <i>software</i> para controle do eletroímã - situação de oscilação transversal do arco (Vs = velocidade de soldagem)	69
Figura 58. Programação em LabVIEW® da versão α do <i>software</i> de controle do eletroímã	71
Figura 59. Primeira estrutura <i>case</i> da programação da versão α do <i>software</i> de controle do eletroímã, em (a) retorna para a saída o valor atual da variável, (b) zera a variável.....	72
Figura 60. Segunda estrutura <i>case</i> da programação da versão α do <i>software</i> de controle do eletroímã (neste caso, o programa esta executando a configuração corresponde a posição “Direita”)	72
Figura 61. Formato de onda para versão β do <i>software</i> para controle do eletroímã - situação de oscilação longitudinal do arco (Vs = velocidade de soldagem)	73
Figura 62. Programação em LabVIEW® da versão β do <i>software</i> de controle do eletroímã	74
Figura 63. Formatos de onda (amplitude <i>versus</i> tempo em segundos) obtidos para análise do sincronismo entre os sinais de tensão do eletroímã e corrente de	

soldagem, sendo: (a) - sinais do ensaio 1 da Tabela 5; (b) - sinais do ensaio 2 da Tabela 5 e (c) - sinais do ensaio 3 da Tabela 5.....	76
Figura 64. Osciloscópio Tektronix modelo TPS2014 utilizado para medição da corrente do eletroímã	77
Figura 65. Oscilogramas (<i>prints</i>) dos sinais de tensão e corrente do eletroímã, onde: (a) tempo que a corrente leva para subir; (b) tempo que a corrente leva para cair (cada divisão da escala de tempo equivale a 25 ms)	78
Figura 66. Oscilogramas (<i>prints</i>) dos sinais de tensão e corrente do eletroímã, onde: (a) tempo de parada de 50 ms; (b) tempo de parada de 10 ms (cada divisão da escala de tempo equivale a 25 ms)	78
Figura 67. Oscilogramas (<i>prints</i>) dos sinais de tensão e corrente do eletroímã para tempos de parada de 100 ms, onde: (a) tensão de 10 V; (b) tensão de 15 V; (c) tensão de 20 V (cada divisão da escala de tempo equivale a 50 ms)	79
Figura 68. Esquema do arco TIG com campo magnético externo	80
Figura 69. Em (a) medição do campo magnético abaixo do eletrodo, (b) gaussímetro utilizado nas medições de campo magnético	84
Figura 70. Resultado gráfico da relação entre a tensão aplicada ao eletroímã e densidade de campo magnético produzida para uma distância entre a face frontal do núcleo do eletroímã e o arco elétrico de 15 mm.....	85
Figura 71. Bancada de ensaios de deflexão magnética em soldagem TIG	86
Figura 72. Ilustração do método de medição da deflexão do arco (as cores das imagens do arco foram invertidas para facilitar a visualização)	86
Figura 73. Exemplo de instabilidade de arco presente em alguns casos (correntes mais baixas e/ou comprimentos de arco mais elevados); imagem de arco defletido no Ensaio 5 da Tabela 7 com quase desconexão com chapa (difícil de perceber na imagem pela quantidade de luz da região do arco próxima à chapa incidindo na câmera)	88
Figura 74. Efeito do campo magnético e da corrente de soldagem na deflexão do arco	88
Figura 75. Efeito do campo magnético e do comprimento de arco na deflexão do mesmo	89
Figura 76. Detalhe do efeito do comprimento de arco na deflexão do mesmo	89
Figura 77. Resultados experimentais <i>versus</i> resultados teóricos para efeito do campo magnético e da corrente de soldagem na deflexão do arco	90
Figura 78. Resultados experimentais <i>versus</i> resultados teóricos para efeito do campo magnético e do comprimento de arco na deflexão do mesmo	91
Figura 79. Alcance máximo do arco para diferentes tempos de parada lateral (200, 50 e 5 ms) (as cores das imagens do arco foram invertidas para facilitar a visualização).....	92
Figura 80. Sequência de imagens do arco para diferentes fases de tensão do eletroímã (campo magnético – nível de deflexão) e de corrente de soldagem demonstrando o sincronismo entre posição do arco (oscilação magnética) e corrente de soldagem (as cores das imagens do arco foram invertidas para facilitar a visualização; sequência de baixo para cima)	94
Figura 81. Montagem de corpos de prova para soldagem TIG (soldagem da esquerda para a direita – oscilação transversal/lateral)	96
Figura 82. Fluxograma dos ensaios realizados com o processo TIG.....	97
Figura 83. Oscilograma referente ao ensaio 3 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética - Tabela 14	101

Figura 84. Oscilograma referente ao ensaio 8 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética - Tabela 14	102
Figura 85. Oscilograma referente ao ensaio 13 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem - Tabela 16	103
Figura 86. Oscilograma referente ao ensaio 18 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem - Tabela 16	103
Figura 87. Aspecto superficial (foto superior) dos cordões de solda obtidos com o processo TIG (espessura da chapa de 3 mm) com linhas centrais correspondendo ao centro do arco sem deflexão (trajetória da ponta do eletrodo)	105
Figura 88. Ilustração de como foram medidos os parâmetros de largura dos cordões resultantes da soldagem TIG	106
Figura 89. Largura total dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A	107
Figura 90. Largura esquerda dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A	108
Figura 91. Largura direita dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A	109
Figura 92. Largura total dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A	110
Figura 93. Largura esquerda dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A	112
Figura 94. Largura direita dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A	113
Figura 95. Aspecto superficial dos cordões resultantes dos ensaios 23 (a) e 24 (b) da Tabela 20	115
Figura 96. Aspecto superficial do cordão e marcas de atuação das diferentes capacidades de fusão do arco (iguais nas laterais, mas diferente no centro do cordão) em cada posição da oscilação sincronizada resultantes do ensaio 25 da Tabela 20	116
Figura 97. Montagem de corpos de prova para soldagem MIG/MAG (oscilação transversal/lateral - os corpos de prova foram montados afastados 1 mm acima do suporte para deixar a configuração mais propensa à penetrações elevadas)	118
Figura 98. Posição das secções transversais para medições dos parâmetros relacionados à geometria da zona fundida resultante da soldagem MIG/MAG (a linha de referência foi traçada no final do cordão de solda).....	119
Figura 99. Fluxograma dos ensaios realizados com o processo MIG/MAG para combinação Spray (CC+) e Corrente Constante (CC-)	120
Figura 100. Oscilograma e imagem da configuração Spray polaridade positiva (CC+) sem oscilação, referente ao ensaio 1 da Tabela 22	125
Figura 101. Oscilograma e imagem da configuração Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central), referente ao ensaio 2 da Tabela 24 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz) ..	126

Figura 102. Oscilograma e imagem da configuração Spray na polaridade positiva (CC+)	referente ao ensaio 3 da Tabela 24 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)	127
Figura 103. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 4 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)	128	
Figura 104. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 5 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz) ..	129	
Figura 105. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 6 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz) ..	130	
Figura 106. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 7 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)	131	
Figura 107. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação, referente ao ensaio 8 da Tabela 26	132	
Figura 108. Aspecto superficial (foto superior), acompanhada da respectiva macrografia típica (espessura da chapa de 3 mm), dos cordões de solda obtidos com o processo MIG/MAG em modo Spray polaridade positiva (CC+) e modo CC-	134	
Figura 109. Penetração máxima dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-).	136	
Figura 110. Largura dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-).	137	
Figura 111. Reforço superior dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-).	138	
Figura 112. Área fundida dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-).	139	
Figura 113. Diluição dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-).	140	
Figura 114. Fluxograma dos ensaios realizados com o processo MIG/MAG para combinação Spray (CC+) e modo Pulsado (CC-)	141	
Figura 115. Oscilograma com imagens mostrando o apagamento do arco utilizando soldagem MIG/MAG modo Pulsado nas laterais e no centro	144	
Figura 116. Oscilograma e imagens da configuração modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação, referente ao ensaio 9 da Tabela 33	148	
Figura 117. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo		

Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 10 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)	149
Figura 118. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 11 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz).	150
Figura 119. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 12 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)	151
Figura 120. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 13 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz)	152
Figura 121. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG combinado sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+), referente ao ensaio 14 da Tabela 35 (frequência de pulsação de modos operacionais em 5 Hz)	153
Figura 122. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG combinado sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+), referente ao ensaio 15 da Tabela 35 (frequência de pulsação de modos operacionais em 2,5 Hz)	154
Figura 123. Aspecto superficial (foto superior), acompanhada da respectiva macrografia típica (espessura da chapa de 3 mm), dos cordões de solda obtidos com o processo MIG/MAG em modo Spray polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+)	157
Figura 124. Penetração máxima dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)	159
Figura 125. Largura dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)	160
Figura 126. Reforço superior dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)	161
Figura 127. Área fundida dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)	162
Figura 128. Diluição dos cordões <i>versus</i> tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Possibilidades de modos operacionais de soldagem TIG e/ou MIG/MAG para combinação/sincronização com a oscilação magnética	50
Tabela 2. Características técnicas de fonte de soldagem DIGIPlus A7 (IMC, 2012)	57
Tabela 3. Relação código binário em função do programa/configuração	58
Tabela 4. Seleção do modo operacional e/ou nível de corrente da fonte de soldagem em função da condição da segunda estrutura <i>case</i> da programação da versão a do software de controle do eletroímã	73
Tabela 5. Ensaio de verificação do sincronismo entre os sinais de alimentação do eletroímã e a corrente da fonte de soldagem (soldagem TIG)	75
Tabela 6. Relação entre a tensão aplicada ao eletroímã e densidade de campo magnético produzida para uma distância entre a face frontal do núcleo do eletroímã e o arco elétrico (DEA) de 15 mm.	84
Tabela 7. Ensaios e resultados para avaliação experimental do efeito da corrente de soldagem na deflexão do arco	87
Tabela 8. Ensaios e resultados para avaliação experimental do efeito do comprimento do arco na deflexão do mesmo.....	87
Tabela 9. Testes para avaliação do tempo de resposta da deflexão magnética sincronizada	92
Tabela 10. Parâmetros para demonstração do sincronismo entre oscilação magnética (posição-tempo do arco) e corrente de soldagem	93
Tabela 11. Parâmetros gerais do processo TIG para os ensaios em aço carbono ...	96
Tabela 12. Ensaio com processo TIG em aço carbono com corrente constante e sem oscilação do arco.....	98
Tabela 13. Tempos de parada nas diferentes posições do arco na chapa e frequências de oscilação magnética resultantes	98
Tabela 14. Ensaio com processo TIG em aço carbono com corrente constante e com oscilação magnética	98
Tabela 15. Correntes de soldagem nas diferentes posições de parada do arco na chapa para cada corrente média utilizada.....	99
Tabela 16. Ensaio com processo TIG em aço carbono com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem (as correntes em cada posição do arco durante a oscilação estão na Tabela 15)	99
Tabela 17. Ensaio com processo TIG em aço carbono com modo de soldagem “pulsado” e sem oscilação magnética (a frequência de pulsação e os níveis de corrente utilizados foram os mesmos apresentados nas Tabela 13 e Tabela 15 – duas frequências de pulsação e três níveis de corrente em sequência)	100
Tabela 18. Grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo TIG.....	100
Tabela 19. Parâmetros de largura dos cordões resultantes da soldagem TIG	106
Tabela 20. Ensaio para demonstrar efeito “visual” da sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem (frequência de oscilação = 1 Hz; tensão do eletroímã = 30 V).....	114
Tabela 21. Parâmetros gerais do processo MIG/MAG para os ensaios em aço carbono	118
Tabela 22. Soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) sem oscilação	120

Tabela 23. Tempos de parada nas diferentes posições do arco na chapa para cada frequência de oscilação magnética na soldagem MIG/MAG	120
Tabela 24. Soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central)	121
Tabela 25. Soldagem MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro	121
Tabela 26. Soldagem MIG/MAG com corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação	121
Tabela 27. Grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG com corrente constante em modo Spray na polaridade positiva (CC+) sem oscilação ..	122
Tabela 28. Grandezas elétricas da soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central).....	123
Tabela 29. Grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro	123
Tabela 30. Grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG com corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação	124
Tabela 31. Medidas médias relacionadas à geometria da zona fundida dos cordões resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG em modo Spray com polaridade positiva (CC+) e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-)	135
Tabela 32. Parâmetros da soldagem MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) (transferência metálica de uma gota por pulso).....	142
Tabela 33. Soldagem MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação	142
Tabela 34. Soldagem MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro	142
Tabela 35. Soldagem MIG/MAG combinada sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+)	143
Tabela 36. Grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação	145
Tabela 37. Grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro	146
Tabela 38. Grandezas elétricas resultantes das soldagens MIG/MAG combinadas sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+)	146

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A busca por melhorias de processos e técnicas de soldagem mecanizados/automatizados tem sido pauta no meio industrial já algum tempo, mas de forma ainda mais recorrente e intensa atualmente pela escassez de mão de obra qualificada (MELLO, 2013; SMITH, 2013). Uma das formas de tentar explorar com mais eficiência (produtividade) os processos de soldagem de forma mecanizada/automatizada atualmente tem sido através da combinação de processos (abordagem híbrida) e mesmo de modos operacionais (polaridade e/ou modo de transferência metálica) dentro de um só processo, em adição à possibilidade de combinar níveis de corrente de soldagem.

Especificamente no caso da combinação de modos operacionais (possível com fontes mais modernas) e de níveis de corrente, em uma mesma operação de soldagem é possível variar a energia do processo, tanto térmica (calor entregue à peça) quanto mecânica (pressão do arco e impacto das gotas, este último no caso de eletrodos consumíveis). Nesta linha, uma abordagem interessante, ainda não muito explorada, mas promissora, é utilizar este recurso para distribuir a energia de soldagem de forma otimizada na peça de trabalho para controlar a formação do cordão (material fundido e depositado). Isto poderia ser feito sincronizando os modos operacionais de soldagem e/ou os níveis de corrente utilizados com a posição do arco/tocha. A posição do arco pode ser variada de forma mecânica (pela movimentação da tocha) ou magnética. A deflexão magnética de arcos (desvio do acoplamento do arco na peça por campos magnéticos externos) é uma técnica relativamente barata e de grande versatilidade. Entretanto, apesar de ter sido idealizada há bastante tempo, este recurso parece não ser muito difundido industrialmente. Talvez isso se dê pelo fato da técnica ter sido concebida em uma época em que a preocupação com produtividade era ofuscada por muitos problemas operacionais da soldagem. Por algum motivo, mesmo com a grande evolução alcançada dos processos de soldagem e, consequente, demanda por recursos que permitam explorar o potencial destes processos (possibilidade de elevada produtividade e qualidade), esta técnica parece ser subutilizada.

A oscilação magnética é composta por uma série de deflexões magnéticas (movimento “pendular” do arco quando sujeito a um campo magnético variável e/ou alternado). Posicionado/montado o eletroímã em relação ao arco/tocha de soldagem e, assim, definida a

direção das linhas de fluxo magnético (longitudinal para oscilação lateral/transversal e transversal para oscilação longitudinal), a extensão do movimento do arco em cada posição depende do nível de campo magnético aplicado e o tempo de permanência nesta posição depende do tempo de aplicação do campo magnético. O sentido de deflexão (esquerda e direita ou à frente e atrás em relação ao vetor velocidade de soldagem – Figura 1) depende do sentido das linhas de fluxo magnético produzidas pelo eletroímã; a inversão de posições/sentido de deflexão se dá pela inversão do sinal de controle (tensão/corrente) do eletroímã.

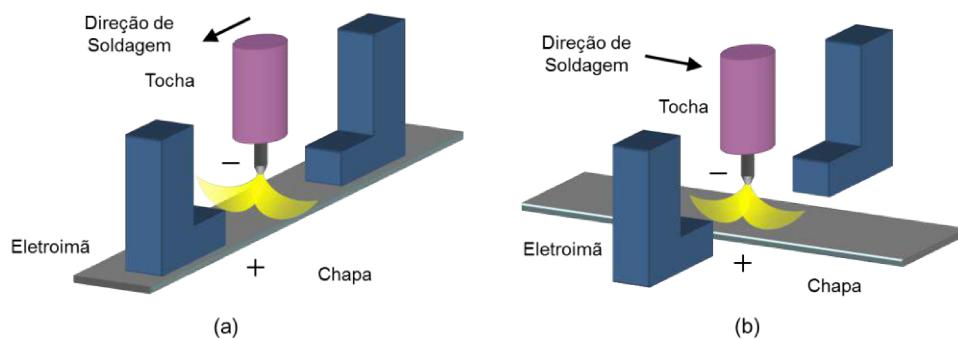


Figura 1. Diferentes sentidos de deflexão do arco, obtidos através do posicionamento do eletroímã: em (a), campo magnético paralelo/alinhado à direção de soldagem (deflexão transversal/lateral) e em (b), campo magnético transversal à direção de soldagem (deflexão longitudinal)

Assim, neste trabalho se propõe justamente explorar melhor o potencial da oscilação magnética do arco por uma abordagem inovadora. O objetivo geral é sincronizar a oscilação magnética com processos de soldagem a arco (modos operacionais e/ou níveis de correntes) e avaliar a potencialidade desta técnica para controlar/modificar os resultados da soldagem, mais especificamente em termos de geometria externa e interna dos cordões produzidos. Com a sincronização proposta seria possível escolher a energia térmica e cinética do arco (modo e/o nível de corrente de soldagem) para cada posição (combinações de arco à esquerda, à direita e no centro ou de arco à frente, atrás e no centro em relação ao vetor velocidade de soldagem), sendo a definição da posição (lateral/transversal, longitudinal ou central) e do tempo de aplicação destas energias em cada posição controlados pelo formato de onda (amplitudes e tempos) do sinal de tensão/corrente aplicado ao eletroímã.

Como exemplos de aplicações motivadoras para o desenvolvimento da sincronização de oscilação magnética com processos de soldagem a arco tem-se a possibilidade de atuar de forma diferenciada na geometria dos cordões de solda (zona fundida e zona afetada pelo calor), no controle do tamanho do grão da solda visando melhoria das propriedades

resultantes (minimizando trincas de solidificação), no controle da poça de fusão para soldagem fora de posição (evitando escorramento do metal fundido), para soldagem de chanfros estreitos e passes de raiz.

Para atingir o objetivo geral, têm-se as etapas/objetivos específicos listados a seguir, cuja sequência de execução é resumida na Figura 2.

- A utilização de um eletroímã robusto aplicável a arcos dos processos TIG e MIG/MAG;
- A construção de um sistema (hardware e software) de sincronização da deflexão magnética com os processos de soldagem;
- A caracterização da sincronização entre deflexão e processo de soldagem;
- A utilização da oscilação magnética sincronizada com variações (modos operacionais e/ou níveis de corrente) do processo TIG;
- A utilização da oscilação magnética sincronizada com variações (modos operacionais e/ou níveis de corrente) do processo MIG/MAG.

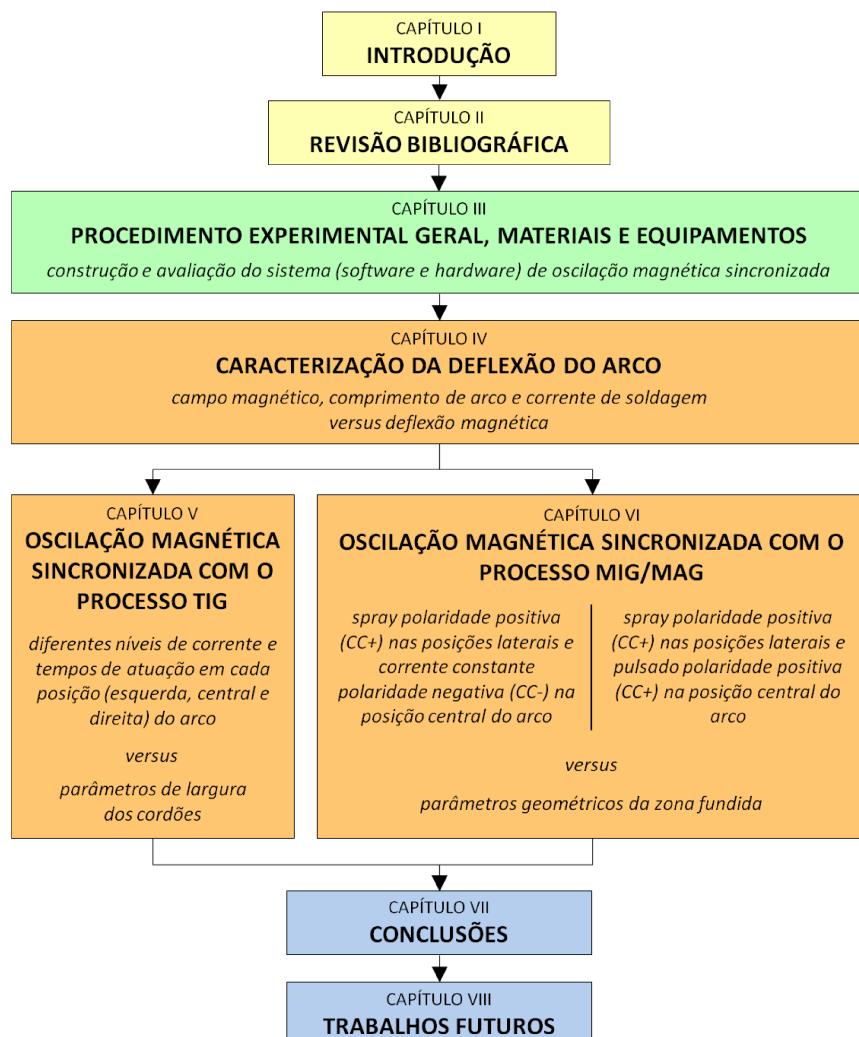


Figura 2. Fluxograma da sequência de execução/apresentação do trabalho

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Deflexão Magnética

Campos magnéticos são intrínsecos à soldagem a arco elétrico. Como amplamente difundido (LANCASTER, 1986; RICHARDSON, 1989; SCOTTI e PONOMAREV, 2008), o campo magnético auto induzido é a base para a formação do jato de plasma, o qual tem efeitos benéficos na penetração do cordão de solda, por exemplo. De acordo com Scotti e Ponomarev (2008) o surgimento do jato de plasma ocorre devido à corrente passando através do plasma e ao seu próprio campo magnético, onde surgem forças radiais no sentido do centro da coluna de plasma (Força de Lorentz), que, por agirem circunferencialmente em cada seção transversal do arco, exercem uma pressão em cada elemento de área. Como as colunas típicas de arcos de soldagem tomam a forma de tronco-cônica (Figura 3), surge uma maior pressão eletromagnética na região restrita e menor na região mais larga da coluna de plasma. Esta diferença de pressão eletromagnética provoca o deslocamento do gás ionizado na direção de menor pressão.

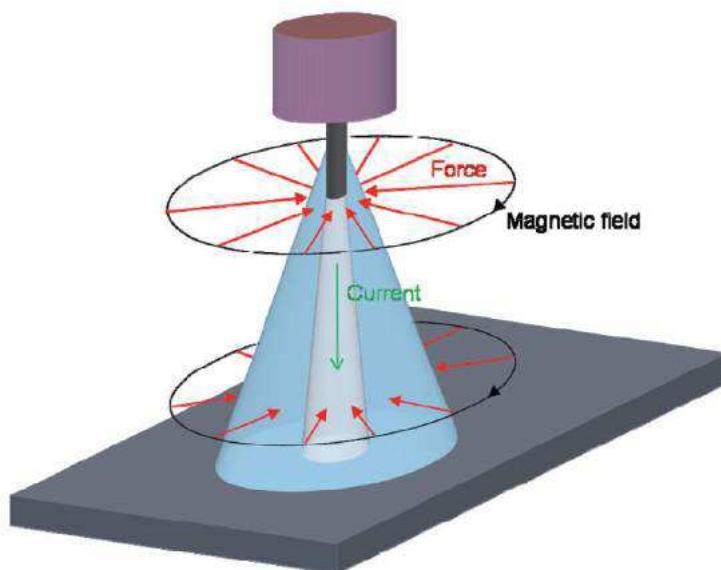


Figura 3. Ilustração do campo magnético e as forças radiais numa coluna de arco de soldagem (REIS et al., 2011)

Já campos magnéticos externos podem ser usados para oscilar arcos, substituindo dispositivos mecânicos em operações de revestimento, por exemplo. A idéia de usar campos magnéticos para oscilar arcos de soldagem não é nova, foi idealizada e patenteada por Greene em 1960 (GREENE, 1960) (Figura 4). Marques utilizou a técnica em 1984 (Figura 5).

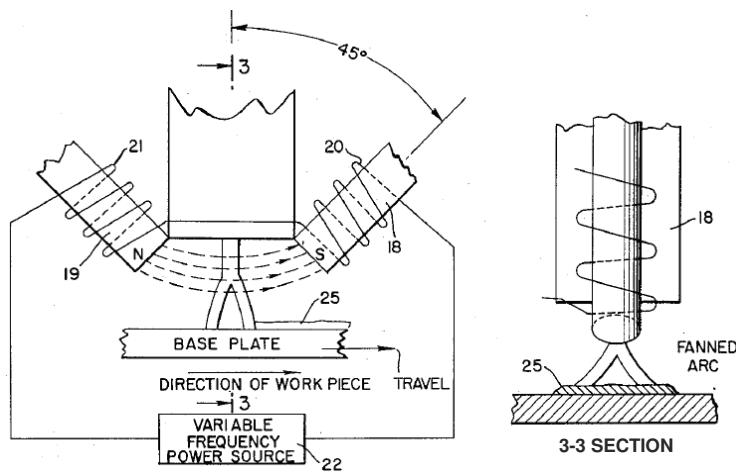


Figura 4. Ilustração do oscilador magnético desenvolvido por Greene (1960)

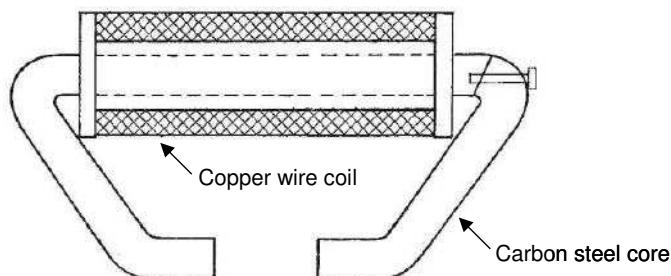


Figura 5. Dispositivo desenvolvido por Marques (1984) para oscilação magnética do arco

Atualmente já existem, mesmo que pouco divulgado e aplicado, sistemas comerciais para oscilar magneticamente arcos de soldagem (Figura 6) e fontes de corrente alternada são usadas para controlar a oscilação. Recomendações gerais para construção de eletroímãs para deflexão de arcos de soldagem são dadas por Blunt e Ribton (2000).



Figura 6. Exemplo de equipamento (eletroímã) comercial para defletir arcos de soldagem (HANGIL, 2012)

2.1.1 Características da deflexão magnética

A deflexão magnética de arcos em soldagem pode ocorrer por várias formas. Umas delas seria o sopro magnético (LANCASTER, 1986; HOULDCROFT e JOHN, 1988; REIS et al., 2011). Outra seria a deflexão de arcos na soldagem MIG/MAG Duplo Arame (UEYAMA et al, 2005). E ainda teria o caso da deflexão causada por campos magnéticos externos (KANG e NA, 2002), como aqueles usados em equipamentos para defletir os arcos.

É importante comentar o efeito eletromagnético básico que governa o fenômeno de deflexão magnética. Se uma carga elétrica viaja dentro de um campo magnético, ela será sujeita a uma força magnética de magnitude proporcional à sua velocidade e à intensidade do campo magnético (Figura 7). A direção e sentido da força são determinados pela regra da mão esquerda. Coloca-se o dedo indicador da mão esquerda na direção do campo magnético e o dedo médio na direção da corrente convencional. Neste caso, o polegar, quando orientado perpendicularmente ao dedo indicador, apontará na direção da força a que os elétrons são submetidos (BOYLESTAD, 2004). Uma partícula carregada estacionária ou se movendo paralelamente ao campo magnético não sofrerá ação de forças devido a este campo. Entretanto, um partícula carregada viajando, que não paralelamente, por um campo magnético terá sua direção de movimento modificada (deflexão de sua trajetória).

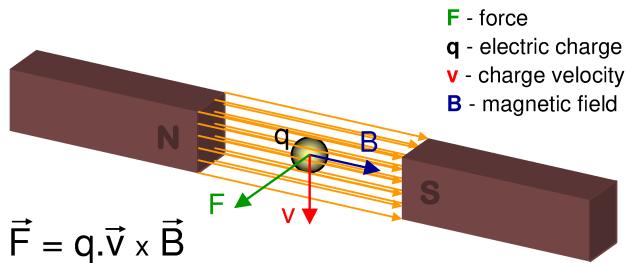


Figura 7. Força produzida em uma carga elétrica positiva se movendo através de um campo magnético (a direção da força aponta para o sentido oposto se a carga elétrica é negativa, se os polos magnéticos são invertidos ou se a velocidade aponta para o sentido oposto ao indicado) (REIS, 2009)

Com a ilustração da Figura 7 em mente, na Figura 8 é mostrado sequencialmente como a deflexão de um arco elétrico pode ser obtida aplicando um campo magnético externo ao mesmo. De acordo com os princípios do eletromagnetismo, um condutor linear na presença de um campo magnético é submetido a uma força proporcional ao comprimento do condutor dentro do campo magnético, à corrente elétrica fluindo através deste condutor e à densidade de fluxo magnético. Assim, em soldagem, de uma forma simplificada, se uma corrente I está fluindo do eletrodo para a peça de trabalho através de um arco elétrico de comprimento L_a e este arco está na presença de um campo magnético B_E (externo produzido por um eletroímã ou por outro arco, por exemplo), uma força F agindo neste arco (perpendicular ao campo magnético e ao fluxo de corrente) é gerada de acordo com a Equação (2.1).

$$F = I \cdot L_a \cdot B_E \quad (2.1)$$

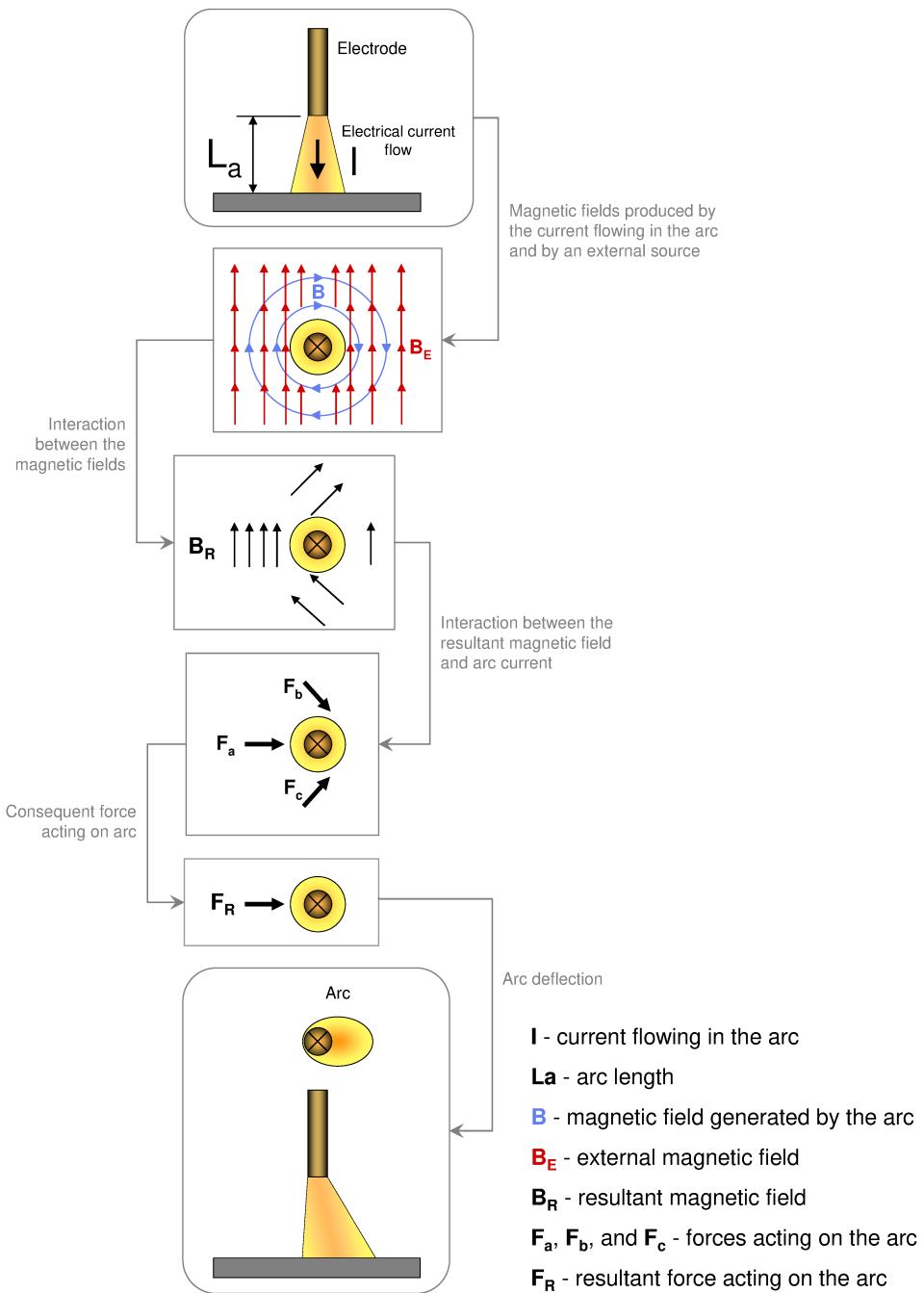


Figura 8. Esquema de como a deflexão de um arco elétrico ocorre na presença de um campo magnético externo (REIS, 2009)

A Figura 9 mostra o comportamento esquemático de um arco longo sujeito a um campo magnético externo. Nesta ilustração as regiões 1 e 2 do arco defletido sugerem regiões com diferentes orientações do arco. Este fenômeno ocorre para evitar que o arco se apague. Na região 1 predomina o efeito do jato de plasma e na região 2 o “caminho natural” dos elétrons para fechar circuito elétrico.

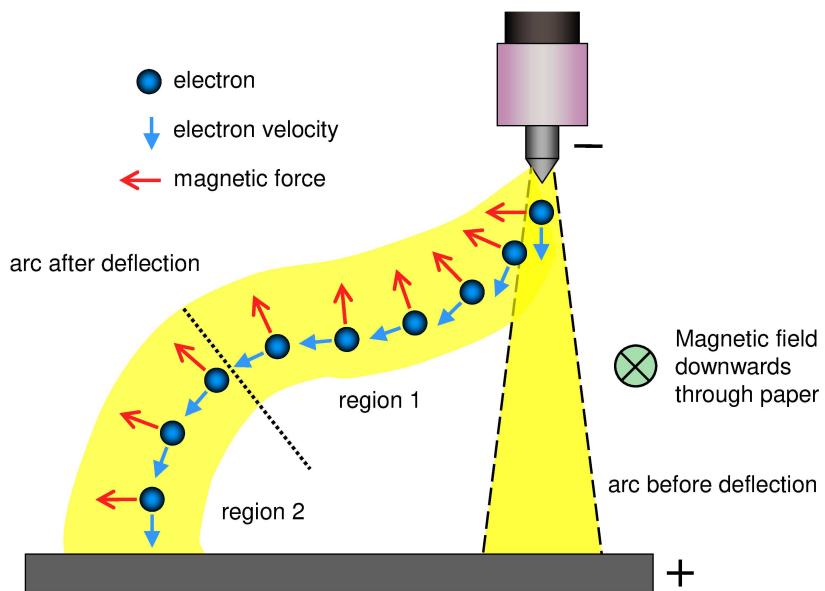


Figura 9. Ilustração de um arco longo defletido por um campo magnético externo (REIS, 2009)

2.1.2 Vantagens da oscilação magnética

Talvez a principal vantagem em se utilizar osciladores magnéticos seja a facilidade virtualmente ilimitada de se criar padrões de deflexão do arco, sejam eles para os lados ou para frente e para trás em relação à direção de soldagem. Como forma de ilustrar a versatilidade possível de ser alcançada com osciladores magnéticos, na Figura 10 são mostrados exemplos de configurações de eletroímãs utilizados. No item (a) é apresentado um eletroímã com apenas uma extensão de núcleo e refrigerado a água para adaptação em tochas convencionais. De acordo com o fabricante (AP AUTOMATION, 2009), este tipo de dispositivo é indicado para soldas de acesso limitado e é usado principalmente para oscilação perpendicular à junta (tecimento) ou para estabilizar o arco. No item (b) é apresentado um eletroímã com duas extensões de núcleo, indicado para uso em tochas TIG para oscilação perpendicular ou ao longo de juntas. Por fim, no item (c) é apresentado um dispositivo com quatro bobinas controladas individualmente; permite a geração de formas de arco variadas e até mesmo “giro” do arco (Figura 11), mas demanda um sistema de controle mais complexo.



(a) (b) (c)
 Figura 10. Exemplos de configurações de eletroímãs utilizados como osciladores de arco (AP AUTOMATION, 2009)

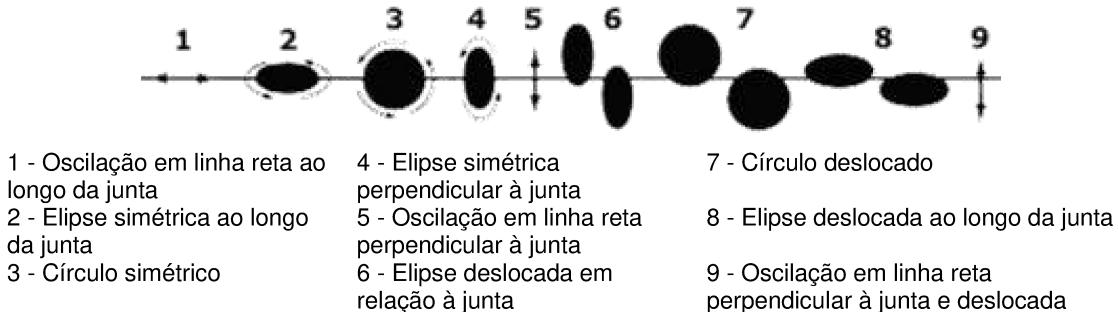


Figura 11. Formas de arco diversas geradas utilizando o eletroímã (c) da Figura 10 (AP AUTOMATION, 2009)

Os fabricantes dos sistemas de oscilação magnéticas apontam diversas aplicações para estes equipamentos. Segundo o fabricante Jetline o Controlador de Arco de Soldagem MAG-8000 (até 50 Hz) fornece um meio preciso e controlável para oscilação, estabilizando ou posicionando o arco de soldagem, controlando a distribuição de calor, minimizando mordeduras, reduzindo porosidades, melhorando a penetração, fornecendo uma fusão uniforme de ambos os lados e melhorando a integridade do cordão. Alguns dispositivos podem, de acordo com dados comerciais, obter oscilações de até 1000 Hz, como o mostrado na Figura 12.



Figura 12. Controlador e eletroímã comerciais (HANGIL INDUSTRY, 2012)

Em termos práticos, a deflexão magnética tem maior facilidade para defletir (oscilar) arcos em maiores frequências de movimentos e com maior precisão (sem problemas de inércia de mecanismos, folgas, etc., típicos de dispositivos mecânicos).

2.1.3 Limitações da oscilação magnética

Apesar da oscilação magnética poder ser utilizada em favor da soldagem, é preciso estar atento a eventuais problemas relacionados ao uso de campos magnéticos junto a arcos elétricos. Ao construir e utilizar um dispositivo para oscilação magnética, Marques (1984) mencionou que o arco pode ser desestabilizado por campos magnéticos muito intensos; na prática, campos magnéticos de até 5 mT (50 Gauss) têm sido usados para desviar arcos de soldagem sem apresentar problemas (KANG e NA, 2002), apesar de fabricantes comercializarem dispositivos para até 600 Gauss (Figura 13). Claro que o que importa é o valor do campo magnético atuando efetivamente no arco.



Figura 13. Controlador e eletroímã comerciais para até 600 Gauss (JETLINE ENGINEERING, 2012)

Talvez a desestabilização do arco na presença de campos magnéticos intensos seja a principal desvantagem do uso de campos magnéticos para defletir arcos de soldagem. Estas instabilidades no arco podem até mesmo levar ao seu apagamento. Problemas com instabilidade e interrupção de arcos em soldagem MIG/MAG Duplo Arame (Figura 14) foram observadas por Ueyama et al. (2005) e por Reis et al. (2008). A principal justificativa para tal fenômeno esta ligada aos campos magnéticos gerados pelos arcos que operam adjacentes um ao outro e à “rigidez” apresentada por estes arcos.

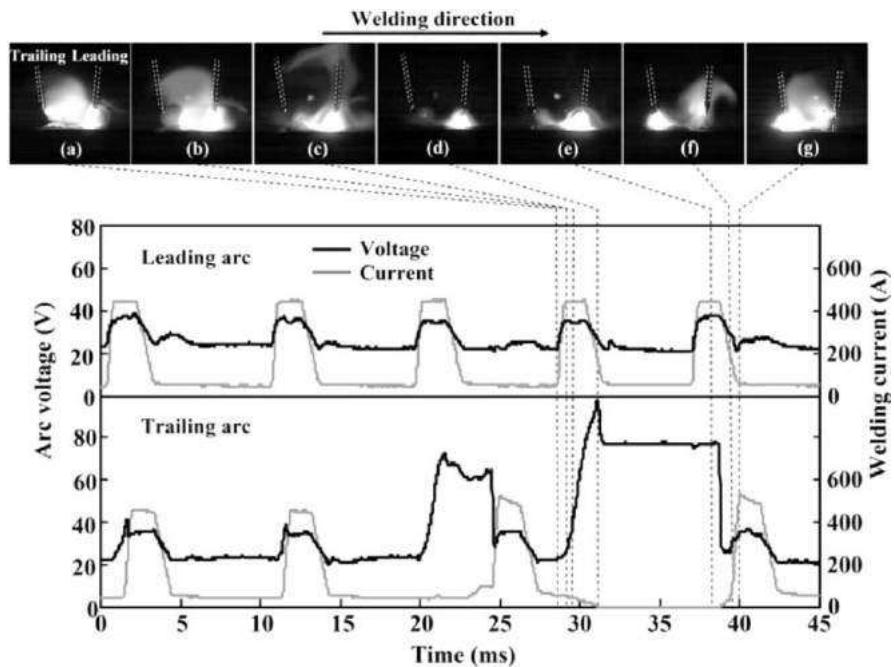


Figura 14. Exemplo de interrupção de arco em soldagem MIG/MAG Duplo Arame (UEYAMA et al, 2005)

Reis et al. (2012) e Reis et al. (2013) estudaram este fenômeno utilizando arcos TIG (Figura 15) e mostram como parâmetros de soldagem (corrente e comprimento de arco, por exemplo) interagem com campos magnéticos aplicados ao arco e podem evitar/provocar seu apagamento (Figura 16 e Figura 17). O conhecimento do fenômeno de instabilidade e extinção dos arcos quando sob os efeitos de campos magnéticos certamente ajudará a explorar melhor a sincronização da oscilação magnética com os processos de soldagem.

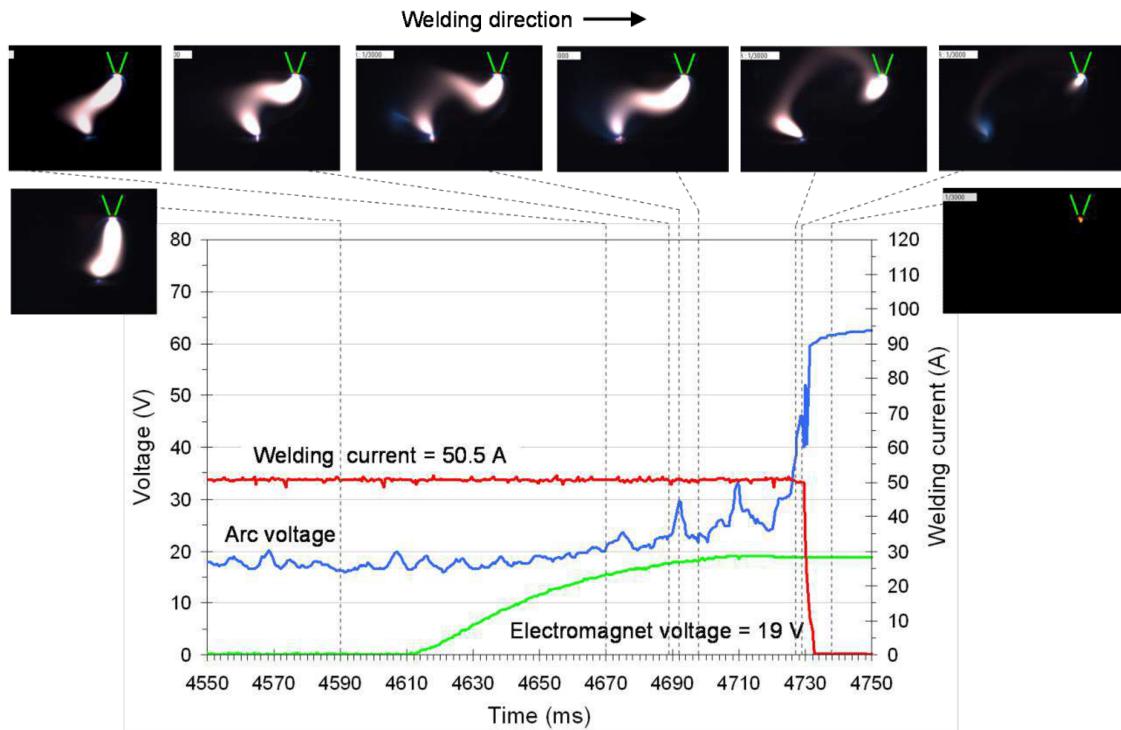


Figura 15. Extinguimento de arco TIG (corrente de soldagem = 50 A; comprimento de arco = 10 mm) (REIS et al., 2012)

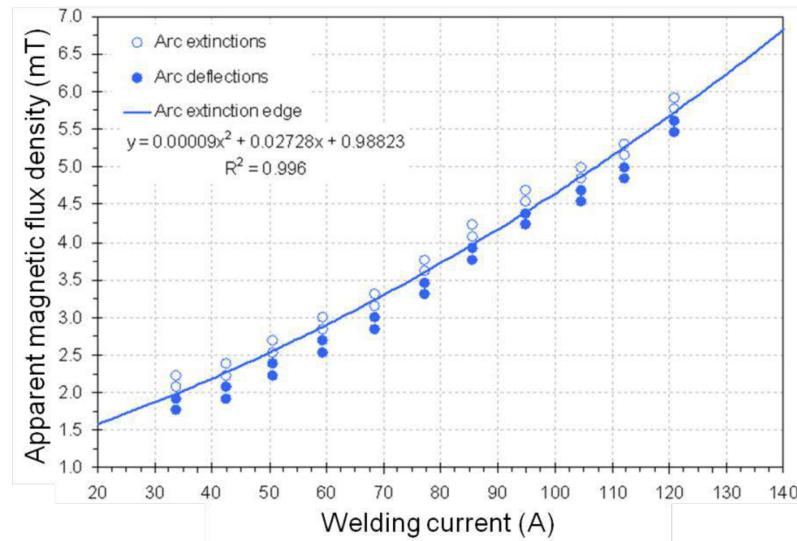


Figura 16. Relação entre corrente de soldagem e resistência à extinção de arcos TIG (REIS et al., 2012)

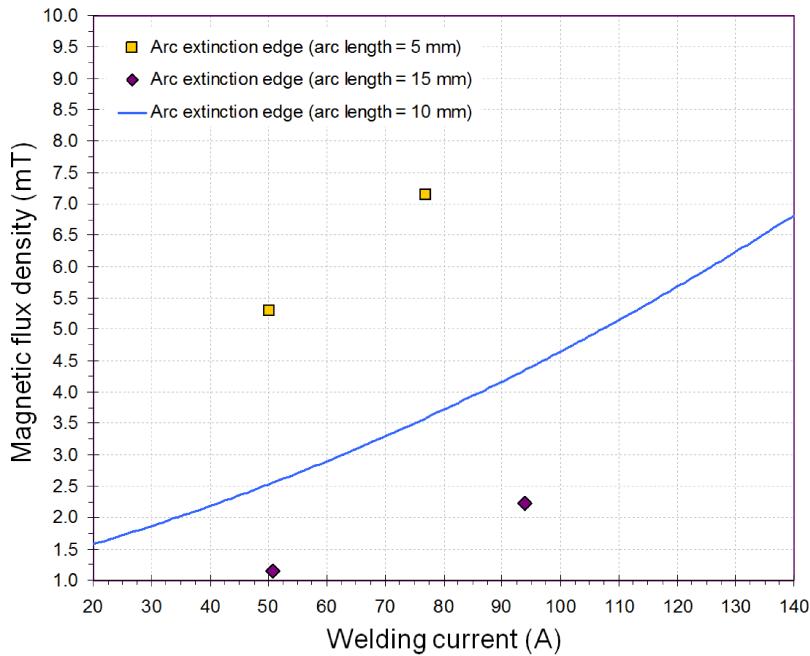


Figura 17. Relação entre comprimento de arco, corrente de soldagem e resistência à extinção de arcos TIG (REIS et al., 2013)

Em termos práticos da deflexão magnética controlada de arcos, podem existir limitações em relação à distância (extenção) de deflexão, já que o arco fica preso em uma extremidade (eletrodo) e “balança” na outra (peça) como um pêndulo.

2.2 Aplicações de deflexão magnética

Vários estudos têm sido conduzidos para explorar as aplicações da deflexão magnética no controle da geometria do cordão e, consequentemente, na mitigação de defeitos, bem como na melhoria de algumas propriedades mecânicas da junta soldada, no refinamento do grão, etc. Alguns destes estudos serão descritos a seguir. Vale ressaltar que nada foi encontrado explorando/estudando a oscilação magnética sincronizada com processos de soldagem.

2.2.1 Refinamento de grão

Kumar et al. (2008) aplicaram o método de Taguchi para otimizar os parâmetros de soldagem com deflexão magnética em ligas de alumínio (utilizando o processo TIG) e analisaram o efeito da frequência e amplitude da deflexão nas propriedades mecânicas do material (Figura 18 e Figura 19). Os resultados demonstraram um refinamento de grão do processo utilizado, comparado com cordões realizados com processos de corrente constante e pulsada. A dureza obtida também foi maior, devido

ao refinamento de grão e a baixa segregação das fases. As análises metalográficas revelaram que o refinamento de grão no centro do cordão resultou na melhoria das propriedades mecânicas do material.

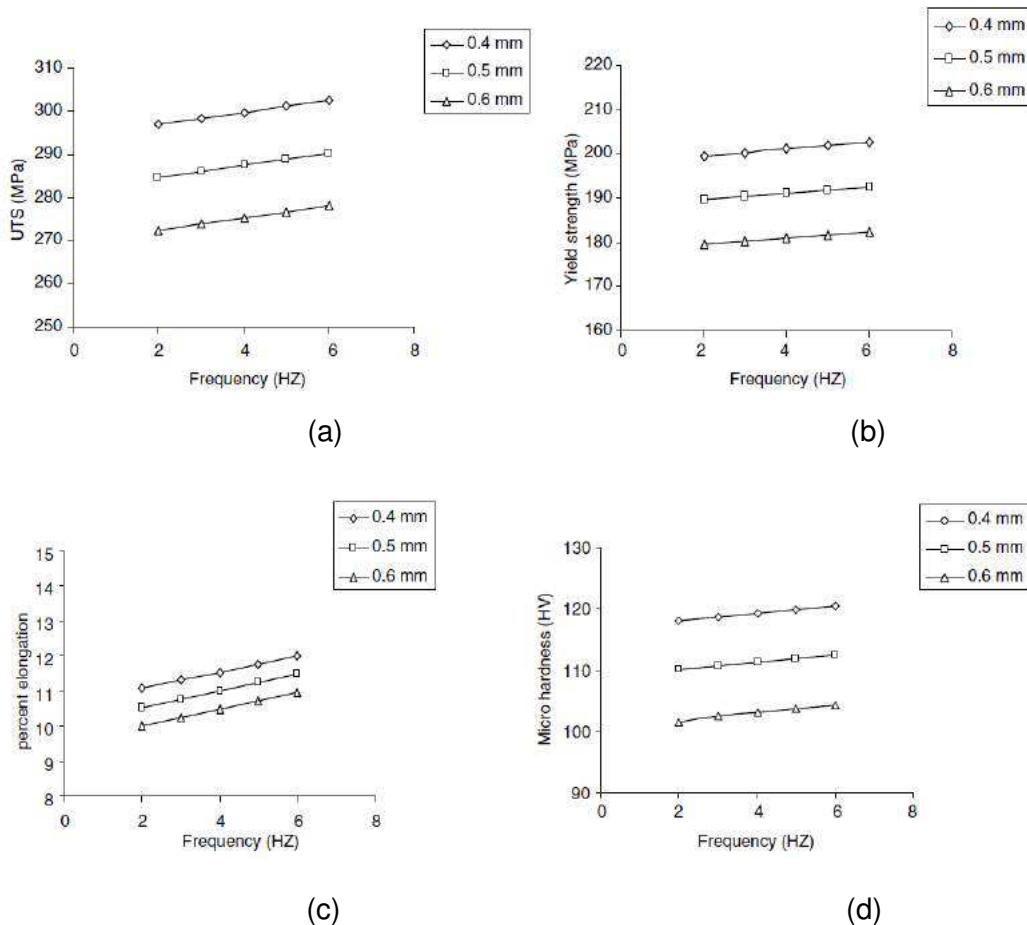


Figura 18. Efeito da frequência (para diferentes amplitudes) de oscilação do campo magnético - corrente de 80 A e velocidade de soldagem de 230 mm/min: (a) UTS (Limite de Resistência a Tração), (b) *yield strength* (limite de escoamento), (c) *percent elongation* (porcentagem de deformação) e (d) micro dureza (KUMAR et al., 2008)

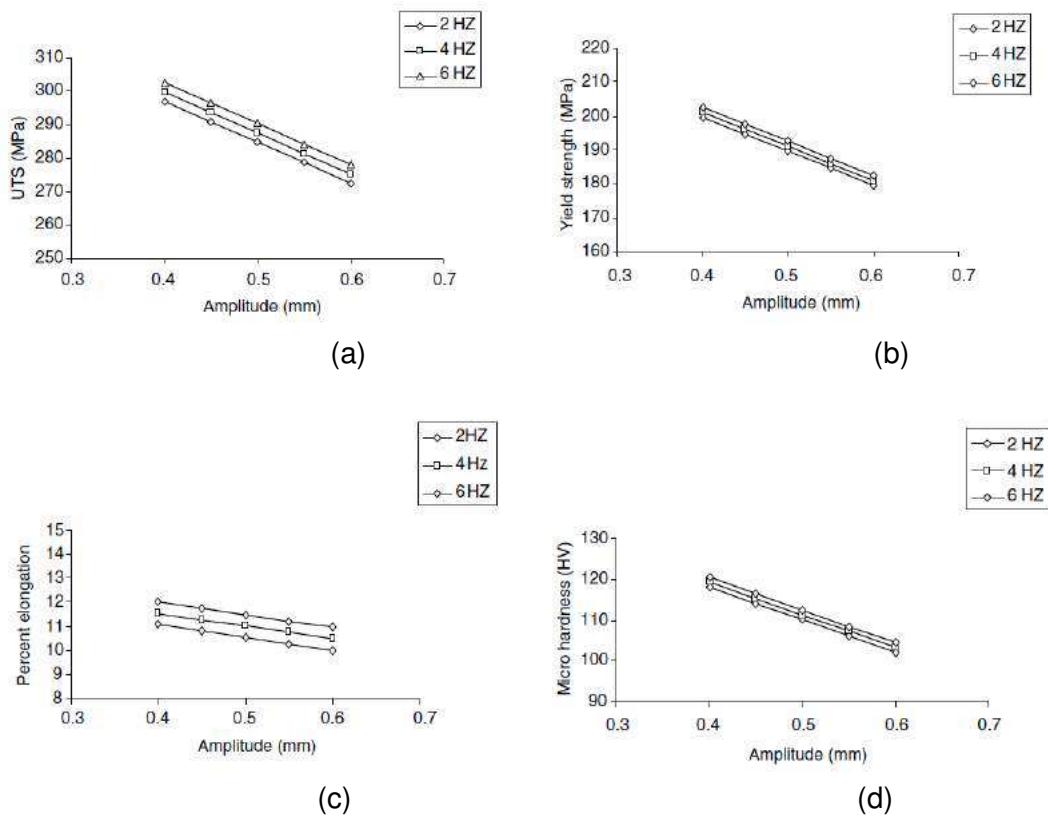


Figura 19. Efeito da amplitude (para diferentes frequências) de deflexão do arco - corrente de 80 A e velocidade de soldagem de 230 mm/min: (a) UTS (limite de resistência a tração), (b) *yield strength* (limite de escoamento), (c) *percent elongation* (porcentagem de deformação) e (d) micro dureza (KUMAR ET AL., 2008)

Também relacionando ao refinamento de grão, Senapati e Mohanty (2014) analisaram a utilização de deflexão magnética para soldagem de aço macio utilizando o processo Arco Submerso. A utilização do campo magnético aumentou a dureza do material, principalmente quando este foi utilizado longitudinalmente à direção de soldagem, assim como provocou um aumento na resistência à tração. Os autores observaram que com a deflexão transversal do arco obteve-se, em geral, um aumento das propriedades mecânicas do material, uma melhor qualidade do cordão e de sua geometria.

Lim et al. (2010a) e Lim et al. (2010b) estudaram o efeito da deflexão magnética no refinamento do grão utilizando o processo TIG (autógeno), em ligas de Inconel 690. Inicialmente as soldas foram realizadas com diversas frequências (1,5 a 50 Hz). Os testes iniciais apontaram para a utilização de frequência de 2, 4, 7 e 8 Hz. Os melhores resultados obtidos foram nas frequências próximas de 7 Hz. Neste estudo, foi utilizada uma deflexão circular do arco de soldagem, conforme mostrado na Figura 20. Pela técnica de *Electron Back Scattered Diffraction* (EBSD), fica evidente o efeito na redução

do tamanho do grão (Figura 21). Sem a deflexão, os resultados obtidos na solda mostraram uma microestrutura de grãos colunares. Já com a deflexão (7 Hz), a estrutura foi predominante equiaxial e com refinamento. Os autores atribuíram os resultados à diferença do gradiente de temperatura e solidificação da poça de fusão provocada pela deflexão do arco. Segundo eles, estes fenômenos impediram o crescimento extensivo do grão. Em vez disso, cada grão cresceu uma pequena distância, provocando uma microestrutura refinada.

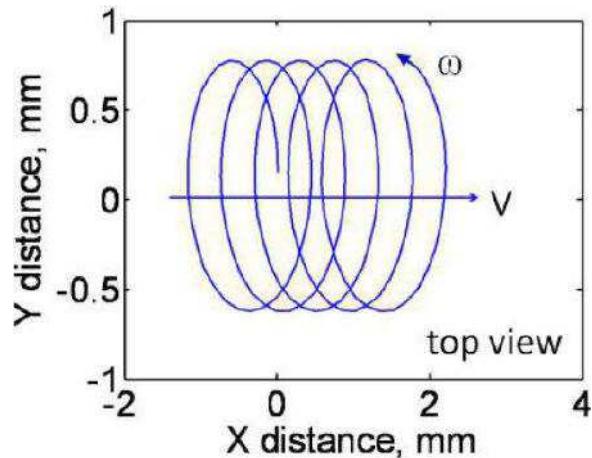


Figura 20. Padrão de deflexão circular do arco realizado através de um sistema de deflexão magnética (*Cyclomatic 90A control, 4613A magnetic probe*) (LIM et al., 2010b)

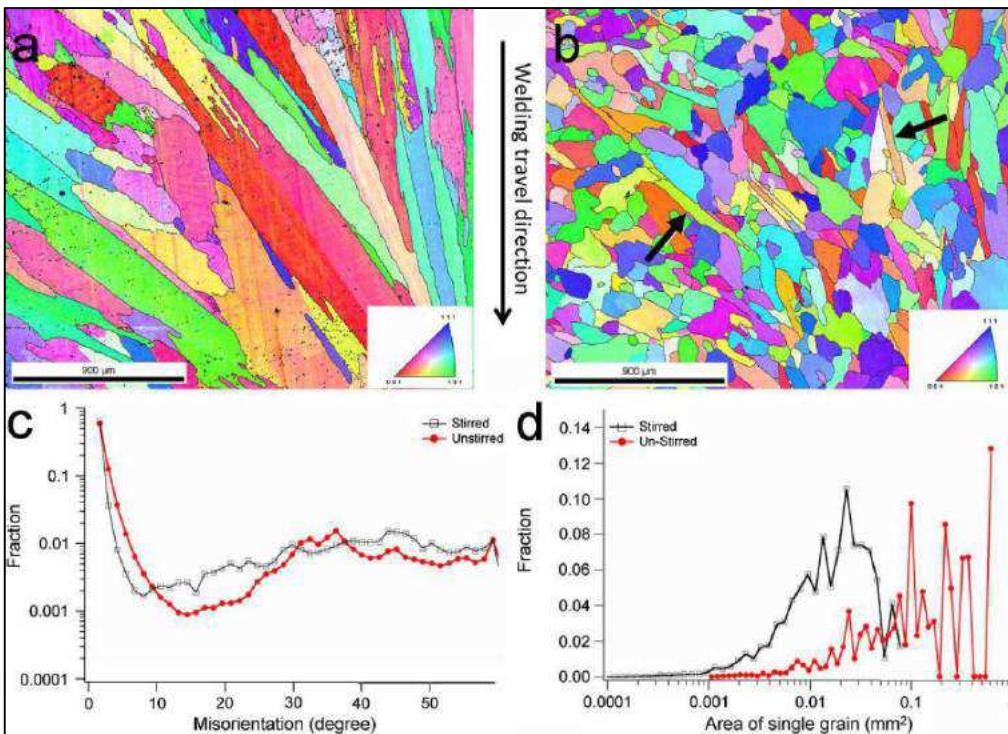


Figura 21. Microestruturas obtidas a partir da aplicação da técnica EBSD: (a) sem deflexão, (b) com deflexão (7 Hz), (c) orientações dos grãos e (d) tamanho dos grãos (LIM at al., 2010a)

Fasching et al. (1997) estudaram o refinamento de grão em ligas de alumínio. Eles concluíram que defletindo magneticamente o arco, utilizando apenas um ou múltiplos polos, é possível perturbar o perfil de solidificação da poça de fusão, provocando o refino o grão da zona fundida (Figura 22).

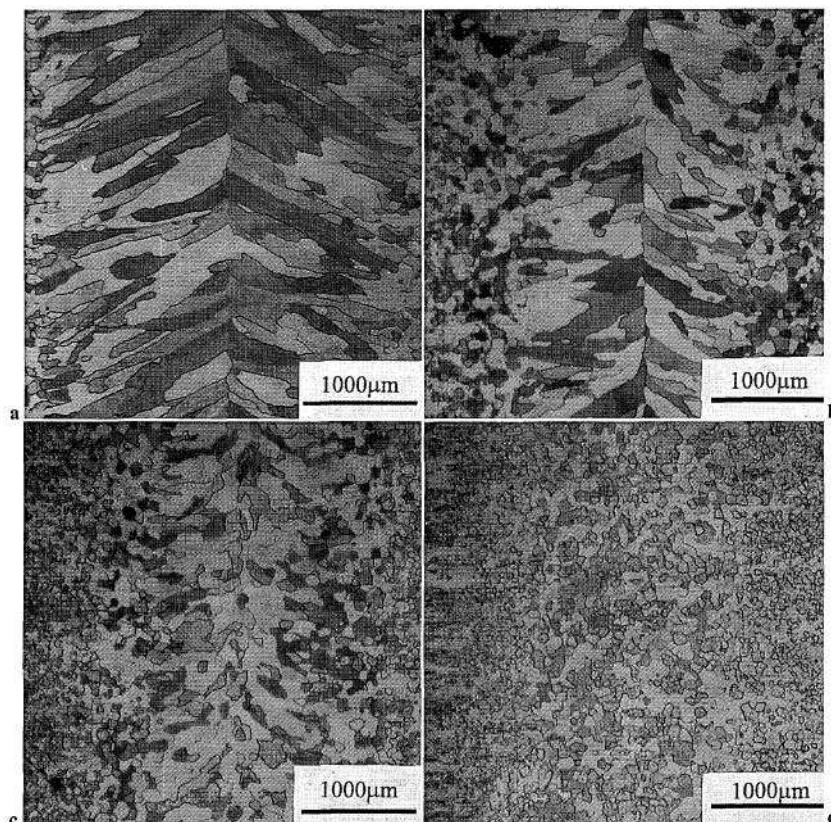


Figura 22. Vistas superiores de (a) cordão sem deflexão com elevado aporte térmico - grãos colunares; (b) cordão sem deflexão com menor aporte térmico - grãos colunares menores; (c) cordão com deflexão transversal - grãos similares a (b) mas com linha de soldificação central menos evidente; (d) cordão com deflexão de 45º (em relação à direção de soldagem) - grãos finos equiaxiais e “sem” linha de soldificação central (FASCHING et al., 1997)

Sundaresan e Ram (1999) utilizaram a deflexão magnética na soldagem TIG para o refinamento de grão em ligas de titânio. Testes preliminares mostraram que uma amplitude de oscilação de 0,6 milímetros apresentou os melhores resultados. As soldas foram realizadas utilizando esta amplitude e variando-se a frequência de 1 a 20 Hz, os melhores resultados foram obtidos utilizando a frequência de 2,5 Hz. Para efeito de comparação, os autores também realizaram soldas sem oscilação do arco. Como mostrado na Figura 23, foi obtido o refinamento do grão nas três dimensões (superior, longitudinal e transversal).

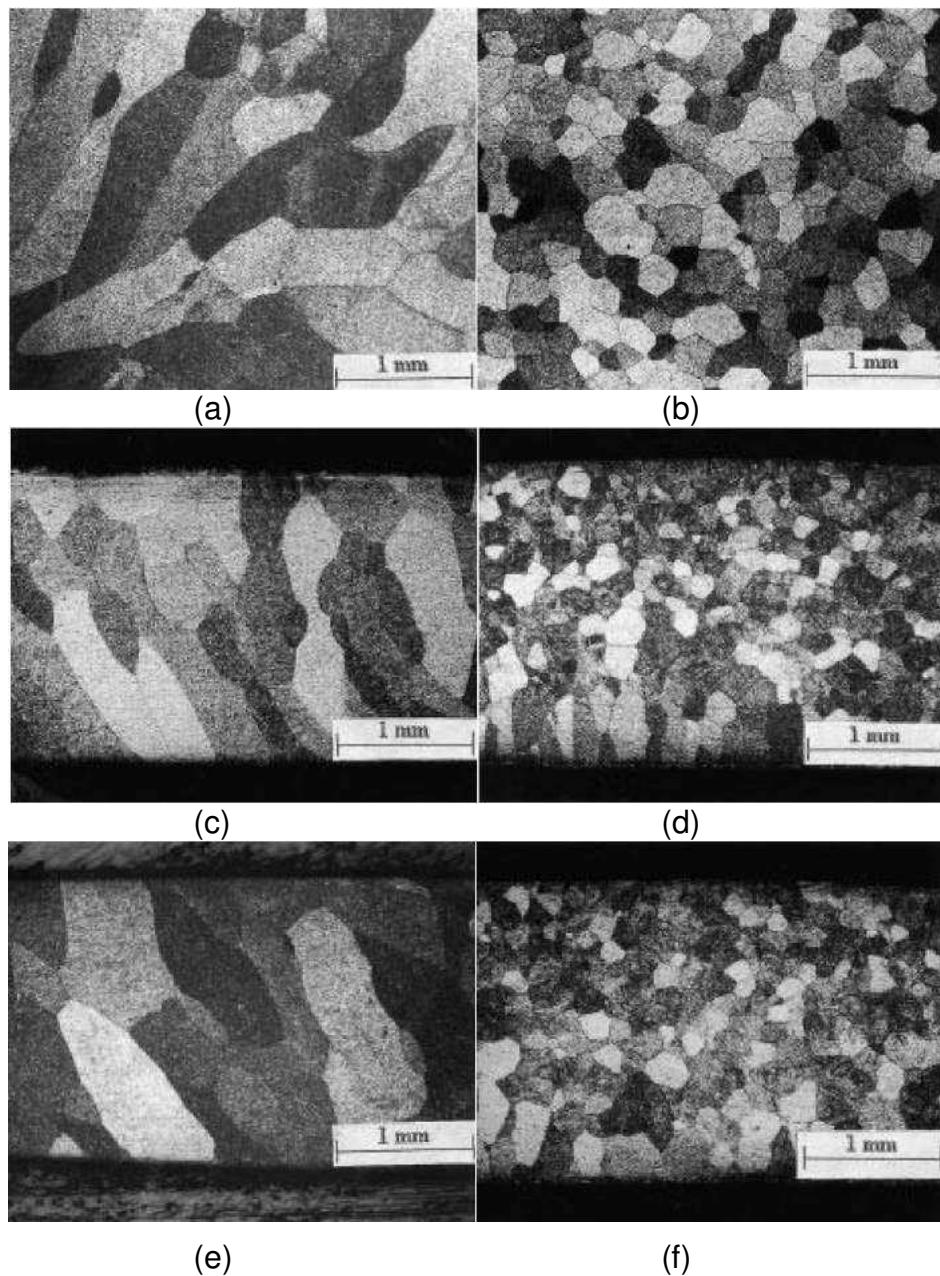


Figura 23. Macrografias de soldas TIG realizadas em Ti sendo (a) vista superior sem deflexão; (b) vista superior com deflexão; (c) vista longitudinal sem deflexão; (d) vista longitudinal com deflexão; (e) vista transversal sem deflexão; (f) vista transversal com deflexão (SUNDARESAN e RAM, 1999)

2.2.2 Controle da geometria do cordão

Chen et al. (1990) utilizaram deflexão magnética transversal no processo TIG com metal de adição em dois níveis de corrente e, na medida em que aumentaram a amplitude do campo magnético, obtiveram um aumento da largura do cordão e diminuição da penetração (Figura 24). Além disso, observaram que quando o arco é defletido há um pequeno aumento em sua tensão devido ao aumento de seu

comprimento. Na Figura 25 é mostrada a curva de alimentação do eletroímã utilizada, onde é possível observar os parâmetros de ajuste da curva, disponibilizados pelo sistema de controle utilizado. Nota-se que além de mudança nas amplitudes de deflexão, o sistema permitia mudança nos tempos de parada lateral e um deslocamento transversal em relação ao centro da junta.

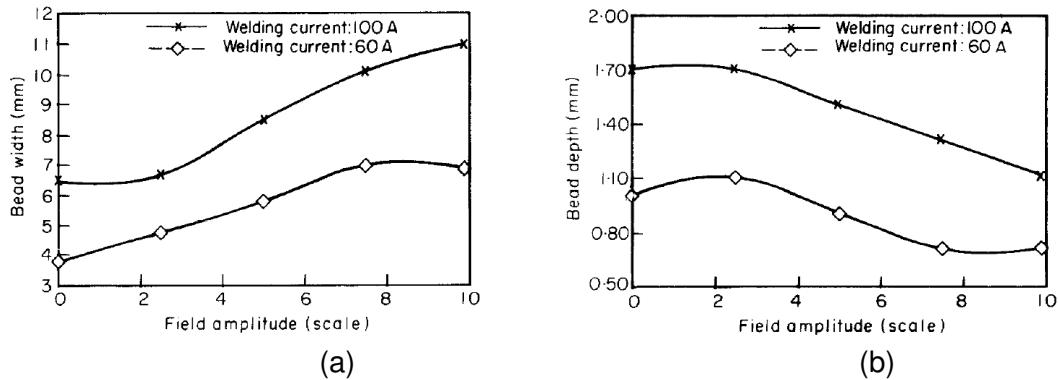


Figura 24. Efeito do aumento da amplitude do campo magnético na geometria do cordão: (a) largura e; (b) penetração (CHEN et al., 1990)

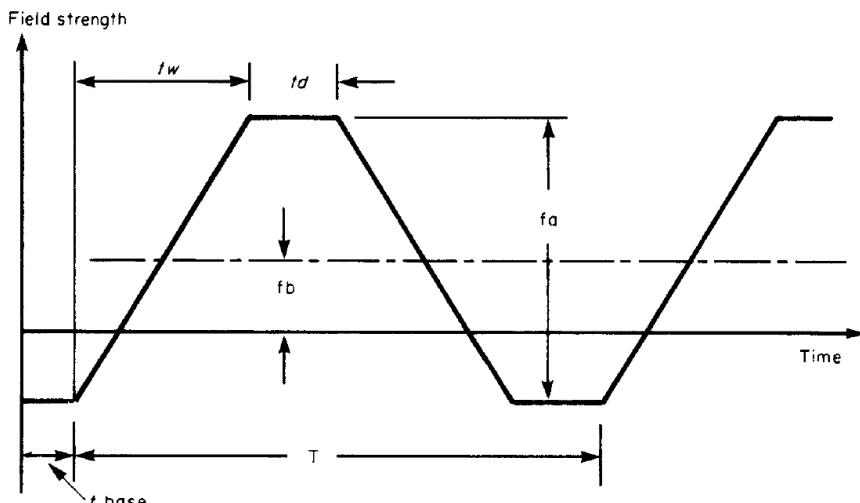


Figura 25. Parâmetros da curva de alimentação do eletroimã utilizada por Chen et al. (1990), onde: t_w = weaving time, t_d = dwell time, f_b = field bias, f_a = field amplitude, T = time

Kang e Na (2003) utilizaram deflexão magnética transversal com processo MIG/MAG para soldas do tipo *narrow gap* e obtiveram uniformidade e boa penetração nos dois lados do chanfro. Bracarense e Soares (2010) utilizaram deflexão magnética para execução de passe de raiz em aços de baixo carbono através do processo MIG/MAG, com frequências de oscilação de 5, 10 e 20 Hz e obtiveram maior controle da poça de fusão e, consequentemente, do reforço, penetração e largura do cordão de

solda, maior estabilidade do processo de transferência metálica e cordões de solda com melhor aspecto superficial, com ausência de mordeduras, pouca concavidade e boa penetração. Observa-se, a partir da Figura 26, que a aplicação de oscilação magnética no arco elétrico pode induzir um passe com menor penetração e reforço de raiz. Bracarense e Soares (2010) observaram também que algumas soldagens realizadas em chanfros desalinhados sob a influência da deflexão magnética do arco elétrico tiveram penetração total, sem ocorrência de descontinuidades e defeitos. Através de soldagens realizadas em sobre chapas de aço de 2 mm de espessura, observaram que quanto menor a frequência de oscilação transversal, menor a penetração e a altura do reforço na raiz e maior a largura e a altura do reforço superior (Figura 27).

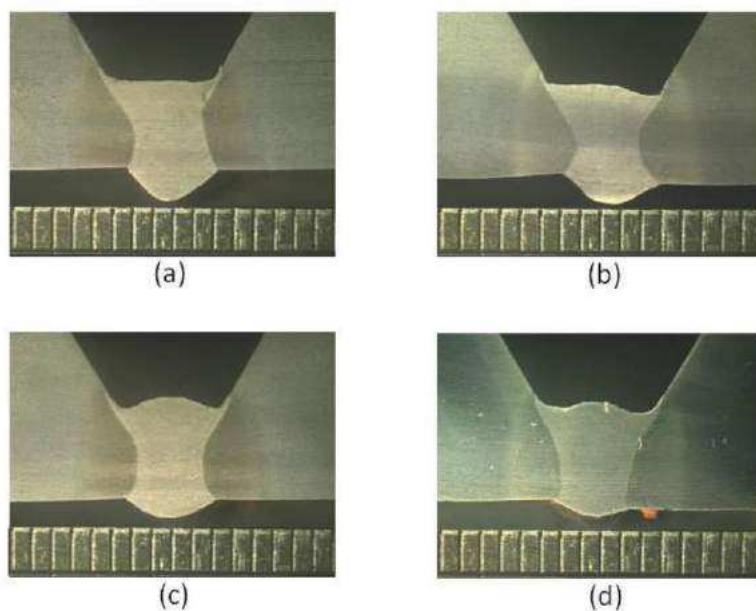


Figura 26. Deflexão magnética em passe de raiz: (a) sem deflexão; (b) deflexão em 20 Hz; (c); deflexão em 10 Hz; (d) deflexão em 5 Hz (BRACARENSE e SOARES, 2010)

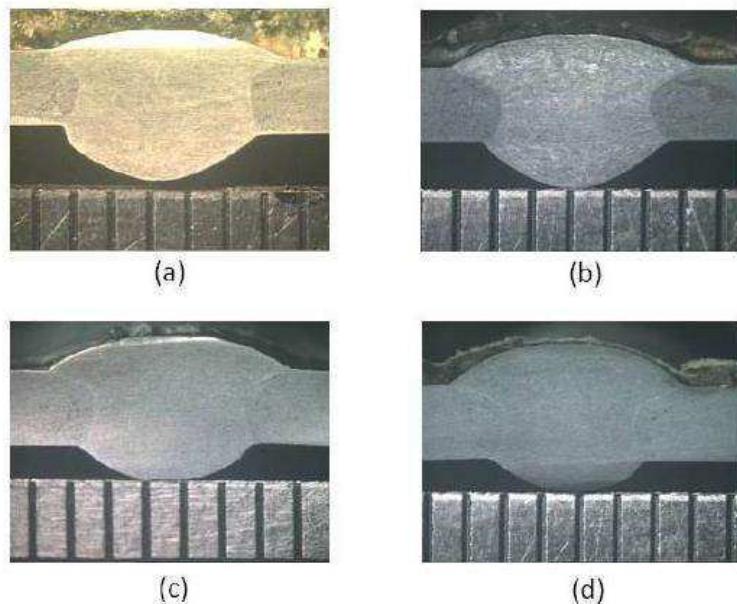


Figura 27. Deflexão magnética sobre chapa: (a) sem deflexão; (b) deflexão em 20 Hz; (c) deflexão em 10 Hz; (d) deflexão em 5 Hz (BRACARENSE e SOARES, 2010)

Os trabalhos citados acima não utilizaram qualquer sincronismo entre deflexão magnética (posição do arco) e níveis de energia do arco (por nível de corrente e/ou modo operacional). Entretanto Dutra et al. (2013) utilizaram um sistema de sincronização da polaridade MIG/MAG (positiva e negativa) com a posição da tocha (arco) para revestimentos soldados por oscilação (tecimento) mecânica. No caso, como ilustrado na Figura 28, a polaridade negativa foi utilizada no centro do cordão (alta taxa de fusão e velocidade de soldagem, baixa diluição e penetração) e a polaridade positiva foi utilizada nas laterais do cordão para facilitar a sobreposição do próximo cordão depositado ao lado deste, evitando, então, defeitos de falta de fusão. De acordo com os autores, o processo mostrou-se satisfatório para a realização de revestimento superficial, obtendo-se cordões com pouca penetração, uma superfície quase sem ondulação, e boa relação dimensional (largura/altura). Além disso, os cordões produzidos não apresentaram descontinuidades e tiveram um excelente aspecto visual com poucos respingos.

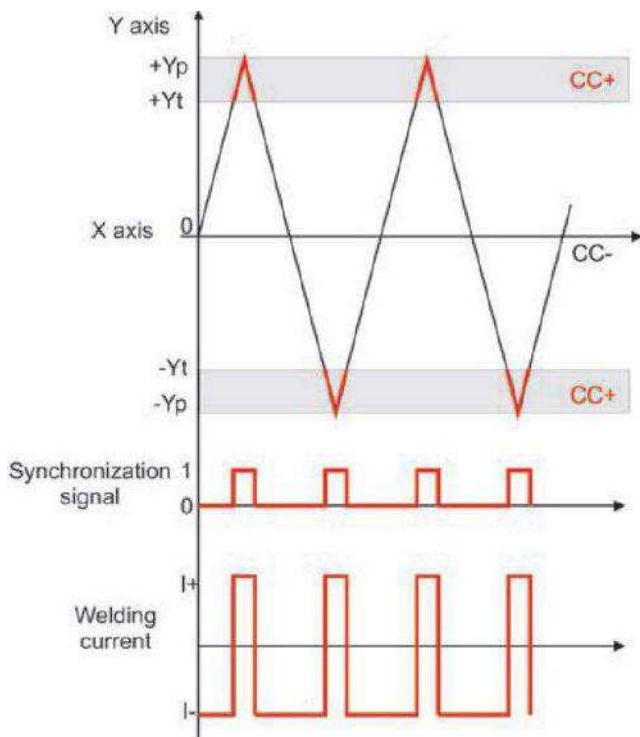


Figura 28. Lógica de sincronismo para a técnica SP-GMAW (DUTRA et al., 2013)

2.3 Modos operacionais do processo TIG e MIG/MAG

Tendo em vista a possibilidade de combinações de modos operacionais de soldagem sincronizados com a deflexão magnética do arco, a seguir são elencadas as principais variações dos processos TIG e MIG/MAG em termos de tipo de corrente, polaridade e transferência metálica.

2.3.1 Modos operacionais do processo TIG

O processo de soldagem TIG possibilita trabalhar com corrente contínua na polarização direta – *Direct Current Electrode Negative* (DCEN) e na polarização inversa – *Direct Current Electrode Positive* (DCEP), além de permitir trabalhar em corrente alternada. O tipo de corrente utilizado tem influência sobre a penetração, assim como na geometria do cordão.

Em corrente contínua, na maioria dos casos utiliza-se DCEN com os elétrons fluindo do eletrodo para a peça e os íons no sentido contrário. Assim sendo, a maior parte do calor (comumente referido como 70%) estará na peça e não com o eletrodo. Desta forma, além de preservar o eletrodo, este modo também provê maior penetração. Quando, entretanto, for importante o efeito de limpeza catódica, propiciada pela saída de elétrons da peça, a DCEP pode ser utilizada. Esta limpeza catódica é particularmente

importante na soldagem de materiais que tem óxidos refratários, como alumínio e magnésio, que são retirados desta maneira. Esta forma de operação, entretanto, por manter o eletrodo extremamente aquecido, necessita de eletrodos de diâmetro sensivelmente maiores, ficando a capacidade do eletrodo neste processo em cerca de um décimo do que quando operando em DCEN (BRACARENSE, 2014). Na polaridade direta o arco elétrico é menos estável que com a corrente na polaridade inversa, entretanto esta última é utilizada em situações em que se deseja pouca penetração e eficiente remoção de óxidos da superfície da chapa soldada (VILARINHO, 2013).

Pode-se ainda utilizar corrente contínua de maneira pulsada (Figura 29). No caso de baixas frequências de pulsação (2 a 10 Hz) a ideia é controlar a poça de fusão - o cordão assume um bom aspecto, com estrias finas e regularmente espaçadas, o que diminui a susceptibilidade à formação de trincas de solidificação pela quebra da frente de solidificação a cada ciclo de pulso. Já a pulsação em altas frequências tem por objetivo enrijecer o arco, tornando-se uma importante ferramenta para soldagens com níveis de corrente muito baixos (VILARINHO, 2013).

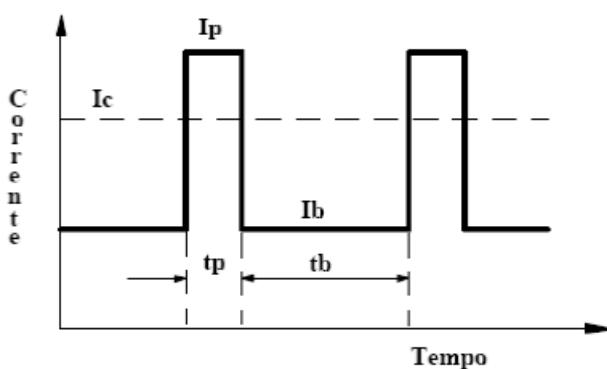


Figura 29. Forma de onda para corrente pulsada, onde se parametriza: corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b) (VILARINHO, 2013)

A principal vantagem da corrente pulsada é permitir uma boa penetração e fusão no pulso, enquanto mantém a área de soldagem relativamente fria. Assim, é possível obter maiores penetrações do que em corrente contínua constante (para a mesma corrente média) e trabalhar com materiais mais sensíveis ao calor com minimização das distorções (BRACARENSE, 2000).

A corrente alternada é utilizada em soldagem de alumínio e suas ligas, além de magnésio e suas ligas para combinar ciclos de limpeza catódica com ciclos de maior fusão da peça (e menor aquecimento do eletrodo). Neste caso é possível a configuração de balanço da onda de corrente, relacionando os tempos dos ciclos positivo e negativo. Um ciclo positivo mais longo resulta em melhor limpeza da camada de óxidos e um maior aquecimento do eletrodo. Um ciclo negativo mais longo resulta em menor limpeza

da camada de óxidos, entretanto, um menor aquecimento do eletrodo e uma maior penetração (ESAB, 2014). A Figura 30 compara os modos operacionais de soldagem TIG em relação ao fluxo de elétrons, perfil do cordão, limpeza de óxido e balanço de calor.

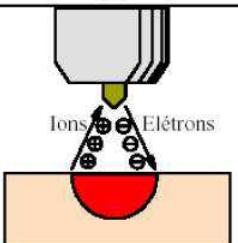
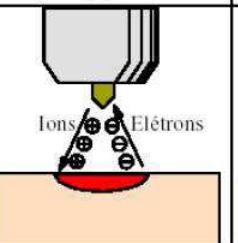
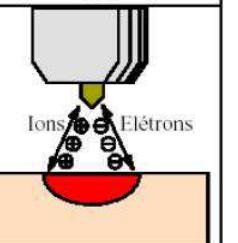
Tipo de Corrente:	CC-	CC+	CA
Fluxo de elétrons e ions:			
Perfil do cordão:			
Limpeza de óxido:	Não	Sim	Sim (meio ciclo)
Balanço de calor (aprox.):	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo

Figura 30. Modos operacionais de soldagem TIG (Adaptado de AWS, 2004)

Entretanto deve-se atentar para o formato da onda de corrente de soldagem utilizada em corrente alternada. A utilização da corrente em formato de onda senoidal pode provocar a instabilidade do arco. Com o advento de novas tecnologias na área da eletrônica foi possível a construção de máquinas eletrônicas que geram uma onda quadrada (Figura 31), evitando assim a extinção do arco nos períodos de transição de polaridade.

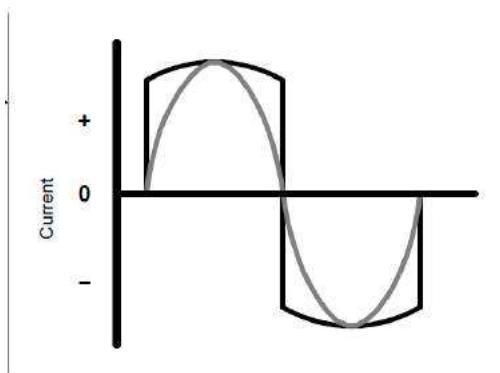


Figura 31. Onda quadrada sobreposta em um sinal senoidal (MILLER ELECTRIC MFG. CO., 2013)

2.3.2 Modos operacionais do processo MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG, por ser um processo que utiliza eletrodo consumível, é caracterizado pela transferência de metal para a poça de fusão através do arco. O modo pelo qual o material é transferido no arco determina a estabilidade do processo e afeta fortemente a quantidade de respingos gerada, a possibilidade de

soldagem em várias posições, a qualidade/geometria da solda e aparência superficial do cordão de solda (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Os modos de transferência metálica são associados a diversos fatores, tais como parâmetros elétricos (tensão, tipo e polaridade da corrente), materiais, gases, distância bico de contato peça (DBCP), características específicas da fonte de potência, etc. (VILARINHO, 2007). O quadro ilustrado na Figura 32 apresenta os modos de transferência metálica conforme proposto no IIW (*International Institute of Welding*).

Proposta de classificação pelo IIW		Tipo fundamental	Aspecto
Fundamental	Variante		
A	Curto circuito	Curto circuito	Natural
		Curto circuito controlado	Controlado
B	Globular	Globular em gotas	Natural
		Globular repelida	Natural
C	Pulsada projetada	Pulsada	Controlado
D	Goticular (spray)	Goticular	Natural
		Elongamento (streaming)	Natural
		Explosiva	Natural

Proposta de classificação pelo IIW		Tipo fundamental	Aspecto
Fundamental	Variante		
E	Rotacional	Rotacional	Natural

Figura 32. Modos de transferência naturais e controlados, segundo classificação proposta no IIW (VILARINHO, 2007)

Os modos de transferência metálica chamados de naturais ocorrem sem qualquer controle adaptativo dos parâmetros de soldagem (por exemplo, tensão do arco, corrente de soldagem, velocidade de alimentação, indutância, etc.). Assim, a transferência da gota é principalmente afetada por um balanço resultante das forças físicas que atuam sobre esta. Dois grupos diferentes podem ser encontrados nas transferências metálicas naturais. O primeiro é regido por uma transferência de “ contato” da gota, enquanto o segundo demonstra uma transferência de “voo livre” da gota para a poça de fusão (SCOTTI et al., 2012). Segundo Scotti e Ponomarev (2008), no primeiro, há o contato da gota com a poça antes do destacamento e no segundo, a gota destaca-se antes do contato com poça.

Na transferência por curto circuito, a ponta do eletrodo, formada por uma gota de metal líquido em crescimento, atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando um curto circuito elétrico e a extinção momentânea do arco. Ocorre geralmente em correntes e tensões de soldagem baixas (baixa força eletromagnética, permitindo um grande diâmetro da gota, e arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar). A Figura 33 mostra o comportamento dos sinais de corrente e tensão durante este modo de transferência.

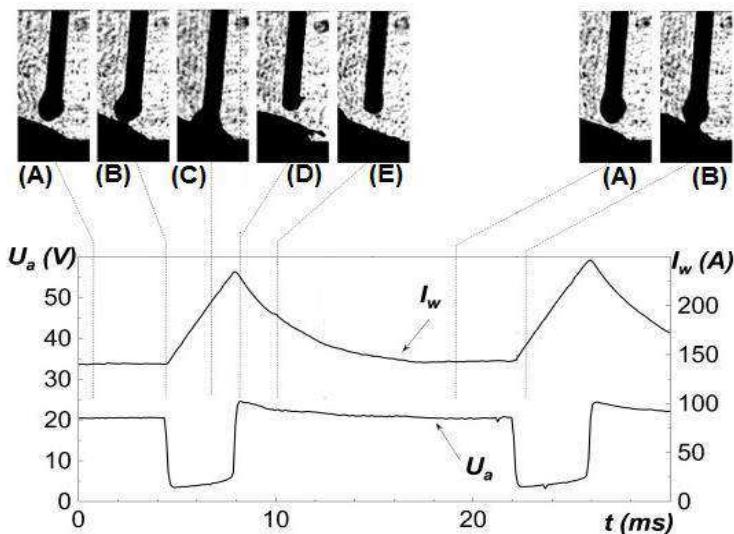


Figura 33. Oscilograma representativo com valores típicos de tensão e corrente para o processo MIG/MAG na transferência por curto circuito em função do comportamento da gota (SCOTTI et al., 2012)

Devido aos valores baixos de corrente e de tensão durante a fase de arco aberto, assim como o fato de que durante parte do processo o arco se apaga, o calor transferido para a peça é reduzido. Esta característica torna a soldagem por curto circuito muito adequada para chapas finas e soldagem fora da posição plana (inclusive sobrecabeça) (SCOTTI et al., 2012).

A transferência globular ocorre quando se utilizam tensões de arco de moderadas a altas (ou seja, arcos longos para evitar curto circuito) e correntes baixas (forças eletromagnéticas não significativas), caracterizando-se principalmente pela transferência irregular de gotas grandes (bem maiores que o diâmetro do eletrodo) em frequência muito baixa (1 a 10 gotas/segundo) (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). As soldagens são limitadas à posição plana, com uma grande instabilidade do arco, limitando seriamente o uso deste modo de transferência (VILARINHO, 2007).

A transferência goticular ocorre quando se aumenta a corrente acima de um nível denominado de corrente de transição (Figura 34), procurando-se manter o mesmo comprimento do arco. Haverá a mudança do modo de formação da gota numa pequena faixa de corrente (corrente de transição), passando de grandes gotas em baixa frequência (globular) para pequenas gotas em alta frequência (goticular), normalmente acima de 200 Hz. Destaca-se que o valor da corrente de transição é função do material, diâmetro e comprimento do eletrodo, assim como do gás de proteção e da DBCP (VILARINHO, 2007).

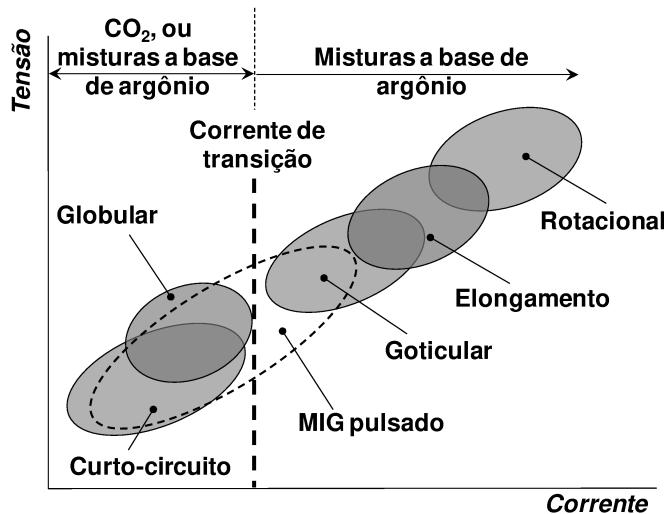


Figura 34. Mapa de transferência didática (VILARINHO, 2007)

Aumentando-se ainda mais a corrente e mantendo-se o comprimento do arco, forma-se um cone líquido na ponta do eletrodo e gotas com diâmetros menores que o diâmetro do eletrodo se transferem, o que caracteriza a transferência com elongamento. Com um aumento ainda maior na corrente, atinge-se a transferência rotacional, onde a ponta do eletrodo serve como um pivô para que o filamento líquido em transferência execute um movimento rotacional-espiral e/ou em forma de cone (VILARINHO, 2007).

Já a transferência explosiva é classificada como uma variante da goticular e se caracteriza por gotas que explodem antes do destacamento, em função da presença de elementos de baixo ponto de vaporização, causando muitos fumos e respingos (VILARINHO, 2007).

Os modos naturais de transferência metálica de uma forma geral apresentam limitações quando se requer a otimização de características operacionais, por exemplo, soldar chapas finas ou fora da posição plana sem grande incidência de respingos (SCOTTI et al., 2012). A solução para estas limitações só foi possível com a implementação de equipamentos modernos, que controlam a transferência metálica.

A transferência metálica controlada consta de modificações impostas sobre os modos naturais para a obtenção de melhores características do processo de soldagem, tais como a redução de respingos, o controle da geometria do cordão de solda, a estabilização do calor imposto e assim por diante. O balanço das forças que regem a transferência ainda prevalece, mas as forças são controladas e/ou modificadas deliberadamente. Os tipos mais comuns desta transferência são o modo “pulsado” e “curto circuito controlado” (SCOTTI et al., 2012).

Como exemplo de fontes controladas comerciais que utilizam a transferência por curto circuito, pode-se citar a patente de 1994 da empresa Lincoln Eletric com a

tecnologia STT (*Surface Tension Transfer*), que foi desenvolvida prometendo um avançado controle do processo de curto circuito ao utilizar uma fonte inversora de alta potência. Já em 2004, o fabricante Miller Electric introduziu a tecnologia de soldagem chamada de RMD (*Regulated Metal Deposition*) e em 2005, a empresa Fronius patenteou a tecnologia chamada de *Cold Metal Transfer* (CMT). Além dessas tecnologias, existem outras no mercado, que está em contínuo aprimoramento (NASCIMENTO, 2015).

Scotti et al. (2012) propõem a inclusão de uma classe adicional para aplicação científica da classificação apresentada acima, proposta no IIW. A “Transferência Metálica Intercambiável” é sugerida para cobrir aqueles modos que possuem alterações periódicas de transferência provocada por alterações nos parâmetros de soldagem.

Os modos de transferência intercambiáveis ocorrem com dois ou mais modos de transferência natural (por este fato, são normalmente confundidos como uma instabilidade durante o período de transição entre dois modos de transferência), acontecendo em uma sequência periódica repetitiva, uma após a outra, como consequência do anterior. Não há interferência do operador ou sistema de controle adaptativo. Segundo Scotti et al. (2012) os modos intercambiáveis são:

- Curto circuito – Goticular (projetada ou com elongamento);
- Globular – Goticular (projetada ou com elongamento);
- Globular – Curto circuito – Goticular com elongamento;
- Goticular projetada – Goticular com elongamento.

Assim, a Tabela 1 lista os modos operacionais de soldagem TIG e/ou MIG/MAG passíveis de sincronização com a oscilação magnética.

Tabela 1. Possibilidades de modos operacionais de soldagem TIG e/ou MIG/MAG para combinação/sincronização com a oscilação magnética

Modos operacionais para baixo aporte de energia (baixo nível de corrente)	Modos operacionais para maior aporte energia (alto nível de corrente)
<ul style="list-style-type: none"> • Corrente constante convencional - • Corrente constante convencional + • Corrente constante pulsada - • Corrente constante pulsada + • Corrente constante globular + • Curto circuito convencional + • Curto circuito controlado + • Curto circuito controlado - 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrente constante convencional - • Corrente constante convencional + • Corrente constante pulsada - • Corrente constante pulsada + • Corrente constante goticular + • Corrente constante globular +

Obs.: os sinais + e - se referem à polaridade utilizada no eletrodo.

2.4 Modelos de deflexão

Alguns modelos para prever a deflexão magnética são encontrados na literatura. Alguns são bastante antigos (LANCASTER, 1986) e todos no geral são de solução relativamente complexa por dependerem de outras características do arco, como distribuição de corrente e pressão (KANG e NA, 2002) e mesmo por dependerem de constantes de rigidez do arco (LANCASTER, 1986). A Figura 35 e a Figura 36 mostram os resultados obtidos por Kang e Na (2002). Apesar de não justificado no respectivo trabalho, vale notar que para situações conjuntamente com campos magnéticos mais altos, correntes de soldagem mais baixas e comprimentos de arco mais elevados, não foram realizados experimentos. Além disso, à medida que o comprimento de arco foi aumentado, os níveis máximos de campo magnético utilizados diminuíram. Possíveis motivos para estas limitações podem estar relacionados a instabilidades de arco como mostrado por Reis et al. (2012) e Reis et al. (2013).

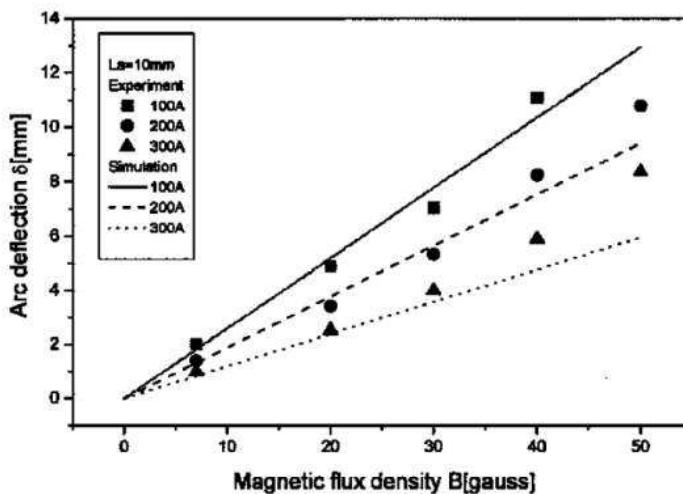


Figura 35. Resultados de deflexão magnética do arco calculada e experimental – efeitos da densidade de fluxo magnético aplicado externamente na deflexão do arco para várias correntes de soldagem (KANG e NA, 2002)

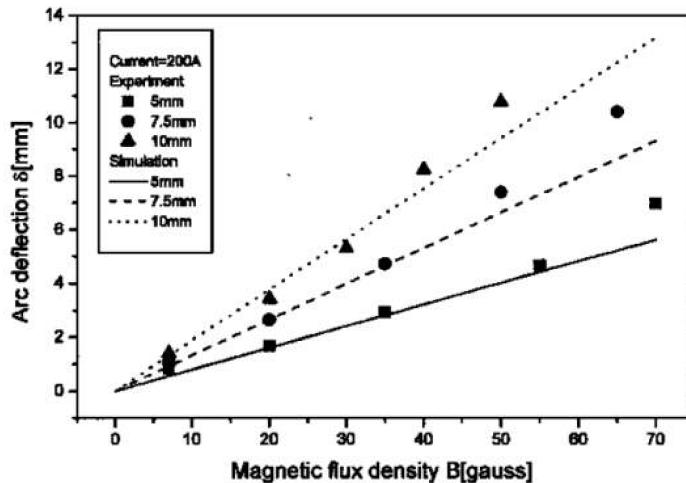


Figura 36. Resultados de deflexão magnética do arco calculada e experimental – efeitos da densidade de fluxo magnético aplicado externamente na deflexão do arco para vários comprimentos de arco (KANG e NA, 2002)

Ueyama et. al. (2007) apresentam um modelo mais simples de deflexão magnética (Figura 37), entretanto tal modelo foi desenvolvido para prever interações entre arcos adjacentes em MIG/MAG Duplo-Arame. Apesar de ter sido usado neste caso pelos autores para discutir a influência de um arco sobre o outro, nenhuma verificação experimental do modelo é apresentada no respectivo trabalho.

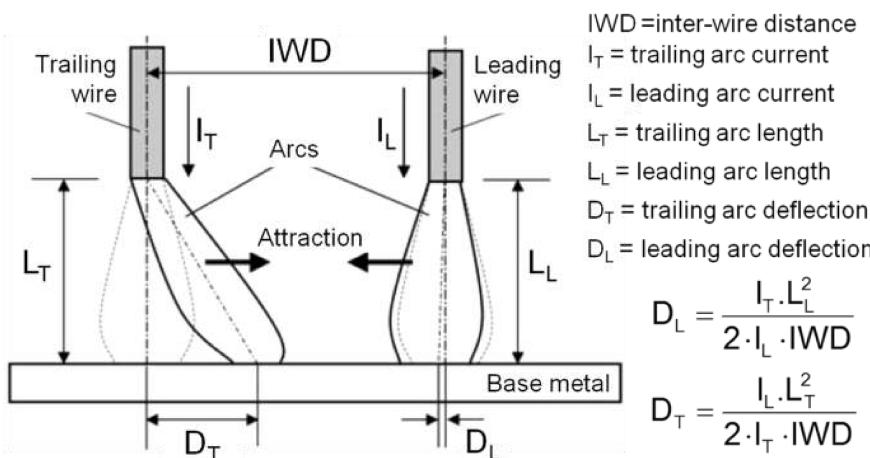


Figura 37. Modelo de deflexão/interação magnética para MIG/MAG Duplo-Arame (UEYAMA et al., 2007)

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL GERAL, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1 Procedimento Experimental Geral e Materiais

De forma a avaliar a oscilação magnética do arco sincronizada com processos de soldagem, a seguinte metodologia geral e materiais foram utilizados.

Primeiramente foi construído um eletroímã robusto, a partir do aproveitamento de uma bobina de um contator (dispositivo eletromagnético) e de um núcleo ferromagnético, utilizado para concentrar as linhas de fluxo magnético numa região afastada do eletroímã (na extremidade do núcleo). Também foi construído um suporte de alumínio que permitiu a montagem do eletroímã em tochas de soldagem automáticas (de corpo reto) em geral. Por meio do eletroímã foi possível defletir arcos dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG. A construção deste dispositivo foi baseada em equipamentos comerciais, nas necessidades relacionadas com a ideia proposta (sincronização da oscilação e processo) e outros pontos da metodologia (utilização de filmagem em alta velocidade do arco para caracterização da deflexão, por exemplo). Após sua construção, o equipamento foi caracterizado (utilizando um gaussímetro) em termos de nível de tensão da bobina *versus* campo magnético produzido.

Na sequência foi desenvolvido um sistema, incluindo *hardware* e *software*, para permitir controlar a oscilação magnética e a fonte de soldagem (multiprocesso) de forma sincronizada. O *software* foi desenvolvido utilizando a plataforma LabVIEW®. O *hardware* do sistema foi composto de um *driver* para acionamento do eletroímã a partir de um sinal DC (*Direct Current*), provindo de uma fonte DC, e de um sistema para condicionamento e aquisição de sinais (tensão aplicada ao eletroímã, corrente e tensão do arco de soldagem). Em termos de controle, o *software* desenvolvido permite o ajuste dos tempos de parada lateral (direita e/ou esquerda - podendo ser diferente em cada lado) e de parada central do arco. A fonte de tensão DC permite o ajuste da amplitude de deflexão do arco, provendo o nível de tensão aplicada ao eletroímã. Na fonte de soldagem utilizada é possível escolher o modo operacional e o nível de corrente em

cada posição do arco (latera-centro-lateral). Assim, algumas possibilidades (combinações) puderam ser exploradas.

A seguir, foi feita uma caracterização da deflexão; geração de curvas de valor de deflexão em função da tensão do eletroímã, da corrente e do comprimento do arco de soldagem baseada em filmagens de alta velocidade e análise de imagens do arco. Esta caracterização experimental foi comparada a um modelo físico-matemático simplificado desenvolvido. Além disso, foi feita uma avaliação do sincronismo do sinal de alimentação do eletroímã com os sinais da fonte de soldagem e do tempo de resposta do equipamento para verificar a eficiência do sistema de controle desenvolvido. Também foi verificado o comportamento da tensão *versus* corrente do eletroímã, através da medição destas grandezas por um osciloscópio.

Depois, com base na revisão bibliográfica realizada e levando em consideração aplicações em potencial, a oscilação magnética foi sincronizada com modos operacionais e/ou níveis de corrente para soldagem TIG e MIG/MAG. No caso do processo TIG foram realizadas soldas sobre chapa com deflexão transversal (à direção de soldagem) em aço carbono 1020 de 3 mm de espessura, variando o nível de corrente de soldagem de acordo com a posição do arco. Para o processo MIG/MAG foram avaliadas soldas sobre chapa com deflexão transversal (à direção de soldagem) também em aço carbono 1020 de 3 mm de espessura, variando os modos operacionais de soldagem de acordo com a posição do arco. Também foram realizados ensaios com oscilação magnética sem qualquer sincronia com o processo de soldagem e mesmo sem oscilação do arco (referências para comparação com os resultados obtidos com a oscilação magnética sincronizada). Os resultados, tanto para o processo TIG quanto para o MIG/MAG, foram avaliados em termos de geometria e aparência superficial do metal fundido. No caso dos ensaios com o processo MIG/MAG, foi utilizada também filmagem de alta velocidade para observar o comportamento do arco, da poça e das gotas em transferência.

Mais especificidades da metodologia utilizada no trabalho são mostradas nos capítulos seguintes dependendo dos itens a serem abordados.

3.2 Equipamentos

A seguir são listados os principais equipamentos do Laprosolda utilizados para dar suporte à execução das atividades deste trabalho.

- Fonte eletrônica “especial” de soldagem multiprocesso (TIG, MIG/MAG, etc.) da DIGIPlus A7 da IMC Soldagem com possibilidade de mudar o modo operacional

e/ou níveis de corrente durante a soldagem a partir de um sinal de comando externo (VIA I/O);

- Sistemas de aquisição de dados para monitoramento da tensão de alimentação do eletroímã, da corrente e tensão do arco de soldagem;
- Mesas para movimentação de tochas/corpos de prova;
- Câmera de alta velocidade.

Também foram utilizados equipamentos da oficina mecânica do laboratório para construção do suporte do eletroímã e confecção dos corpos de prova, do laboratório de metalografia para preparação de amostras e do laboratório de análise metalográfica para microscopia óptica, análise de imagens, etc. Do laboratório de eletrônica, para o desenvolvimento do sistema de sincronização, foram utilizados uma fonte de tensão DC, multímetro, osciloscópio, etc. Este sistema de sincronização é composto de *hardware* e *software* que será descrito no item 3.2.6 Sistema de Sincronização.

A principal bancada experimental montada para a execução dos testes com os principais equipamentos é apresentada na Figura 38. Como será visto na sequência, no caso da soldagem MIG/MAG outra bancada foi montada.



Figura 38. Bancada experimental principal utilizada, sendo 1 - *Software* de controle; 2 - Computador de controle da mesa de coordenadas; 3 - Fonte de tensão ajustável DC; 4 - Sistema de controle do eletroímã; 5 - Tocha com suporte e eletroímã; 6 - Fonte de Soldagem DIGIPlus A7 da IMC Soldagem; 7 - Alimentador de arame-eletrodo STA-20 da IMC Soldagem; 8 - Sistema de aquisição de dados; 9 - Sistema de fixação do corpo de prova; 10 - Mesa de coordenadas.

3.2.1 Fonte de soldagem

Para realizar este trabalho foi necessária uma fonte de soldagem “especial” capaz de mudar o modo operacional (pulsação de corrente, polaridade e transferência metálica) e/ou nível de corrente em cada posição do arco durante o processo de soldagem. Assim, foi utilizada uma fonte de soldagem chaveada no secundário do modelo DIGIPlus A7 (Figura 39).



(a)



(b)

Figura 39. (a) Fonte de soldagem DIGIPlus A7 da IMC Soldagem, onde: (a) modelo comercial atual (IMC, 2012); (b) fonte utilizada - fonte antiga atualizada pela IMC Soldagem

De acordo com o fabricante (IMC, 2012), este equipamento possui um processador ARM de 32 bits que permite a operação com diversas modalidades de soldagem com elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica, com capacidade de corrente de até 450 A. Isto possibilita que, para cada tipo de aplicação, seja desenvolvido um programa para controle da fonte. A operação “comum” deste equipamento é realizada através de um painel com display e teclas, por meio do qual se faz a seleção dos processos e dos níveis das variáveis. A Tabela 2 apresenta as principais características técnicas deste equipamento.

Tabela 2. Características técnicas de fonte de soldagem DIGIPlus A7 (IMC, 2012)

Capacidade de Corrente	450 A
Tensão de alimentação trifásica	220/380/440 V
Tensão em vazio (configurável de fábrica)	50/68/85 V
Corrente a 100% de fator de carga	280 A
Potência nominal	10 kVA
Faixa de corrente	5 a 450 A
Corrente nominal por fase (220/380/440)	26/15/13 A
Ripple de corrente	8 A
Fator de Potência	0,94

Para alteração dos modos operacionais remotamente foi necessário utilizar o modo MIX desta fonte, sendo possível que usuário pré-programue até seis diferentes configurações (modos de soldagem e/ou níveis de corrente), possibilitando a realização de soldagens com diferentes modos e ou níveis de corrente por tempos definidos de maneira sequencial. Pelo controle externo (VIA I/O), localizado na parte traseira da fonte (Figura 40), é possível acessar as configurações pré-programadas desejadas remotamente. Assim, um comando externo pode controlar quais os modos e/ou correntes de soldagem utilizados, por quanto tempo e em que sequência.

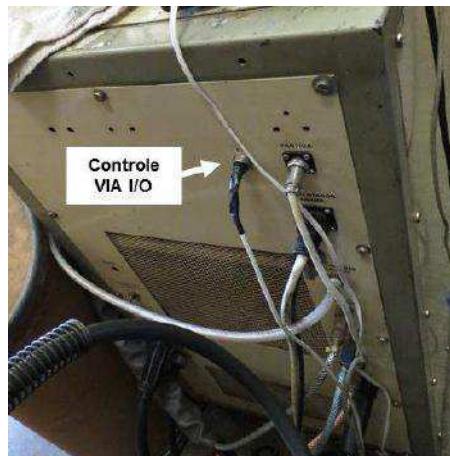


Figura 40. Conector de controle externo (VIA I/O) da fonte de soldagem DIGIPlus A7

Na opção VIA I/O os programas, que contém as modalidades de soldagem, são selecionados através de 3 entradas digitais (3 bits), conforme Tabela 3. Estas entradas digitais são acessadas através de um conector de 4 pinos, sendo que os bits 0, 1 e 2 estão conectados respectivamente nos pinos 1, 2 e 3 deste conector e o pino 4 representa o “comum”, onde deve-se interligar o sinal de referência do sistema de controle (0 V). Segundo o fabricante, os níveis destes sinais são compatíveis com os níveis TTL (0 a 5 V).

Tabela 3. Relação código binário em função do programa/configuração

Programa	Bit 2	Bit 1	Bit 0
P1	0	0	0
P2	0	0	1
P3	0	1	0
P4	0	1	1
P5	1	0	0
P6	1	0	1

Durante a soldagem, um sinal provindo do sistema de controle desenvolvido irá alterar o modo operacional em sincronia com o sistema de oscilação do arco, permitindo que quando ocorra a deflexão do arco a fonte altere simultaneamente o modo operacional.

De acordo com o fabricante, a mudança de um programa para o outro ocorre em menos de 10 ms. O fabricante ainda recomenda que o tempo de cada programa seja superior a 100 ms. Desta forma, as saídas digitais (placa de aquisição/controle) devem ser alteradas com tempos iguais ou superiores a este valor. A partir da aquisição e análise do sinal de controle do eletroímã (sincronizado com o sinal de controle da fonte) e dos sinais provindos da fonte (corrente e tensão de soldagem) foi possível verificar o tempo mínimo necessário para rodar cada programa e assim determinar a frequência máxima do sistema de oscilação magnética sincronizada.

Foi utilizado um alimentador de arame STA-20 também do fabricante IMC Soldagem (Figura 41). Este alimentador possibilita a alimentação de arame-eletrodo com velocidades entre 1,00 e 20,00 m/min e para cada modo de soldagem programado é possível escolher uma velocidade de alimentação específica.



Figura 41. Alimentador de arame-eletrodo STA-20 da IMC Soldagem, onde (a) modelo comercial atual; (b) alimentador utilizado - alimentador antigo atualizado pela IMC Soldagem

3.2.2 Sistema de aquisição dos sinais elétricos

A aquisição dos sinais de tensão de alimentação do eletroímã, tensão de arco e corrente de soldagem foi realizada por meio de transdutores de corrente de efeito Hall, divisores de tensão, sistema de condicionamento de sinais, placa de aquisição da National Instruments® e software para controle da aquisição. Esse sistema realiza a leitura dos dados durante a soldagem, faz o registro em arquivos em formato de texto e depois apresenta estes dados em forma de gráficos ao término da aquisição.

O transdutor de corrente utilizado foi o de efeito Hall modelo HTA 600-S da marca LEM, inserido junto ao cabo terra da fonte de soldagem. Os cabos para aquisição de tensão de arco foram conectados na conexão da fonte com a tocha e com o cabo terra. Para o tratamento do sinal de corrente enviado pelo sensor de efeito Hall e da tensão de arco de soldagem foi utilizado um sistema condicionador de sinais, implementado pelo Laprosolda (Figura 42). O sinal de tensão do eletroímã foi adquirido por meio de cabos conectados diretamente aos terminais de alimentação de tensão na bobina do eletroímã.



Figura 42. Condicionador de sinais (para aquisição do sinal de tensão do eletroímã foi necessária outra unidade desta)

A placa de aquisição utilizada é da fabricante National Instruments® e modelo NI USB-6009 (Figura 43a). Esta recebe os sinais provindos do condicionador de sinais e os registra conforme programado pelo software, utilizando a plataforma LabVIEW®, do mesmo fabricante da placa de aquisição.

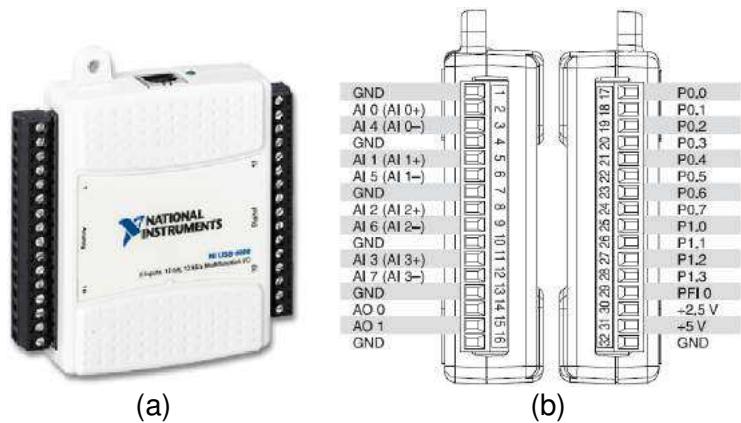


Figura 43. (a) Placa de aquisição modelo NI USB-6009; (b) Detalhamento dos terminais de entrada e saída do módulo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014)

O painel frontal do *software* de aquisição de dados é mostrado na Figura 44. Através deste é possível realizar o ajuste da taxa e tempo de aquisição. O *software* ainda apresenta os oscilogramas da tensão do eletroímã, tensão de arco e corrente de soldagem, além dos respectivos valores médios, RMS e de frequência destas medições.



Figura 44. Painel frontal do *software* de aquisição de dados

O programa desenvolvido para aquisição dos dados está apresentado na Figura 45. O programa foi configurado para adquirir os sinais dos canais analógicos AI0, AI1 e AI3. O canal AI0 refere-se à tensão do eletroímã, AI1 à corrente de soldagem e o AI3 à tensão do arco. Através deste programa também pode se ajustar os valores (coeficientes) de calibração de cada canal, que no caso já estavam disponíveis.

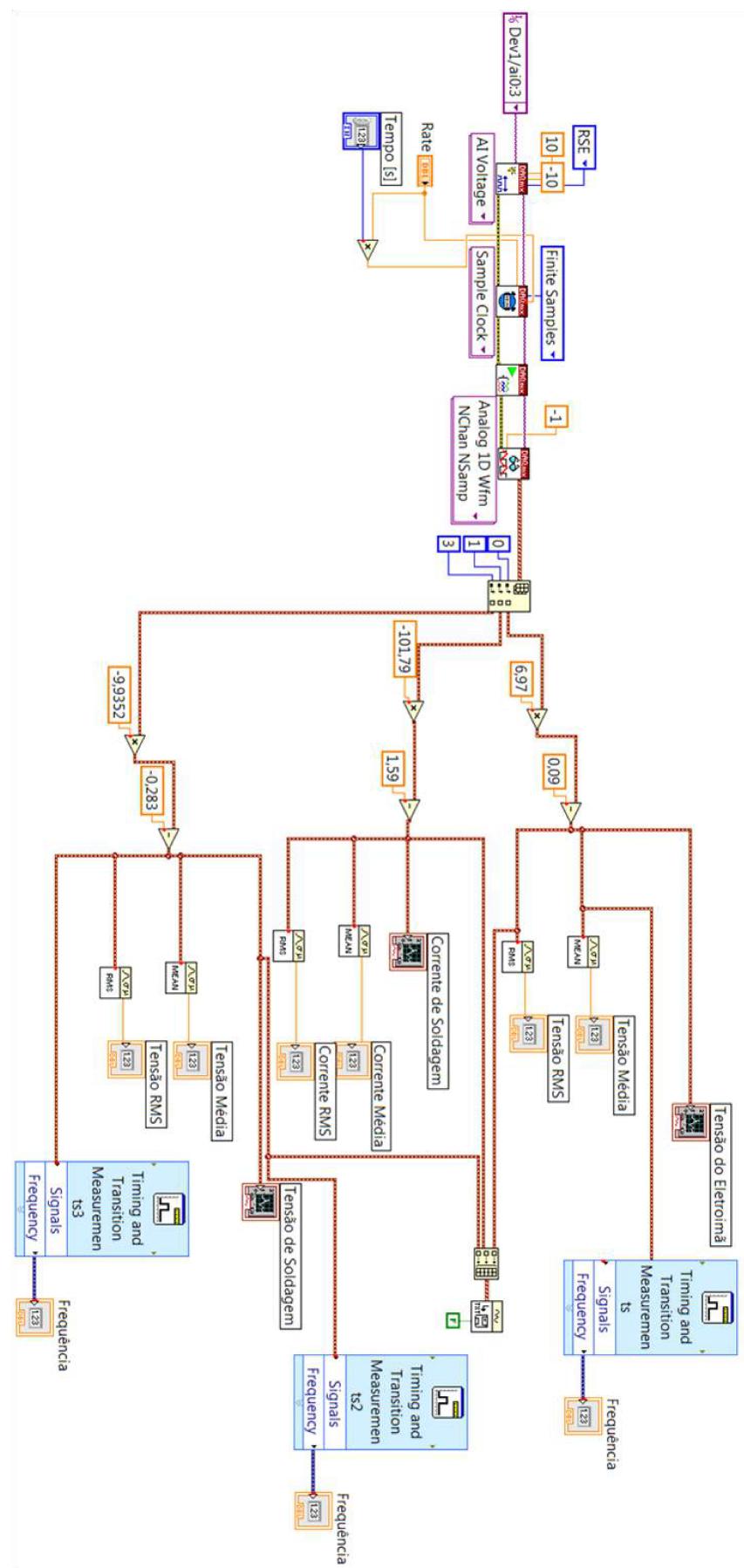


Figura 45. Programa para aquisição de dados

A partir dos dados adquiridos (arquivo de texto), os oscilogramas apresentados ao longo do trabalho foram gerados por meio do software “OriginPro® 9.0.0”.

3.2.3 Mesas para movimentação de tochas/corpos de prova

Para a realização dos ensaios com o processo TIG, foi utilizada uma mesa de coordenadas XY comandada por uma interface por onde se configura a trajetória e velocidade de soldagem da tocha. Este sistema utilizado para movimentação da tocha é mostrado na Figura 46. Como as soldas foram lineares, utilizou-se apenas o eixo X.



Figura 46. Mesa de coordenadas utilizada para o processo TIG

Já para os experimentos com o processo MIG/MAG, foi utilizada uma mesa de movimentação linear de corpos de prova (Figura 47). Esta mesa possui um seletor eletrônico de velocidade e ainda é dotada de suporte com regulagem de altura para tocha, bem como de ajustes para o nivelamento dos corpos de prova. Esta mesa foi utilizada no processo MIG/MAG por necessidade de deixar o arco/tocha parado para execução da filmagem em alta velocidade.



Figura 47. Mesa de movimentação linear utilizada para o processo MIG/MAG

3.2.4 Câmera de alta velocidade

Para caracterização do sistema de deflexão foi utilizada uma câmera de alta velocidade Hi-DcamII do fabricante NAC. As filmagens foram realizadas em uma sequência de imagens a uma frequência de 2000 quadros por segundo. Foram gravadas imagens coloridas, no formato AVI e resolução de 640 x 128 pixels.

3.2.5 Suporte do eletroímã

Para posicionar o eletroímã utilizado junto ao arco foi necessária a construção de um suporte. A construção deste dispositivo foi feita baseada em equipamentos comerciais como, por exemplo, o apresentado na Figura 48. Este suporte foi construído em alumínio (leve e paramagnético - para minimizar interferências no fluxo magnético produzido pelo eletroímã). Além disso, foi feito para permitir a fixação em tochas de diferentes diâmetros e com ajustes para posicionar o eletroímã em relação à peça e o arco/eletrodo. O suporte construído é apresentado na Figura 49.

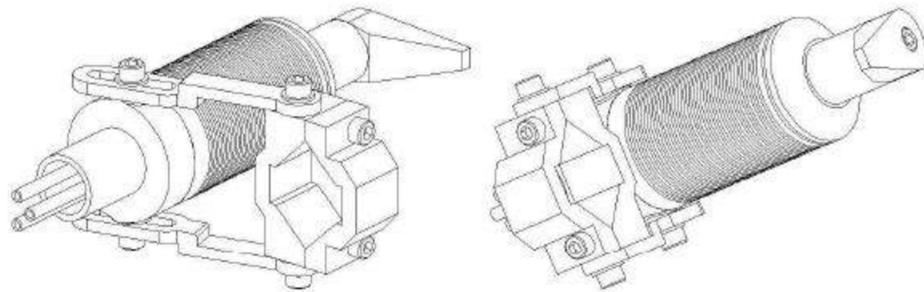


Figura 48. Exemplo de suporte de eletroímã comercial (HANGIL, 2012)

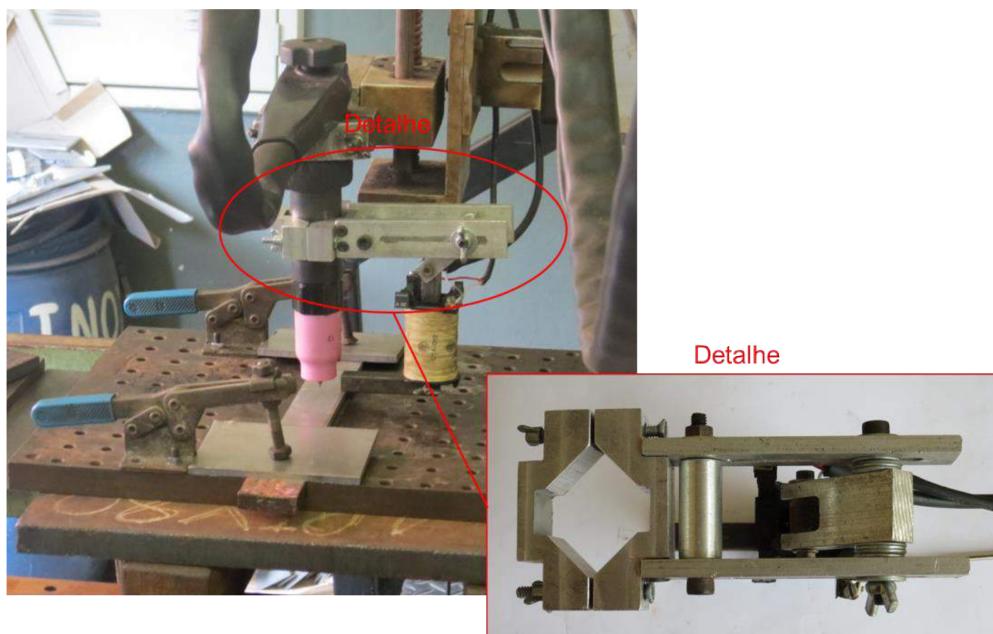


Figura 49. Suporte construído para o eletroímã

3.2.6 Sistema de Sincronização

O sistema de sincronização entre deflexão magnética do arco e processo de soldagem desenvolvido é composto por uma interface de controle do eletroímã e da fonte de soldagem (desenvolvida em LabVIEW®), uma placa eletrônica para variação de polaridade do sinal de alimentação do eletroímã (*driver*) provindo de uma fonte DC e uma placa de aquisição/controle. Um esquema deste sistema é apresentado na Figura 50. Os principais componentes deste sistema serão apresentados em detalhes a seguir.

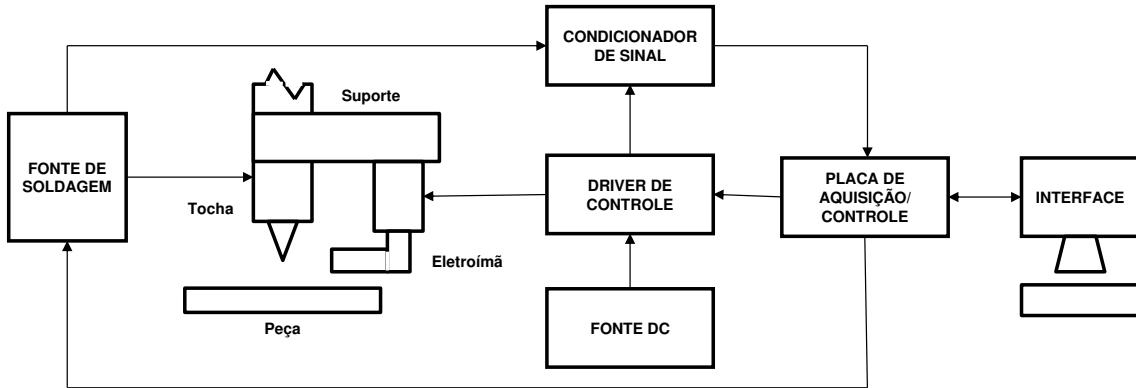


Figura 50. Esquema simplificado do sistema de sincronização entre deflexão magnética do arco e processo de soldagem

3.2.6.1 Hardware

O hardware do sistema de controle do eletroímã desenvolvido para realização deste trabalho é basicamente composto por um circuito eletrônico (Figura 51) contendo acopladores ópticos, um circuito integrado (CI) que implementa uma ponte H com diodos de roda livre (L293D) e uma fonte de alimentação DC ajustável (Figura 52).

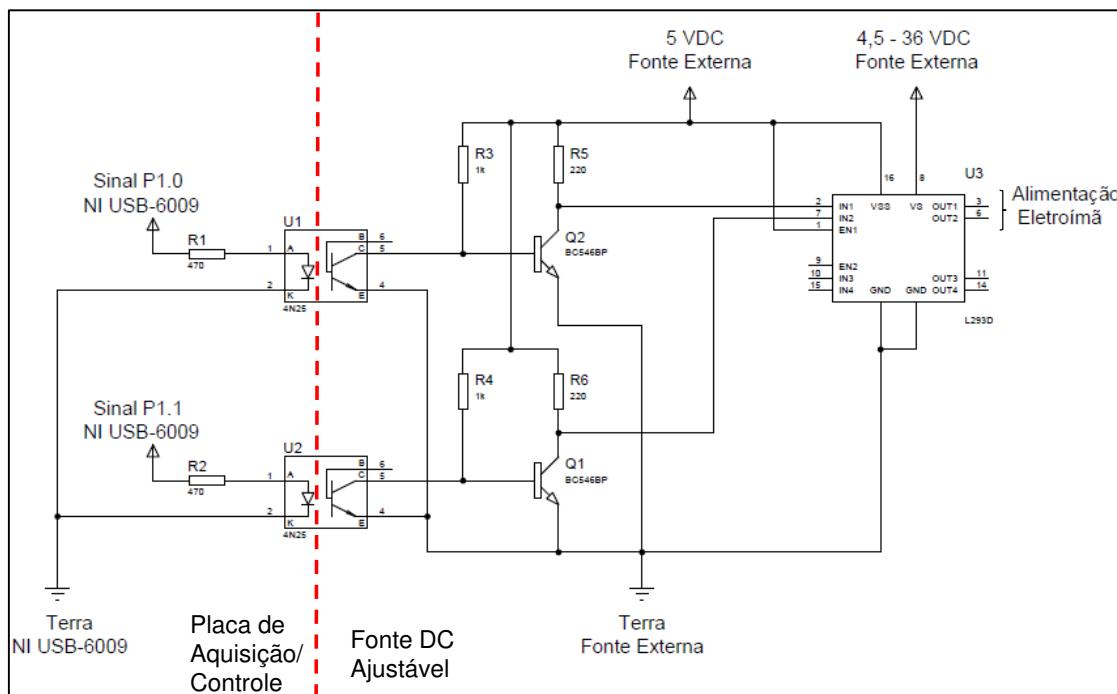


Figura 51. Circuito de controle do eletroímã, cuja alimentação provém da placa de aquisição/controle e da fonte DC



Figura 52. Fonte de tensão DC modelo MPL-3305M Minipa

O CI 4N25 realiza o acoplamento óptico dos sinais oriundos da placa de aquisição/controle (NI USB-6009) com o circuito eletrônico de acionamento do eletroímã, que, por sua vez, é alimentado a partir da fonte de tensão DC. Esta configuração se faz por proteção da placa de aquisição/controle, ou seja, isola o circuito eletricamente para que este não seja afetado por um distúrbio que por ventura possa ocorrer no circuito de acionamento (de corrente superior).

O sinal para o controle do circuito provém dos pinos P1.0 e P1.1, saídas digitais da porta 1 da placa de aquisição/controle. Utilizou-se uma resistência em série com cada uma das saídas (R1 e R2) para ajustar o valor da corrente entregue ao acoplador óptico. Resistores *pull-up* de $470\ \Omega$ foram inseridos entre a saída de 5 V e os pinos P1.0 e P1.1 para aumentar a corrente de saída destes pinos (8,5 mA), como mostrado na Figura 53.

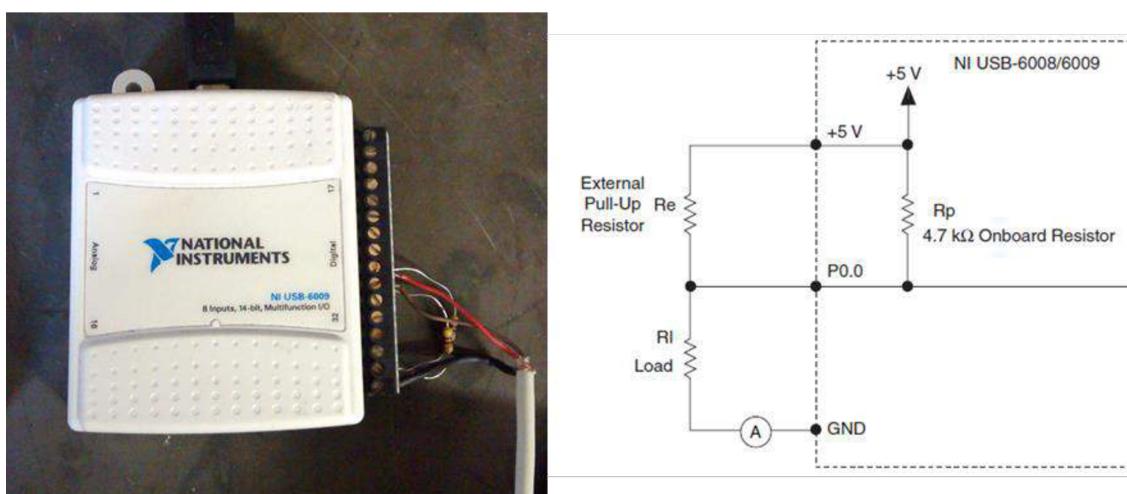


Figura 53. Conexão de resistores *pull-up* nas saídas da placa de aquisição

Foram utilizados transistores NPN BC546 na configuração “emissor comum”, ajustados para atuar na região de corte e saturação, desta forma, o seu funcionamento é similar a uma chave eletrônica. A corrente de base (I_B) controla a posição da chave: se I_B for nula, a corrente do coletor (I_C) também será nula, o transistor estará na região de corte (chave aberta); se I_B for $I_{B(SAT)}$ ou maior, I_C será máxima e o transistor satura (chave fechada). Ou, em se tratando de tensão, quando a tensão de entrada for zero, o transistor está em corte, neste caso, ele se comporta como uma chave aberta; sem corrente pelo resistor do coletor a tensão de saída iguala-se a 5 V. Supondo o transistor com um curto entre coletor e o emissor (totalmente saturado), neste caso, a tensão de saída será zero e a corrente de acordo com a Equação (3.1).

$$I_C = \frac{5}{220} = 22,72 \text{ mA} \quad (3.1)$$

O CI L293D é utilizado para fornecer correntes de até 600 mA e tensões de 4,5 a 36 V, podendo-se variar a polaridade desta corrente (TEXAS INSTRUMENTS, 2014). O princípio de funcionamento deste CI baseia-se numa ponte H, um circuito similar ao mostrado na Figura 54. No circuito da ponte H existem 2 transistores NPN (TIP122) e 2 transistores PNP (TIP177), o funcionamento destes transistores também assemelhasse a uma chave controlada pelos sinais provindos das entradas IN1 e IN2. De maneira que, quando houver corrente na entrada IN1, os transistores Q1 e Q4 estarão fechados, impondo uma corrente no eletroímã L1 da esquerda para direita (sentido convencional), quando houver corrente na entrada IN2, os transistores Q2 e Q3 estarão fechados, impondo uma corrente no eletroímã L1 da direita para a esquerda (sentido contrário). Desta forma, inverte-se a polaridade da corrente no eletroímã seqüencialmente, resultando em deflexões do arco para lados opostos (direita e esquerda ou para frente e para trás dependendo de como o eletroímã é montado em relação à direção de soldagem). Os diodos no circuito (indicados por D) tem a função de “roda livre”, ou seja, quando a polaridade da corrente é invertida no eletroímã, a tensão cai rapidamente para zero, mas o eletroímã não permitirá que a corrente caia subitamente, criando uma tensão induzida de polaridade oposta à da fonte. A tensão no indutor polariza o diodo diretamente e a corrente, agora fluindo do eletroímã, atua como retorno através do diodo de “roda livre”, descarregando a energia armazenada no eletroímã. Isto impossibilita que correntes inversas circulem pelo circuito, que poderia danificar os componentes.

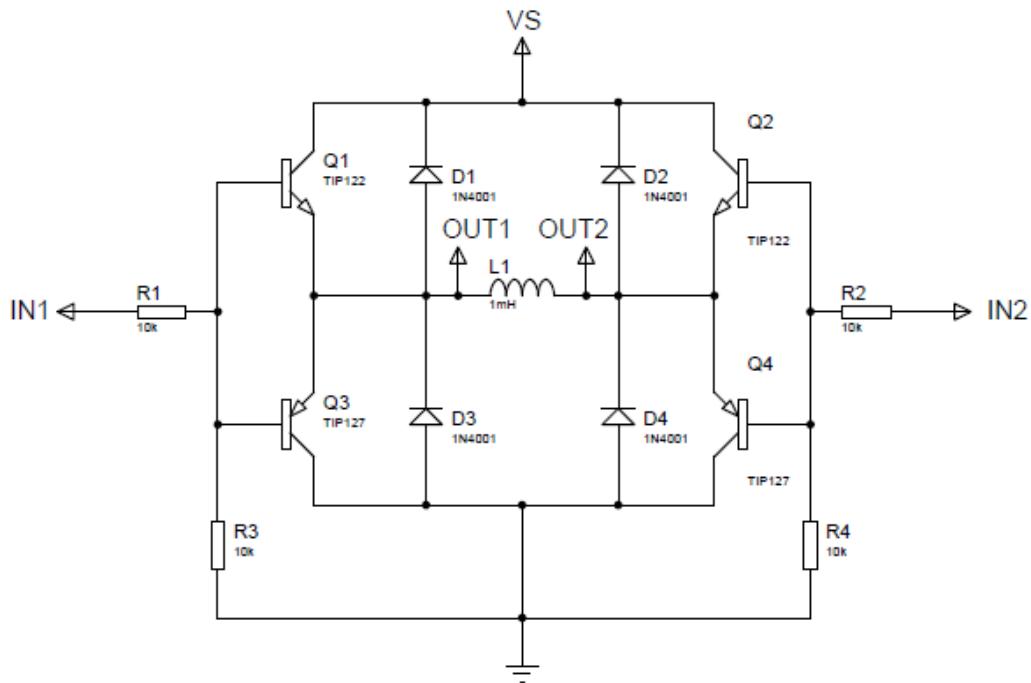


Figura 54. Circuito ponte H

Na Figura 55 é apresentada a placa de controle do eletroímã, como também são indicadas as conexões internas realizadas.

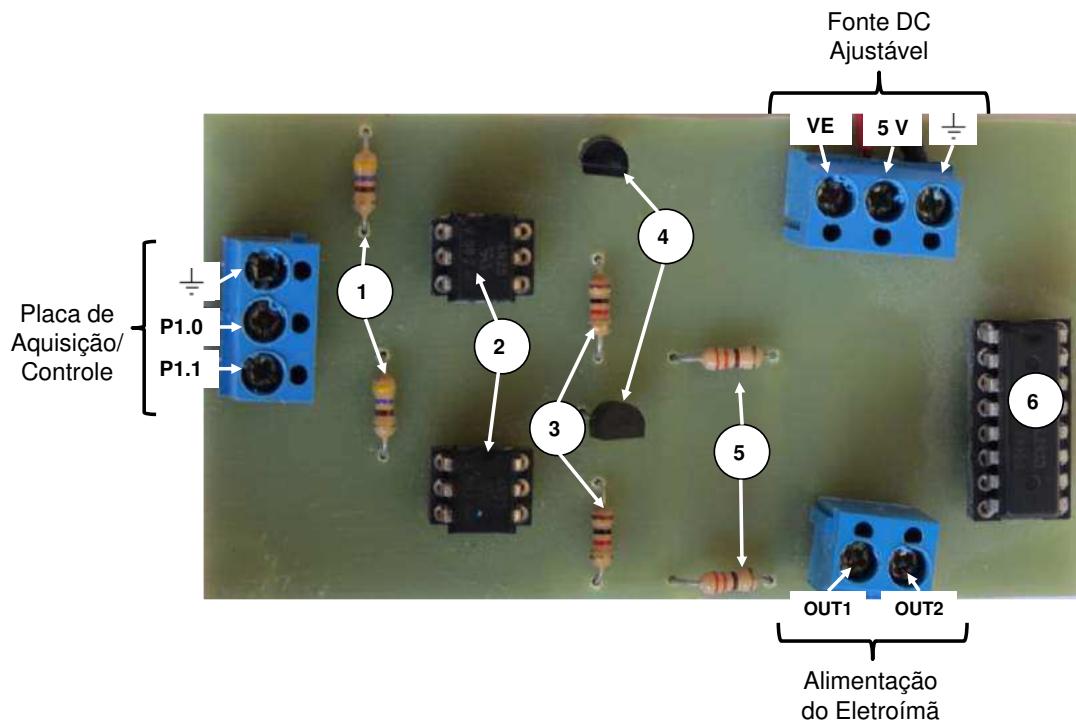


Figura 55. Placa de controle do eletroímã, sendo: 1 - Resistores 470 Ω; 2 - CI Acoplador Óptico 4N25; 3 - Resistores 1 kΩ; 4 - Transistores NPN BC546; 5 - Resistores 220 Ω; 6 - CI L293D (VE = Tensão do Eletroímã)

3.2.6.2 Software

Para facilitar a programação, foram desenvolvidas duas versões de *software* para controle do eletroímã; uma α que permite o ajuste dos tempos de paradas laterais (esquerdo e direito) e central e uma β que permite o ajuste de dois tempos de paradas (à frente e atrás). Na Figura 56 são apresentadas as interfaces para o usuário em cada versão.



Figura 56. Versões do *software* para controle do eletroímã: (a) versão α e (b) versão β

A versão α do *software* foi utilizada para realizar as deflexões transversais à direção de soldagem, que foram exploradas neste trabalho. O formato de onda característico de controle do eletroímã para esta versão é mostrado na Figura 57, onde T_{PE} , T_{PC} e T_{PD} representam respectivamente os tempos de parada esquerda, central e direta. Ressalta-se que o período completo da tensão de alimentação do eletroímã é formado por dois tempos laterais (T_{PE} e T_{PD}) e dois tempos centrais (T_{PC}). Para o caso apresentado na Figura 57 o período é de 1 s (frequência de 1 Hz).

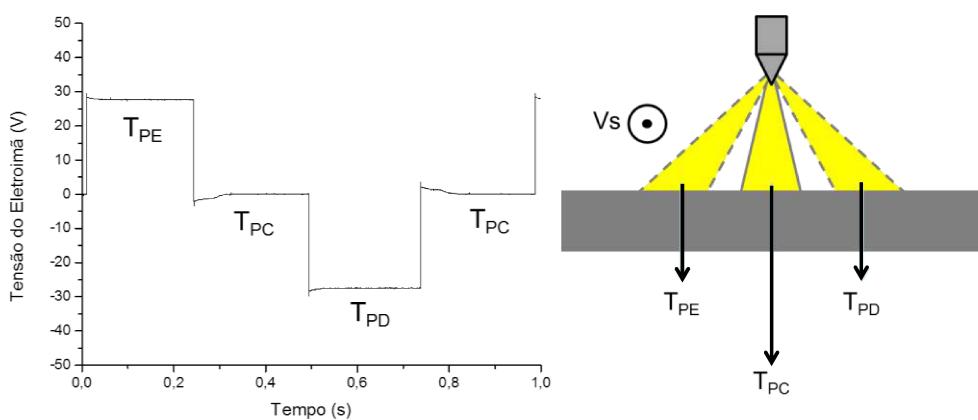


Figura 57. Formato de onda para versão α do *software* para controle do eletroímã - situação de oscilação transversal do arco (V_s = velocidade de soldagem)

A programação em LabVIEW® da versão α do *software* é apresentada na Figura 58. A estrutura básica do programa foi implementada através de duas instruções *case*. A primeira (Figura 59) é responsável por criar uma variável que é incrementada de 1 a 4. A cada ciclo do programa esta variável é verificada, se for diferente de “4” (Figura 59a), retorna para a saída o seu valor atual, se for igual a “4” (Figura 59b), então esta variável é zerada e inicia-se um novo ciclo. Deste modo, é possível obter as quatro condições necessárias para a implementação de cada tempo (T_{PE} , T_{PC} , T_{PD} e T_{PC}). A segunda instrução *case* (Figura 60) realiza as configurações das saídas digitais. Existem quatro condições possíveis: 1, 2, 3 e 4, sendo que cada condição realiza um ajuste específico das saídas digitais de controle do eletroímã (P1.0 e P1.1) e de controle da fonte de soldagem (P0.1, P0.2 e P0.3). Na condição 1, as saídas digitais P1.0 e P1.1 estão em nível baixo (0 V), o que implica que o eletroímã será desenergizado - não há deflexão do arco de soldagem; na condição 2, P1.0 está em nível alto (5 V) e P1.1 está em nível baixo, ou seja, o eletroímã será energizado em uma determinada polaridade – ocorre deflexão do arco para um dos lados; na condição 3, repete-se a condição 1; e na condição 4, a saída P1.0 está em nível baixo e P1.1 em nível alto e deste modo o eletroímã será energizado com uma polaridade inversa à da condição 2 - ocorre deflexão do arco para o lado oposto.

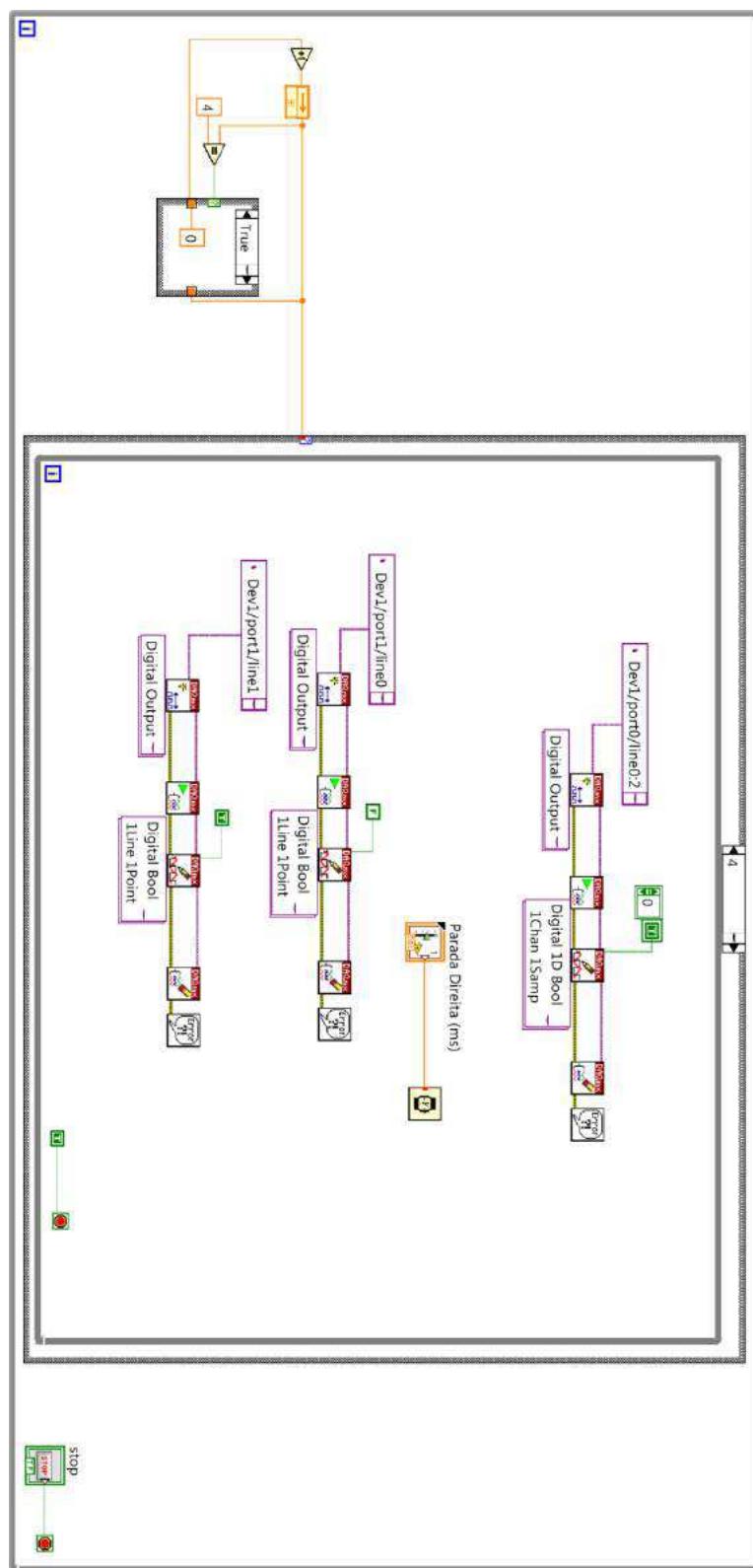


Figura 58. Programação em LabVIEW® da versão α do software de controle do eletroímã

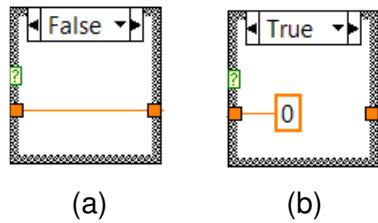


Figura 59. Primeira estrutura case da programação da versão a do software de controle do eletroímã, em (a) retorna para a saída o valor atual da variável, (b) zera a variável

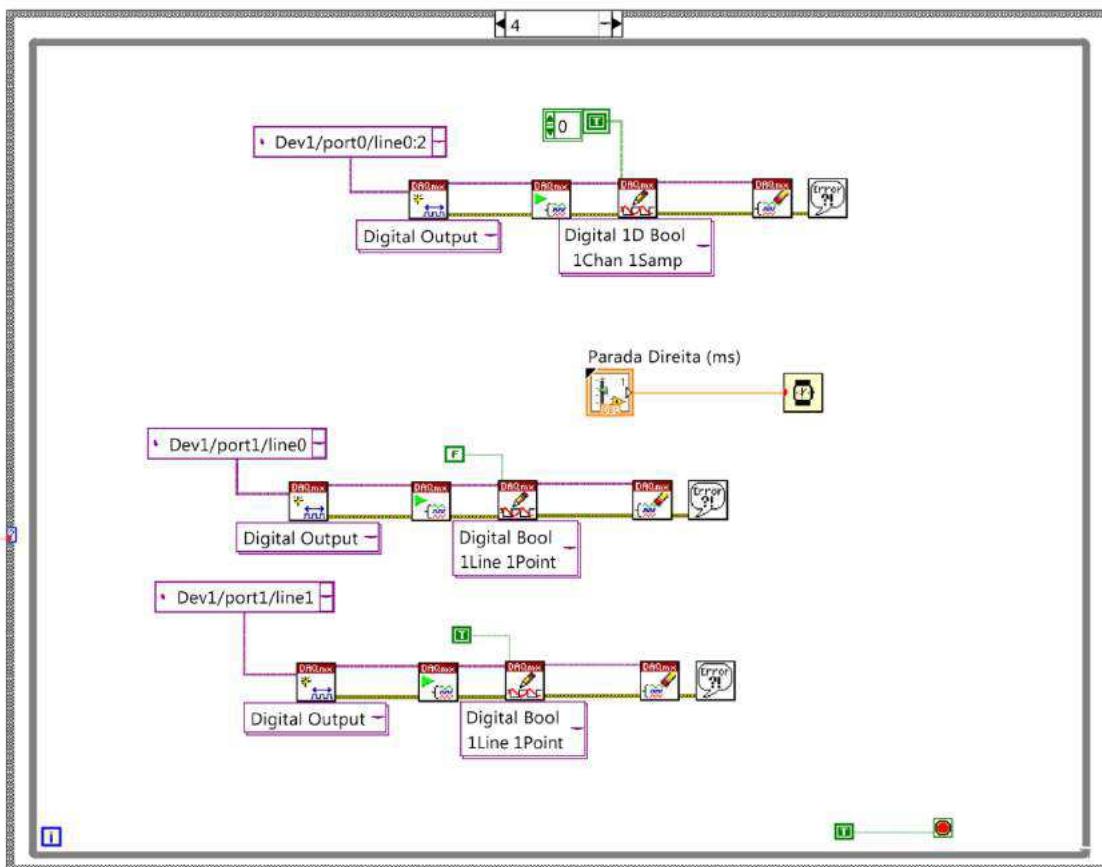


Figura 60. Segunda estrutura case da programação da versão α do software de controle do eletroímã (neste caso, o programa esta executando a configuração corresponde a posição “Direita”)

Em cada uma das condições citadas acima também são realizadas as configurações das saídas digitais de controle da fonte de soldagem que irão determinar o modo de operação da mesma, conforme é mostrado na Tabela 4. Deste modo, cada condição irá selecionar um determinado programa de soldagem (modo operacional e/ou nível de corrente) pré-definido na fonte de soldagem pelo usuário.

Tabela 4. Seleção do modo operacional e/ou nível de corrente da fonte de soldagem em função da condição da segunda estrutura *case* da programação da versão α do *software* de controle do eletroímã

Condição	Saídas Digitais			Programa
	P0.2	P0.1	P0.0	
1	0	1	0	P3
2	0	0	1	P2
3	0	1	0	P3
4	0	1	1	P4

A versão β do *software* foi desenvolvida para realizar, principalmente, deflexões longitudinais em relação à direção de soldagem. O formato de onda característico de controle do eletroímã para esta versão é mostrado na Figura 61, onde T_{PF} e T_{PT} representam respectivamente os tempos de parada à frente e atrás. Assim, nesta versão do *software* (Figura 62), diferentemente da versão α , não existem as condições que realizam o tempo central (condições 1 e 3). Conforme mostra a Figura 62 a forma de onda obtida tem apenas dois níveis de tensão - o *software* β acessa apenas dois modos de operação da fonte. Na primeira condição (correspondente a 2 da versão α) a fonte de soldagem será configurada para o programa P2 e na segunda condição (correspondente a 4 da versão α) para o programa P4.

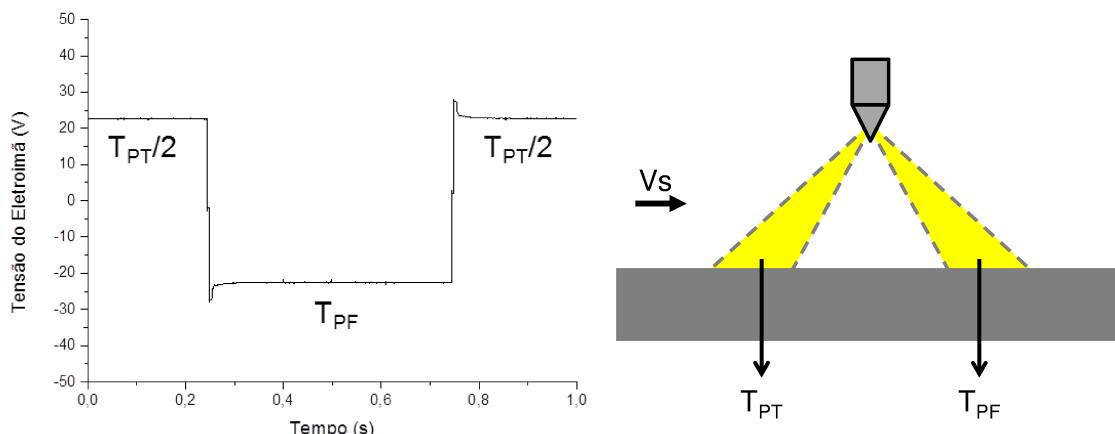


Figura 61. Formato de onda para versão β do *software* para controle do eletroímã - situação de oscilação longitudinal do arco (V_s = velocidade de soldagem)

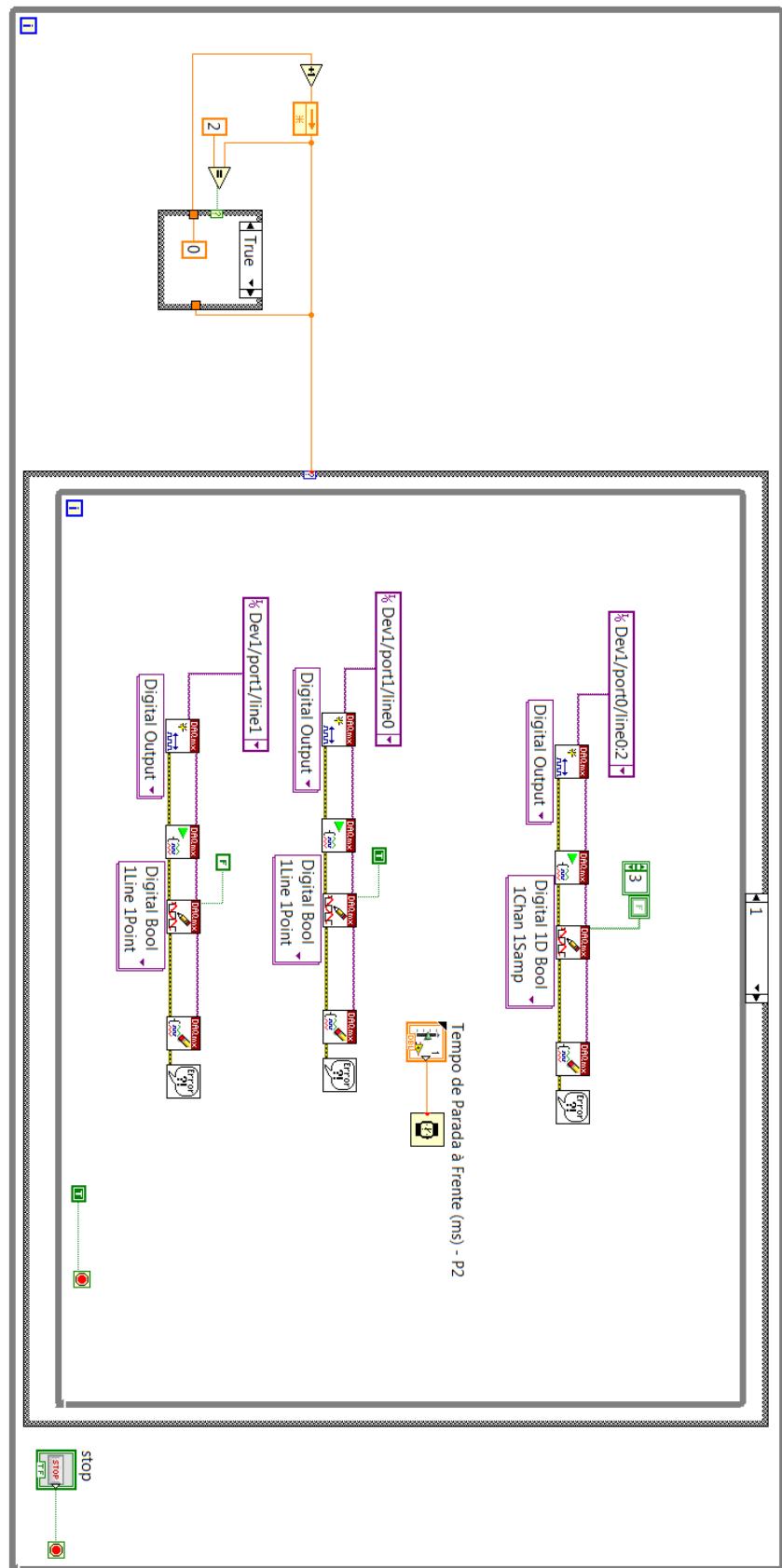


Figura 62. Programação em LabVIEW® da versão β do software de controle do eletroímã

Vale ressaltar que os programas α (com parada central) e β (sem parada central) podem também ser utilizados respectivamente para deflexões longitudinais e transversais/laterais, bastando mudar o sentido das linhas de campo magnético (montagem do eletroímã); sentido transversal para deflexões longitudinais e sentido longitudinal para deflexões transversais/laterais.

3.3 Avaliação do Sistema de Sincronização

Neste item são apresentados ensaios e avaliações preliminares para garantir o correto funcionamento do sistema de sincronismo entre oscilação magnética e processo de soldagem.

3.3.1 Avaliação do sincronismo

O sincronismo entre os sinais de alimentação do eletroímã e a corrente da fonte de soldagem (mudança de programa da fonte) foi verificado por testes com soldagem TIG sobre chapas de aço carbono conforme Tabela 5.

Tabela 5. Ensaios de verificação do sincronismo entre os sinais de alimentação do eletroímã e a corrente da fonte de soldagem (soldagem TIG)

Ensaio	Corrente por Programa			Tempo de Parada Lateral em P2 e P4 [ms]	Tempo de Parada Central em P3 [ms]
	P2 [A]	P3 [A]	P4 [A]		
1	50	20	50	1000	1000
2	20	50	80	1000	1000
3	20	50	70	500	1000

Para cada ensaio, foram adquiridos os sinais (formas de onda) da tensão de alimentação do eletroímã e da corrente de soldagem (Figura 63). Já que o objetivo foi avaliar o sincronismo entre os sinais de controle do eletroímã e da fonte de soldagem, neste momento não houve preocupação com a calibração dos sinais de amplitude (os valores do gráfico não representam os valores reais) e nem com o aspecto dos cordões resultantes. Os gráficos apresentados foram obtidos a partir da ferramenta “Measurement & Automation Explorer” da National Instruments®, por não demandar uma interface específica para a aquisição destes dados. É possível notar que os sinais da tensão do eletroímã e da corrente de soldagem estão todos sincronizados, indicando a eficácia do sistema de sincronização desenvolvido.

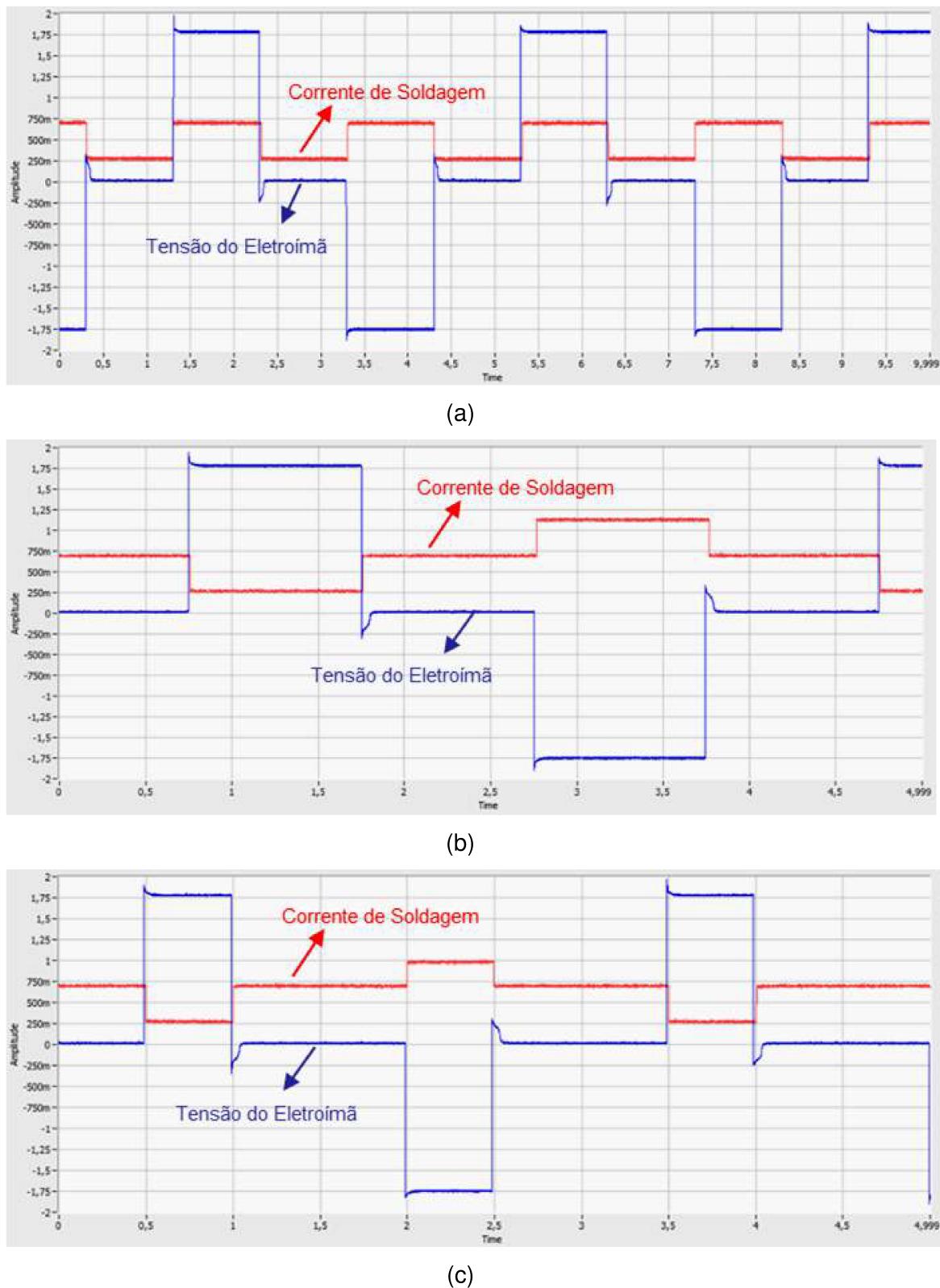


Figura 63. Formatos de onda (*amplitude versus tempo em segundos*) obtidos para análise do sincronismo entre os sinais de tensão do eletroímã e corrente de soldagem, sendo: (a) - sinais do ensaio 1 da Tabela 5; (b) - sinais do ensaio 2 da Tabela 5 e (c) - sinais do ensaio 3 da Tabela 5

3.3.2 Análise da tensão *versus* corrente do eletroímã

Apesar de se controlar/impor a tensão do eletroímã neste trabalho por questões de simplicidade, na verdade é a corrente que flui pelo enrolamento (bobina) do eletroímã que produz o campo magnético. Assim, foi realizado um experimento para examinar o comportamento da tensão *versus* a corrente de alimentação do eletroímã. Como a corrente do eletroímã é muito baixa (na ordem de mA), não foi possível medir com o sensor utilizado para a medição da corrente de soldagem. Então, neste caso, foi utilizada a ponteira de corrente do osciloscópio Tektronix modelo TPS2014 (Figura 64).



Figura 64. Osciloscópio Tektronix modelo TPS2014 utilizado para medição da corrente do eletroímã

Foi aplicada uma tensão nos terminais do eletroímã e realizada a medição da tensão e corrente pelo osciloscópio. Depois de alguns testes, os resultados mostraram que a corrente leva em torno de 50 ms para se estabilizar depois que a tensão é variada de zero para o nível de tensão selecionado, como pode ser visto na Figura 65a. Quando a tensão cai para a zero, o tempo necessário para a corrente chegar a zero é em torno de 30 ms (Figura 65b). Assim, o sistema desenvolvido apresenta um limite mínimo de tempo de parada (transversal ou longitudinal) da deflexão; considerando que o campo magnético é produzido instantaneamente com a corrente da bobina, o tempo mínimo de parada necessário para garantir que a deflexão do arco se estabilize (alcance o nível desejado) deve ser de 50 ms.

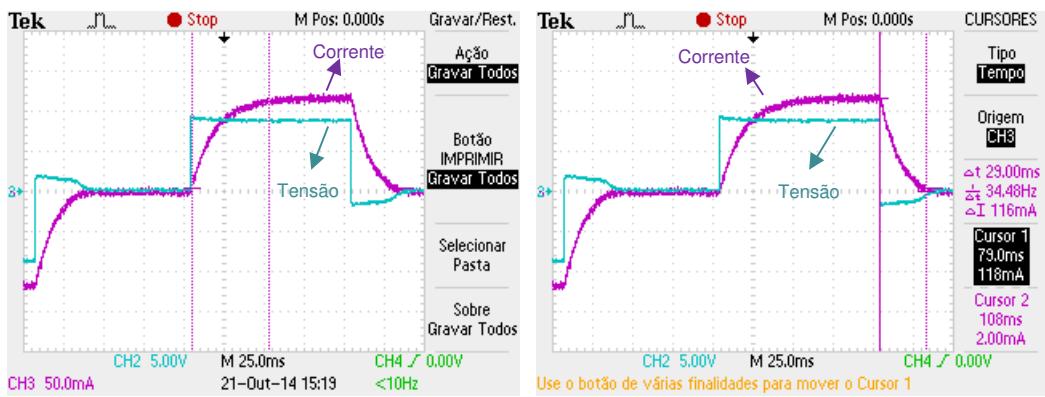


Figura 65. Oscilogramas (*prints*) dos sinais de tensão e corrente do eletroímã, onde: (a) tempo que a corrente leva para subir; (b) tempo que a corrente leva para cair (cada divisão da escala de tempo equivale a 25 ms)

A seguir, foram realizados testes utilizando tempos de parada de 50 e 10 ms (Figura 66a e Figura 66b). No primeiro caso (50 ms), é possível observar que o sinal de corrente está no seu limiar de funcionamento, estabelecendo-se como constante ao final do ciclo. No segundo caso (10 ms), observa-se claramente que os valores de corrente se alteram antes de chegar ao valor máximo esperado.

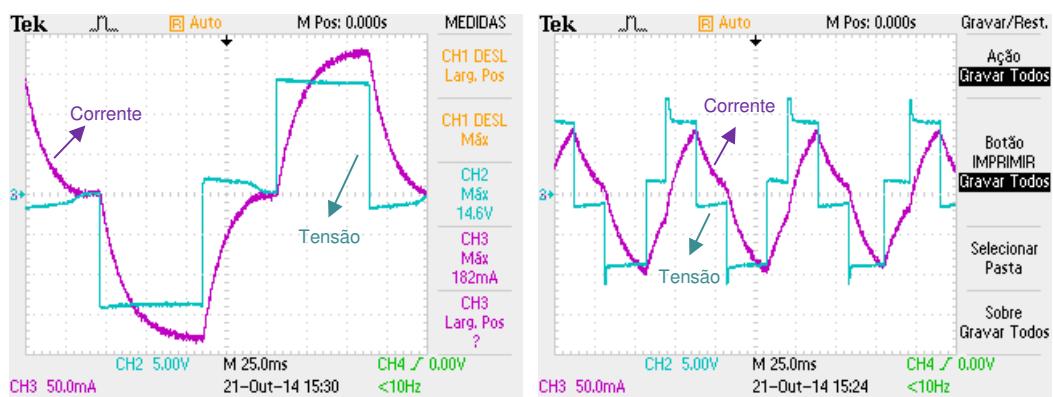


Figura 66. Oscilogramas (*prints*) dos sinais de tensão e corrente do eletroímã, onde: (a) tempo de parada de 50 ms; (b) tempo de parada de 10 ms (cada divisão da escala de tempo equivale a 25 ms)

Finalmente, foram realizados testes variando a tensão de alimentação do eletroímã e mantendo constante os tempos de parada central e lateral em 100 ms, já que as recomendações apontadas pelo fabricante da fonte de soldagem indicam este tempo como sendo o mínimo para que a mesma execute um programa de soldagem. Como mostrado na Figura 67, em todos os casos a corrente do eletroímã chegou a um valor constante. A relação entre tensão e corrente do eletroímã se mostrou linear, sendo

a corrente máxima para 20 V de 252 mA. Teoricamente o sistema de sincronização é então capaz de trabalhar com tensões de até aproximadamente 48 V, já que corrente máxima suportada pelo circuito de controle desenvolvido é de 600 mA.

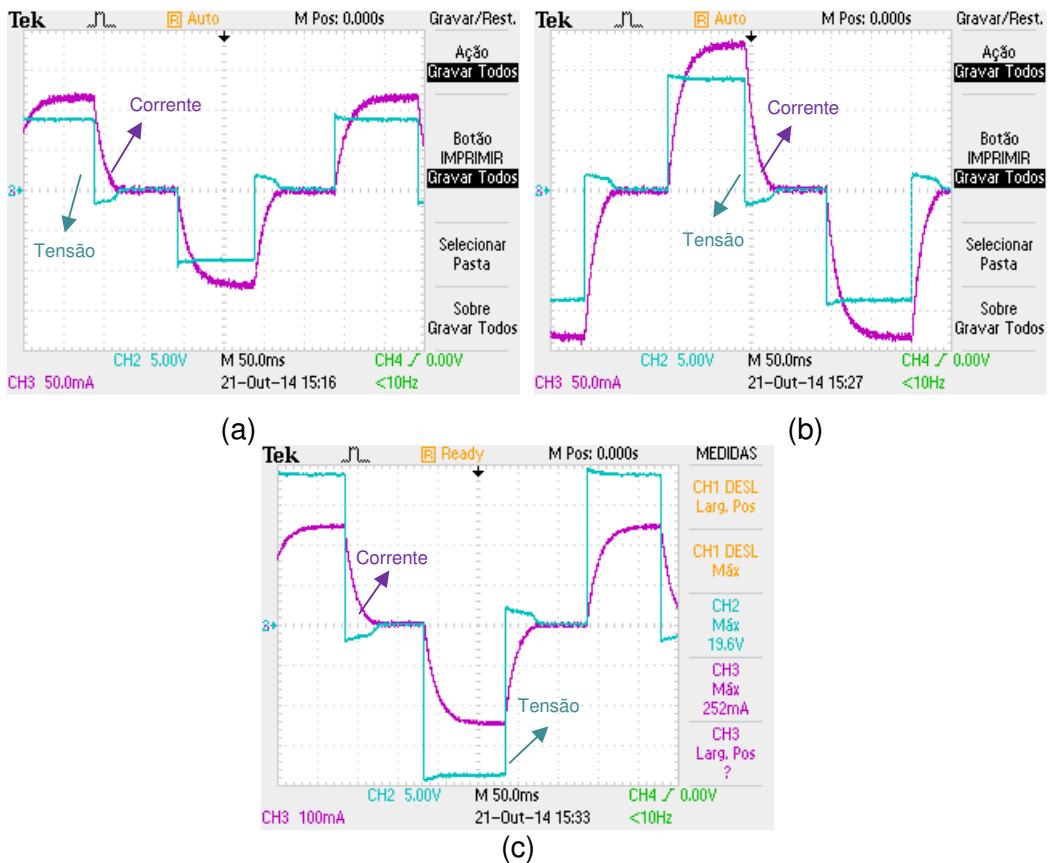


Figura 67. Oscilogramas (*prints*) dos sinais de tensão e corrente do eletroímã para tempos de parada de 100 ms, onde: (a) tensão de 10 V; (b) tensão de 15 V; (c) tensão de 20 V (cada divisão da escala de tempo equivale a 50 ms)

Outros experimentos para avaliar o tempo de resposta do eletroímã em termos de sua ação no arco elétrico foram conduzidos utilizando filmagem de alta velocidade e serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO DA DEFLEXÃO DO ARCO

4.1 Modelo teórico simplificado para deflexão magnética em soldagem TIG

De forma a tentar prever o comportamento (extensão da deflexão) de arcos de soldagem, especificamente do processo TIG, submetidos a campos magnéticos externos, foi desenvolvido um modelo simplificado para a deflexão do arco. Este modelo foi baseado no trabalho desenvolvido por Ueyama et al. (2007), que fora feito para interação entre arcos adjacentes na soldagem MIG/MAG Duplo-Arame. Toma-se a Figura 68 como base para o desenvolvimento do modelo simplificado de deflexão magnética do arco TIG.

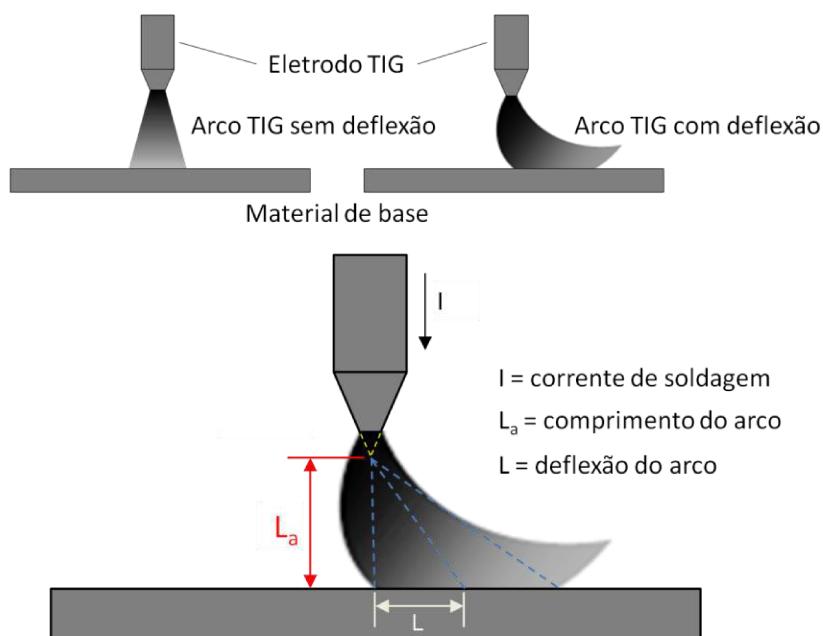


Figura 68. Esquema do arco TIG com campo magnético externo

Sabe-se que o campo magnético externo (imposto pelo eletroímã) induz uma força no arco elétrico de soldagem. Desprezando a força devida ao campo elétrico (provocada pela tensão do arco), a força eletromagnética ou força de Lorentz (F_M) então atuante em um volume unitário do arco é:

$$F_M = j \times B \quad (4.1)$$

Onde: $j = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi R^2}$ = densidade de corrente elétrica;
 S = secção transversal do arco elétrico;
 I = corrente elétrica que passa pela tocha/arco.

Assim, obtém-se:

$$F_M = \frac{I}{\pi R^2} B \quad (4.2)$$

Sabe-se também que:

$$\text{Força} = \text{massa} \times \text{aceleração}$$

Desta forma, para uma unidade de volume do arco, pode-se dizer que:

$$F_M = \rho \frac{d^2L}{dt^2} \quad (4.3)$$

Onde: L = deflexão do arco;
 ρ = densidade do fluido (arco).

Reorganizando os termos da Equação (4.3), tem-se:

$$\frac{F_M}{\rho} = \frac{d^2L}{dt^2} \quad (4.4)$$

Ao integrar no domínio do tempo ambos os lados da Equação (4.4):

$$\frac{F_M}{\rho} t + C_1 = \frac{dL}{dt} \quad (4.5)$$

Onde: C_1 = constante de integração.

Integrando novamente, obtém-se:

$$\frac{F_M t^2}{\rho} + C_1 t + C_2 = L \quad (4.6)$$

Onde: C_2 = constante de integração.

Para se encontrar as constantes de integração da Equação (4.6) são utilizadas as seguintes condições de contorno:

$$\text{Para } t = 0 : \frac{dL}{dt} = 0 \text{ e } C_1 = 0$$

$$\text{Para } t = 0 : L = 0 \text{ e } C_2 = 0$$

Isolando o termo da deflexão (L), tem-se a seguinte formulação:

$$L = \frac{F_M t^2}{\rho} \quad (4.7)$$

Usa-se a definição de velocidade média para encontrar o parâmetro do tempo (t):

$$\text{Velocidade} = \frac{\Delta \text{deslocamento}}{\Delta \text{tempo}}$$

Desta forma:

$$u = \frac{L_a}{t} \text{ e } t = \frac{L_a}{u} \quad (4.8)$$

Onde: u = velocidade do jato de plasma (arco);

L_a = distância entre eletrodo e peça (comprimento do arco).

Substituindo as Equações (4.2) e (4.8) na Equação (4.7), tem-se:

$$L = \frac{IB}{\pi R^2 \rho} \frac{L_a^2}{2u^2} \quad (4.9)$$

Assumindo que a pressão (P) do arco é definida abaixo e é totalmente transformada em um fluxo dinâmico de fluido até encontrar a peça, pode-se usar a equação de Bernoulli para se obter a velocidade do jato de plasma, como realizado por Ueyama et. al. (2007).

$$P = \frac{I^2 \mu_0}{4\pi^2 R^2} = \frac{I \mu_0}{4\pi} j \quad (4.10)$$

Onde: μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo.

De acordo com Ueyama et. al. (2007) pode se assumir que a pressão do arco é totalmente transformada em fluxo de fluido próxima à chapa, podendo-se simplificar a equação de Bernoulli, obtendo-se:

$$P = \frac{\rho u^2}{2} \quad (4.11)$$

Relacionando as Equações (4.10) e (4.11) e isolando o termo da velocidade u , tem-se:

$$u^2 = \frac{I^2 \mu_0}{2\pi^2 R^2 \rho} \quad (4.12)$$

Enfim substituindo a Equação (4.12) na Equação (4.9), encontra-se a formulação do cálculo da deflexão de um arco TIG:

$$L = \frac{IB}{\pi R^2 \rho} \frac{L_a^2}{2 \frac{I^2 \mu_0}{2\pi^2 R^2 \rho}} \quad (4.13)$$

Simplificando:

$$L = B \frac{L_a^2 \pi}{I \mu_0} \quad (4.14)$$

Verificando a coerência da Equação (4.14) por análise dimensional:

$$\begin{aligned} L &= [m] \\ B &= [Gauss] = 10^{-4} [Tesla] \\ L_a &= [m] \\ \mu_0 &= 1,2566 \times 10^{-6} [Tesla \times \frac{m}{A}] \\ I &= [A] \end{aligned}$$

Assim:

$$L = [\text{Tesla}] \frac{[m]^2}{[A][\text{Tesla} \times \frac{m}{A}]} = [m] \quad (4.15)$$

Como mostrado na Equação (4.15) a formulação deduzida para a deflexão é dimensionalmente coerente. A representatividade deste modelo será avaliada na sequência, depois de apresentados os resultados experimentais da medição da deflexão magnética de arcos TIG.

4.2 Deflexão magnética experimental em soldagem TIG

Primeiramente foi feita uma verificação da relação entre a tensão aplicada ao eletroímã e a densidade de fluxo de campo magnético produzida (a linha abaixo do eletrodo de tungstênio foi tomada como referência e as medições feitas sem o arco). As medições dos campos magnéticos produzidos foram realizadas utilizando um gaussímetro (Figura 69) da marca MAGNAFLUX modelo PM-200 (fundo de escala de 200 Gauss AC/DC e resolução de 0,3 Gauss). A Tabela 6 apresenta as medições realizadas. Como mostra a Figura 70, a relação entre tensão do eletroímã e densidade de campo magnético produzido é linear. Sabe-se de trabalho anterior (REIS, 2009) que quanto menor a distância entre o eletroímã e o arco, maior o campo magnético atuante (maior o poder de deflexão).

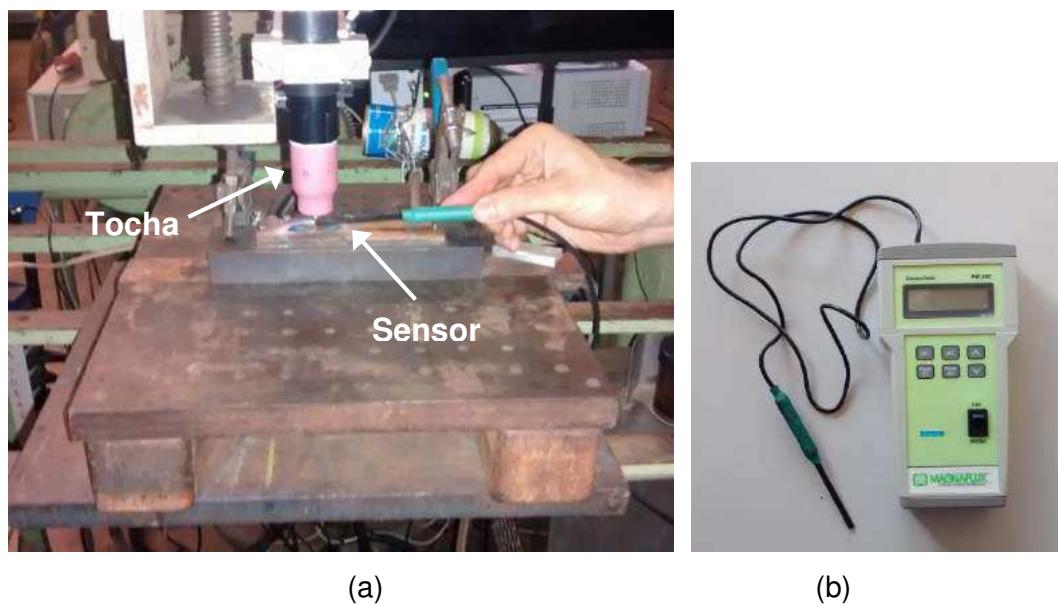


Figura 69. Em (a) medição do campo magnético abaixo do eletrodo, (b) gaussímetro utilizado nas medições de campo magnético

Tabela 6. Relação entre a tensão aplicada ao eletroímã e densidade de campo magnético produzida para uma distância entre a face frontal do núcleo do eletroímã e o arco elétrico (DEA) de 15 mm.

Ensaio	Ue [V]	B [Gauss]
1	10	20.1
2	15	31.6
3	20	41.2
4	25	52.1
5	30	64.9

Ue = tensão do eletroímã; B = densidade de campo magnético.

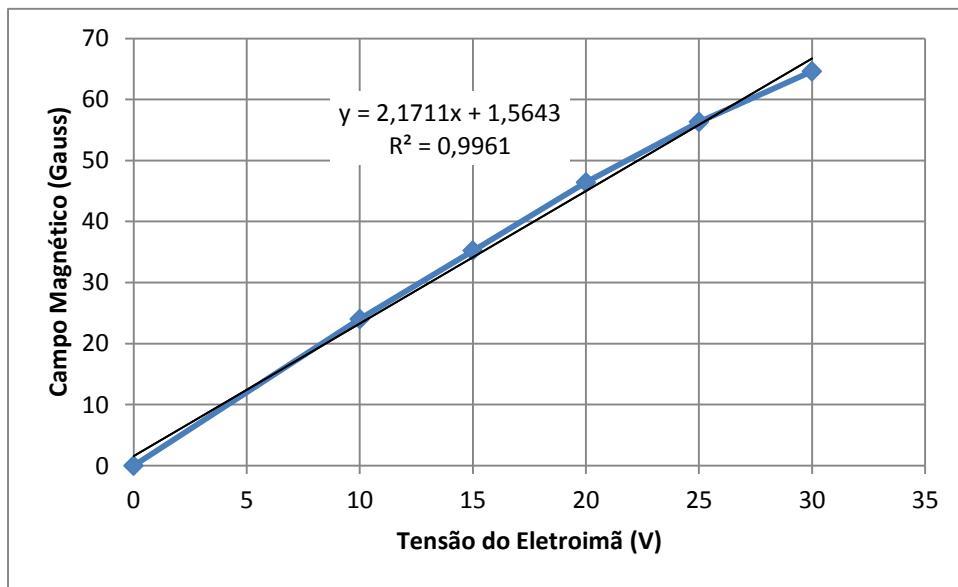


Figura 70. Resultado gráfico da relação entre a tensão aplicada ao eletroímã e densidade de campo magnético produzida para uma distância entre a face frontal do núcleo do eletroímã e o arco elétrico de 15 mm

Então foram feitos ensaios variando o nível de corrente de soldagem e o comprimento de arco e utilizada filmagem de alta velocidade para possibilitar a medição da deflexão. A bancada de ensaios utilizada é ilustrada na Figura 71. A Figura 72 ilustra o método de medição da deflexão, onde as referências C e D representam os pontos onde o arco visualmente perde o contato com a chapa. As medições foram executadas com auxílio do software gratuito ImageJ. O diâmetro do eletrodo de tungstênio utilizado, que tinha 4,09 mm (média de três medidas feita com micrômetro externo Starrett 436.2; faixa de medição: 0-25 mm; resolução: 0,01 mm; exatidão/acurácia: 0,004 mm), foi utilizado como fator de escala para calibração das imagens.

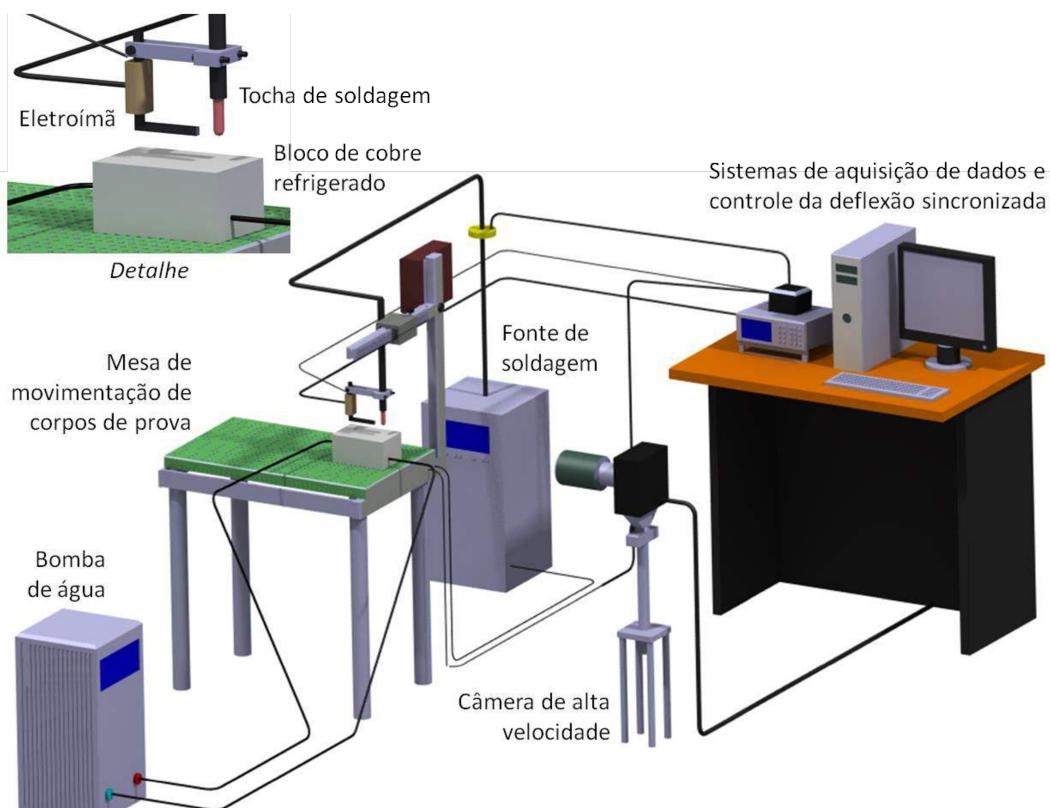


Figura 71. Bancada de ensaios de deflexão magnética em soldagem TIG

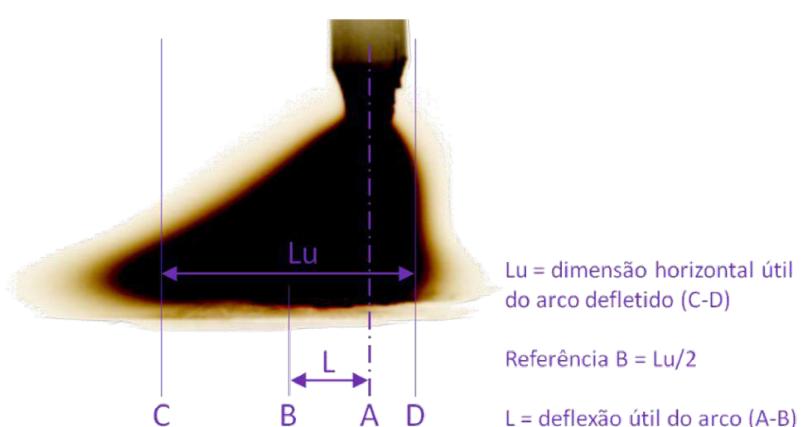
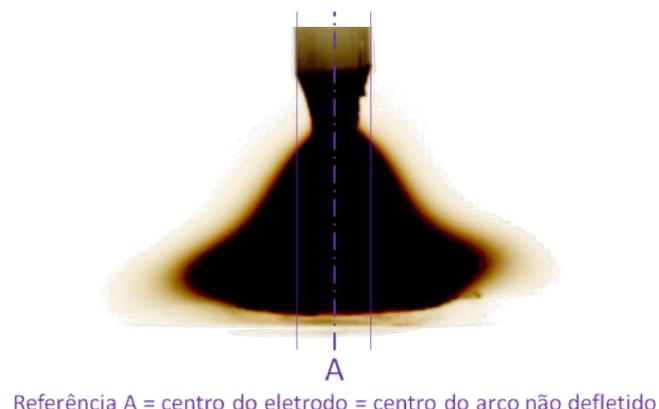


Figura 72. Ilustração do método de medição da deflexão do arco (as cores das imagens do arco foram invertidas para facilitar a visualização)

A Tabela 7 e Tabela 8 mostram, respectivamente, os testes com resultados para avaliação experimental do efeito da corrente de soldagem e do comprimento do arco na deflexão do arco pelo campo magnético. Como indicado nestas tabelas alguns testes tiverem instabilidades do arco e não permitiram medições adequadas. Estas instabilidades (Figura 73) indicam que o arco estava tão defletido que começava a “descolar/desconectar” (inclusive com variação de extensão da deflexão) da chapa de forma muito similar ao mostrado por Reis et al. (2012) e Reis et al. (2013). Essas instabilidades indicam que arcos com menores correntes de soldagem e/ou comprimentos maiores são menos rígidos mecanicamente (mais fáceis de defletir) e são ao mesmo tempo menos rígidos termicamente (mais fáceis de apagar). Isso parece explicar por que Kang e Na (2002) não realizaram experimentos/medições de deflexão de arco em situações conjuntamente com campos magnéticos elevados, correntes de soldagem baixas e comprimentos de arco elevados.

Tabela 7. Ensaios e resultados para avaliação experimental do efeito da corrente de soldagem na deflexão do arco

Ensaios	L_a [mm]	I [A]	B [Gauss]	L direito [mm]	L esquerdo [mm]	L médio [mm]
1*	6,5	100	20,1	-	-	-
2*	6,5	100	31,6	-	-	-
3*	6,5	100	41,2	-	-	-
4*	6,5	100	52,1	-	-	-
5*	6,5	100	64,9	-	-	-
6	6,5	200	20,1	2,97	2,82	2,89
7	6,5	200	31,6	5,68	4,89	5,29
8	6,5	200	41,2	6,80	6,26	6,53
9	6,5	200	52,1	8,86	9,12	8,99
10	6,5	200	64,9	10,96	10,90	10,93
11	6,5	300	20,1	3,19	2,96	3,09
12	6,5	300	31,6	4,92	4,95	4,93
13	6,5	300	41,2	6,93	6,53	6,73
14	6,5	300	52,1	7,99	8,69	8,34
15	6,5	300	64,9	9,41	9,48	9,45

L_a = comprimento do arco; I = corrente de soldagem; B = densidade de campo magnético; L = deflexão do arco; DEA = 15 mm.

* Nestes testes não foi possível medir de maneira adequada a deflexão do arco por incidência de instabilidades no mesmo.

Tabela 8. Ensaios e resultados para avaliação experimental do efeito do comprimento do arco na deflexão do mesmo

Ensaios	L_a [mm]	I [A]	B [Gauss]	L direito [mm]	L esquerdo [mm]	L médio [mm]
1	6,5	200	20,1	2,97	2,82	2,89
2	6,5	200	31,6	5,68	4,89	5,29
3	6,5	200	41,2	6,80	6,26	6,53
4	6,5	200	52,1	8,86	9,12	8,99
5	6,5	200	64,9	10,96	10,90	10,93
6	10	200	31,6	12,44	9,14	10,79
7	10	200	41,2	13,75	10,68	12,22
8*	10	200	52,1	11,40	10,37	10,89

Ensaio	La [mm]	I [A]	B [Gauss]	L direito [mm]	L esquerdo [mm]	L médio [mm]
9	3,5	200	31,6	2,61	0,96	1,79
10	3,5	200	41,2	3,69	1,58	2,63
11	3,5	200	52,1	4,22	2,80	3,51

La = comprimento do arco; I = corrente de soldagem; B = densidade de campo magnético; L = deflexão do arco; DEA = 15 mm.

Obs: Os testes de 1 a 5 correspondem aos testes de 6 a 10 da Tabela 7.

* Neste teste não foi possível medir de maneira adequada a deflexão do arco por incidência de instabilidades no mesmo.



Figura 73. Exemplo de instabilidade de arco presente em alguns casos (correntes mais baixas e/ou comprimentos de arco mais elevados); imagem de arco defletido no Ensaio 5 da Tabela 7 com quase desconexão com chapa (difícil de perceber na imagem pela quantidade de luz da região do arco próxima à chapa incidindo na câmera)

Como indicado na Figura 74, quanto maior o campo magnético, maior a deflexão do arco. Considerando também que arcos sem campo magnético externo apresentam deflexão zero (as curvas deflexão *versus* campo magnético passam pelo zero), este comportamento se mostrou bastante linear, como indicado pelo modelo teórico desenvolvido. Também de acordo com o modelo, os experimentos demonstram que arcos com maiores correntes apresentam deflexões ligeiramente menores, já que são mais rígidos mecanicamente (ação do jato de plasma). Não se teve condições de medir a influência da variação da corrente de soldagem pela impossibilidade de medir a deflexão de arcos com 100 A pela presença de instabilidades.

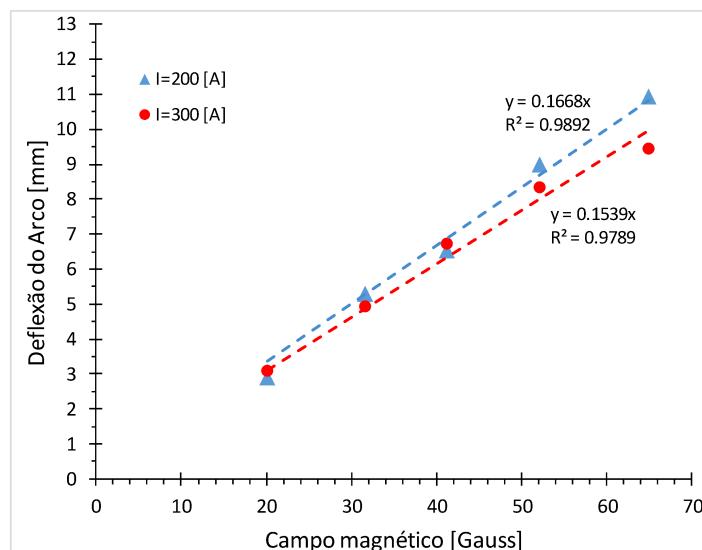


Figura 74. Efeito do campo magnético e da corrente de soldagem na deflexão do arco

Como indicado na Figura 75, para uma mesma corrente de soldagem (200 A), as deflexões aumentaram com o comprimento do arco, o que comprova o comportamento previsto pelo modelo desenvolvido. A Figura 76 mostra em detalhe a influência do aumento do comprimento do arco na deflexão sofrida pelo mesmo para dois níveis de campo magnético. Considerando que arcos “sem comprimento” apresentam deflexão zero, este comportamento se mostrou variar com o quadrado do comprimento do arco, como fora previsto pelo modelo teórico desenvolvido e previsto também por modelos anteriores (LANCASTER, 1986). Considerando que arcos sem campo magnético apresentam deflexão zero, a relação deflexão *versus* campo magnético se mostrou mais uma vez bastante linear, como indicado pelo modelo teórico desenvolvido.

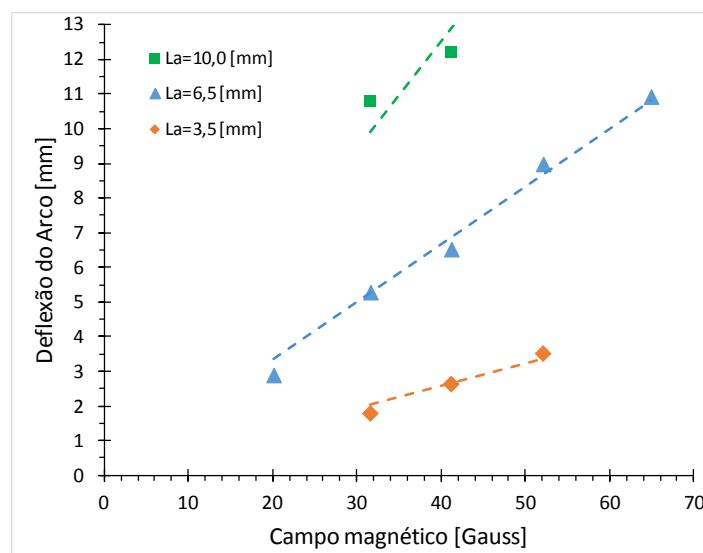


Figura 75. Efeito do campo magnético e do comprimento de arco na deflexão do mesmo

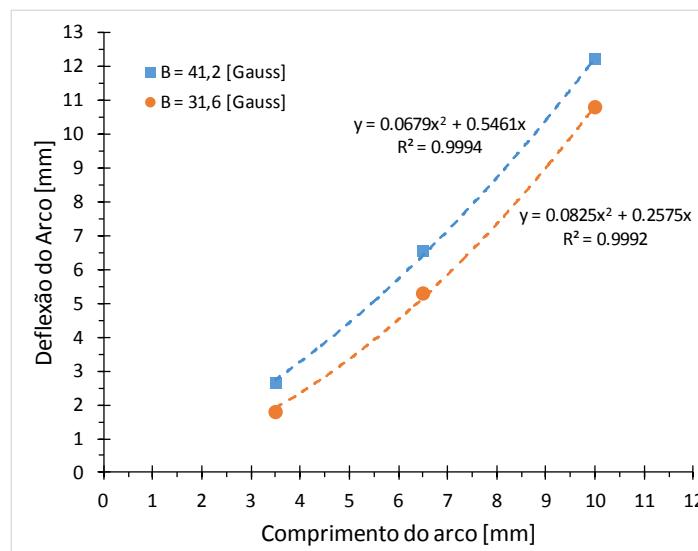


Figura 76. Detalhe do efeito do comprimento de arco na deflexão do mesmo

4.3 Deflexão magnética experimental versus teórica

Como é possível notar na Figura 77 e na Figura 78, o modelo teórico da deflexão magnética do arco, Equação (4.14), indica o mesmo comportamento verificado nos experimentos; a deflexão é diretamente proporcional ao campo magnético e ao comprimento do arco ao quadrado e inversamente proporcional à corrente de soldagem. Entretanto, apesar de representar a tendência de comportamento real do fenômeno de deflexão do arco, o modelo teórico de deflexão não conseguiu estimar de maneira razoável a extensão da deflexão real. Possíveis motivos para tal discrepância nos resultados podem estar relacionados às simplificações feitas, tais como: desconsiderar a distribuição de corrente e pressão no arco (como considerado por Kang e Na (2002)), dificuldade em medir o campo magnético que efetivamente age no arco (certamente o campo real não é uniforme e é diferente do campo magnético medido no ar, até pela interação com o campo magnético do próprio arco), desconsiderar a mudança do comprimento do arco (L_a) com a deflexão do mesmo e também o valor utilizado para a permeabilidade magnética do arco . Para este último fator, como indicado na literatura (JOHNSON, 2015), o adequado seria usar um valor menor que a permeabilidade magnética do vácuo, aumentando o valor teórico da deflexão, o que não foi possível por tal dado não ter sido encontrado na literatura.

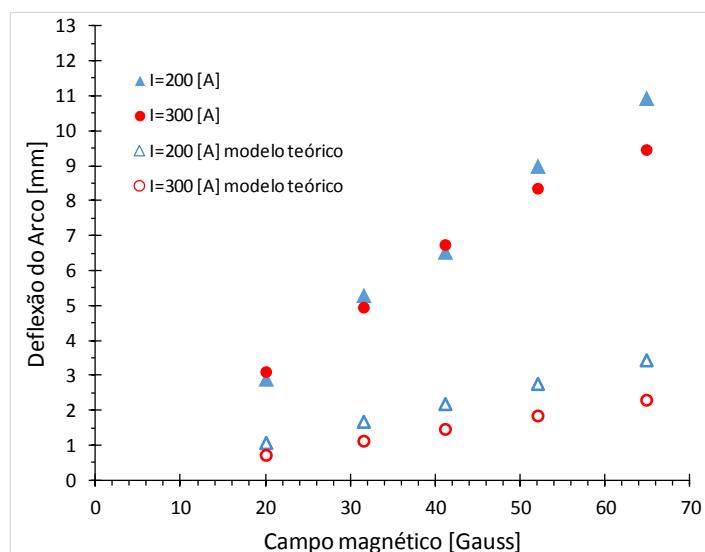


Figura 77. Resultados experimentais versus resultados teóricos para efeito do campo magnético e da corrente de soldagem na deflexão do arco

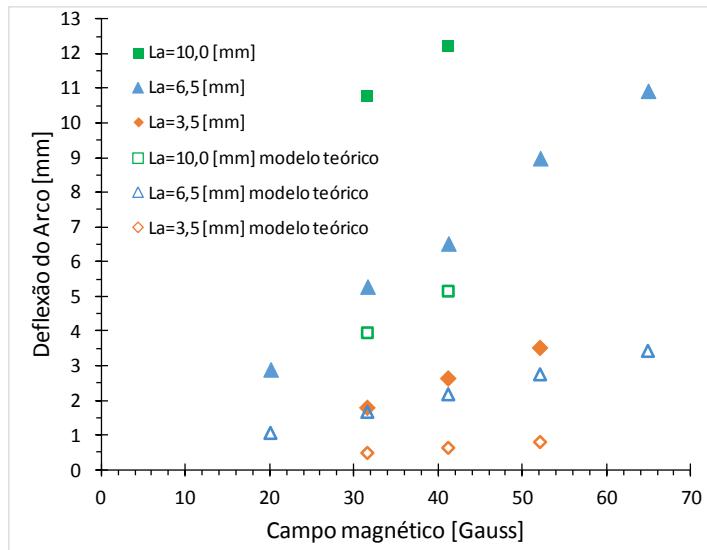


Figura 78. Resultados experimentais *versus* resultados teóricos para efeito do campo magnético e do comprimento de arco na deflexão do mesmo

4.4 Avaliação “visual” da capacidade de resposta da deflexão magnética

A fim de verificar, pelas imagens em alta velocidade do arco defletido, a capacidade de resposta do sistema de deflexão magnética sincronizada, foram feitos dois testes conforme mostra a Tabela 9. Pelas imagens do arco defletido (Figura 79) é possível verificar que com 50 ms de tempos de parada nas laterais o arco alcançou virtualmente os mesmos níveis de deflexão outrora obtidos com 200 ms de tempos de parada nas laterais. Assim, conclui-se que os 50 ms foram suficientes para que a corrente da bobina do eletroímã (controlada pela tensão do eletroímã) chegassem ao nível necessário para levar o arco ao alcance esperado (em torno de 12 mm). Já com a redução destes tempos de parada para apenas 5 ms, os níveis de alcance do arco foram significativamente reduzidos (para cerca de 8 mm), indicando que neste caso a corrente da bobina do eletroímã não chegou ao nível necessário para levar o arco ao alcance esperado. Como o fabricante da fonte de soldagem utilizada nos experimentos recomenda um tempo de permanência de pelo menos 100 ms em cada programa de soldagem utilizado antes de mudar para outro programa durante a operação e considerando que já em 50 ms o sistema de sincronização foi capaz de chegar ao nível de deflexão esperado, decidiu-se para este trabalho utilizar 100 ms como o tempo mínimo de atuação das combinações de posição do arco e modo/nível de corrente de soldagem.

Tabela 9. Testes para avaliação do tempo de resposta da deflexão magnética sincronizada

Ensaio	Tensão do Eletroímã [V]	Corrente de soldagem [A]	Tempo de Parada Esquerda [ms]	Tempo de Parada Direita [ms]
1	20	200	50	50
2	20	200	5	5
3*	20	200	200	200

Obs: Neste caso foi utilizado o programa versão β – sem tempo de parada central – e uma distância eletrodo-peça/comprimento de arco de 6,5 mm. DEA = 15 mm.

* Ensaio 8 da Tabela 7 para efeitos de comparação.

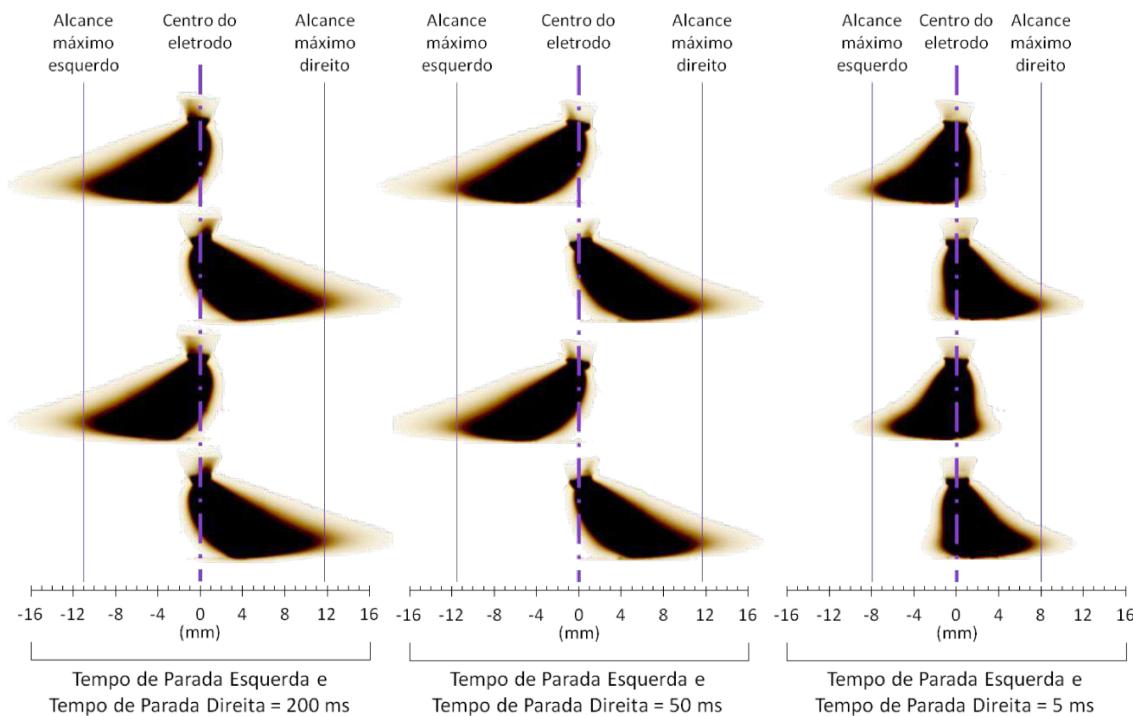


Figura 79. Alcance máximo do arco para diferentes tempos de parada lateral (200, 50 e 5 ms) (as cores das imagens do arco foram invertidas para facilitar a visualização)

4.5 Avaliação “visual” do sincronismo entre oscilação magnética e corrente de soldagem

Um teste foi feito para demonstrar visualmente o sincronismo entre a capacidade de fusão do arco (representado pela corrente de soldagem) e a posição-tempo de aplicação desta capacidade de fusão. A Tabela 10 lista os parâmetros utilizados neste caso. Para uma tensão do eletroímã (deflexão) fixada em 20 V, foram utilizados três posições-tempos de parada e três níveis de corrente diferentes. O resultado do comportamento do arco elétrico (posição e volume) em cada fase – combinação de corrente de soldagem e posição-tempo de atuação – é apresentado na Figura 80.

Tabela 10. Parâmetros para demonstração do sincronismo entre oscilação magnética (posição-tempo do arco) e corrente de soldagem

Ensaio	Tensão do Eletroímã [V]	Tempo de Parada Esquerda [ms]	Tempo de Parada Central [ms]	Tempo de Parada Direita [ms]	Corrente de Soldagem Esquerda [A]	Corrente de Soldagem Central [A]	Corrente de Soldagem Direita [A]
1	20	250	500	750	100	200	300

Distância eletrodo-peça/comprimento de arco = 6,5 mm. DEA = 15 mm.

Nota-se, pela Figura 80, que de início o arco, quando defletido para a esquerda (parada lateral esquerda), apresenta menor “volume” devido ao menor nível de corrente de soldagem utilizado (menor grau de ionização). Na sequência, passado o pequeno tempo de aplicação deste nível baixo de corrente, quando a tensão do eletroímã vai à zero, a corrente de soldagem muda para um nível intermediário, o que fica evidente pelo aumento de “volume” do arco. Rapidamente o arco chega então à posição sem deflexão (parada central) mantendo este nível de corrente de soldagem intermediário. A seguir, passado o maior tempo de aplicação deste nível intermediário de corrente, a tensão do eletroímã vai para o mesmo nível então utilizado na posição de deflexão esquerda, mas desta vez com sinal invertido (negativo). Neste momento a corrente de soldagem sobe a um nível mais alto (nitidamente o arco aumenta de “volume”). Rapidamente o arco é então defletido para a direita mantendo este nível de corrente de soldagem elevado (parada lateral direita). A seguir, passado o tempo (ainda maior) de atuação deste nível elevado de corrente, a tensão do eletroímã volta a zero e a corrente de soldagem muda novamente para um nível intermediário (o arco diminui de “volume”). Rapidamente o arco retorna então à posição sem deflexão (parada central) mantendo este nível de corrente de soldagem intermediário. Depois de decorrido novamente o tempo de permanência sem deflexão do arco e com corrente de soldagem intermediária, a tensão do eletroímã retorna ao nível programado com sinal positivo, o que faz a corrente de soldagem retornar ao menor nível. Rapidamente o arco é então defletido para a esquerda mais uma vez, dando início a um novo ciclo de oscilação magnética sincronizada com a corrente de soldagem. O pequeno tempo necessário para o arco se estabilizar em cada posição da oscilação (transição entre deflexões) reflete o comportamento da corrente da bobina do eletroímã – a corrente da bobina, que induz o campo magnético para deflexão, muda um pouco atrasada em relação à tensão, aqui utilizada como sinal de controle. Acredita-se que este tempo poderia ser mais reduzido utilizando uma fonte de imposição de corrente para o controle do eletroímã. Por fim, observa-se ainda pela Figura 80 que os níveis de tensão do eletroímã e corrente de soldagem, bem como os tempos de permanência nestes níveis, ficaram de acordo ao programado (Tabela 10).

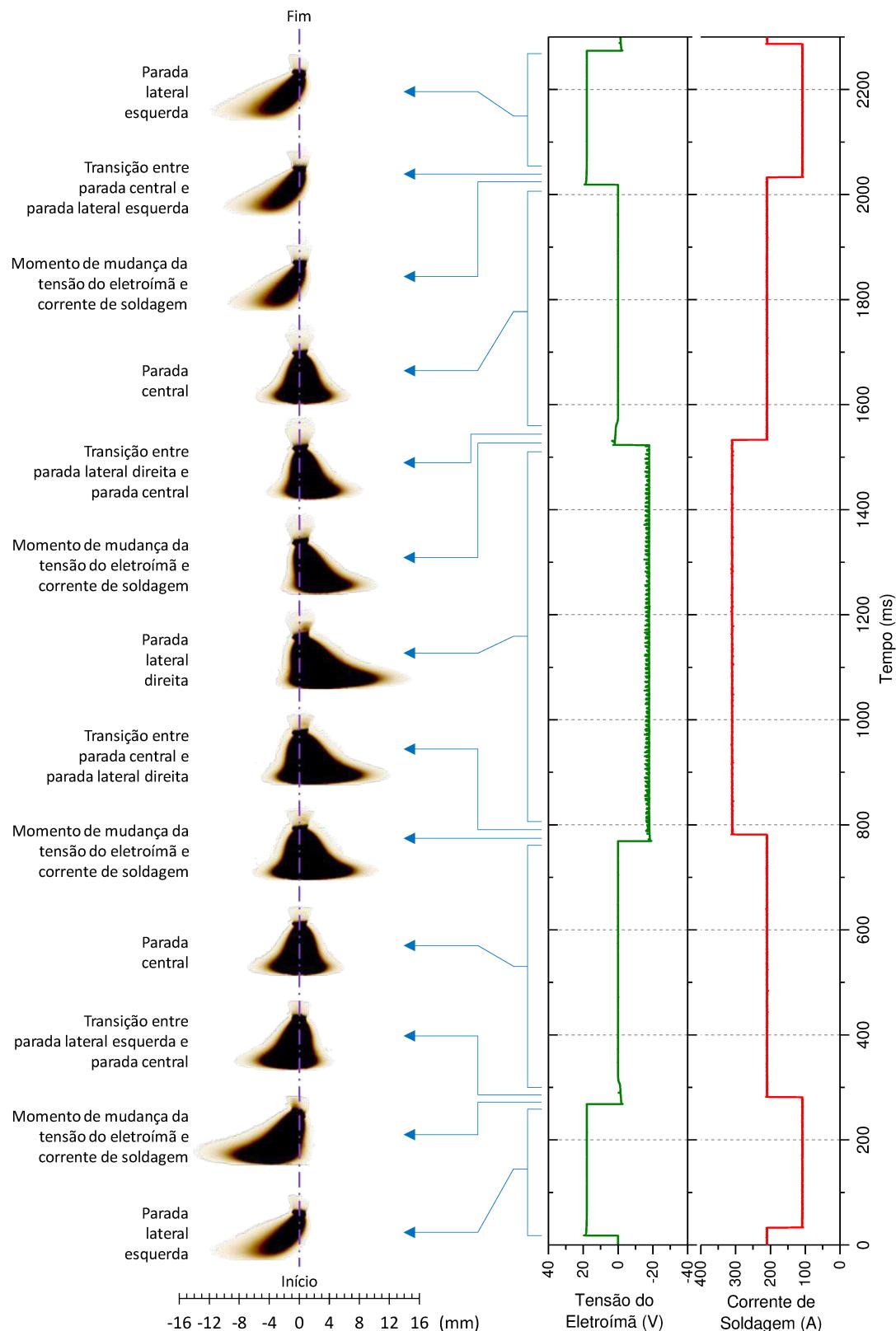


Figura 80. Sequência de imagens do arco para diferentes fases de tensão do eletroímã (campo magnético – nível de deflexão) e de corrente de soldagem demonstrando o sincronismo entre posição do arco (oscilação magnética) e corrente de soldagem (as cores das imagens do arco foram invertidas para facilitar a visualização; sequência de baixo para cima)

CAPÍTULO V

OSCILAÇÃO MAGNÉTICA SINCRONIZADA COM O PROCESSO TIG

Neste capítulo são apresentados os parâmetros utilizados, a sequência experimental, bem como os resultados e as respectivas análises da avaliação da oscilação magnética sincronizada com o processo TIG. Neste caso, foi utilizada oscilação transversal/lateral à direção de soldagem com três posições de parada do arco sincronizadas com três níveis de corrente de soldagem. De forma a embasar a análise desta combinação, são apresentadas grandezas elétricas resultantes (tanto do eletroímã, quanto do processo de soldagem), alguns oscilogramas dos sinais elétricos obtidos (tanto do eletroímã, quanto do processo de soldagem), o aspecto superficial dos cordões obtidos, além de medidas relacionadas à largura dos cordões resultantes.

5.1 Materiais e equipamentos utilizados na soldagem TIG

Além dos equipamentos apresentados anteriormente, foi utilizada uma tocha de soldagem TIG automática (fabricante Binzel, modelo TIG 27A-27B). Como material de base, foram usadas chapas de aço comum ao carbono, de 3 mm de espessura, 250 mm de comprimento e 60 mm de largura. As chapas foram limpas (por lixadeira elétrica manual) e receberam uma marcação da linha de centro por meio de um punção antes dos experimentos. As soldagens foram feitas por simples fusão sobre chapa sem material de adição (cordões autógenos). Como ilustrado na Figura 81, as soldagens foram feitas com os corpos de prova sobre um suporte de aço com cobrejunta de cobre. Nesses ensaios foi empregada a versão α do software de controle do eletroímã e a montagem do eletroímã foi em paralelo à direção de soldagem, resultando em três posições de parada do arco e em uma oscilação do mesmo transversal/lateral à direção de soldagem.

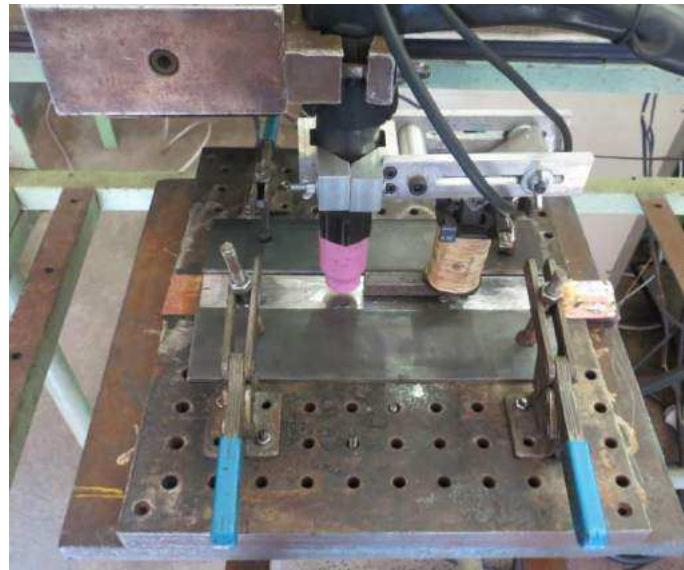


Figura 81. Montagem de corpos de prova para soldagem TIG (soldagem da esquerda para a direita – oscilação transversal/lateral)

5.2 Parâmetros gerais da soldagem TIG

A Tabela 11 apresenta os parâmetros gerais do processo TIG para os ensaios em aço carbono.

Tabela 11. Parâmetros gerais do processo TIG para os ensaios em aço carbono

Distância Eletrodo Peça - DEP [mm]	6,5
Distância Eletroímã Arco/Eletrodo [mm]	15
Distância Eletroímã Peça [mm]	3
Velocidade de Soldagem [mm/min]	200
Gás	Argônio
Vazão de Gás [l/min]	14
Composição do Eletrodo [% Th]	2
Diâmetro do Eletrodo [mm]	4
Ângulo de Ponta do Eletrodo	60º
Ângulo de Inclinação do Eletrodo/Tocha	0º

As configurações dos ensaios com o processo TIG são mostradas na forma de fluxograma na Figura 82. Foram realizados 22 ensaios, que são apresentados na sequência, mesmo que em tabelas diferentes, por questões de rastreabilidade. Os primeiros ensaios visaram produzir condições de referências sem oscilação e/ou sincronismo para servirem de base de comparação para as configurações com oscilações sincronizadas.

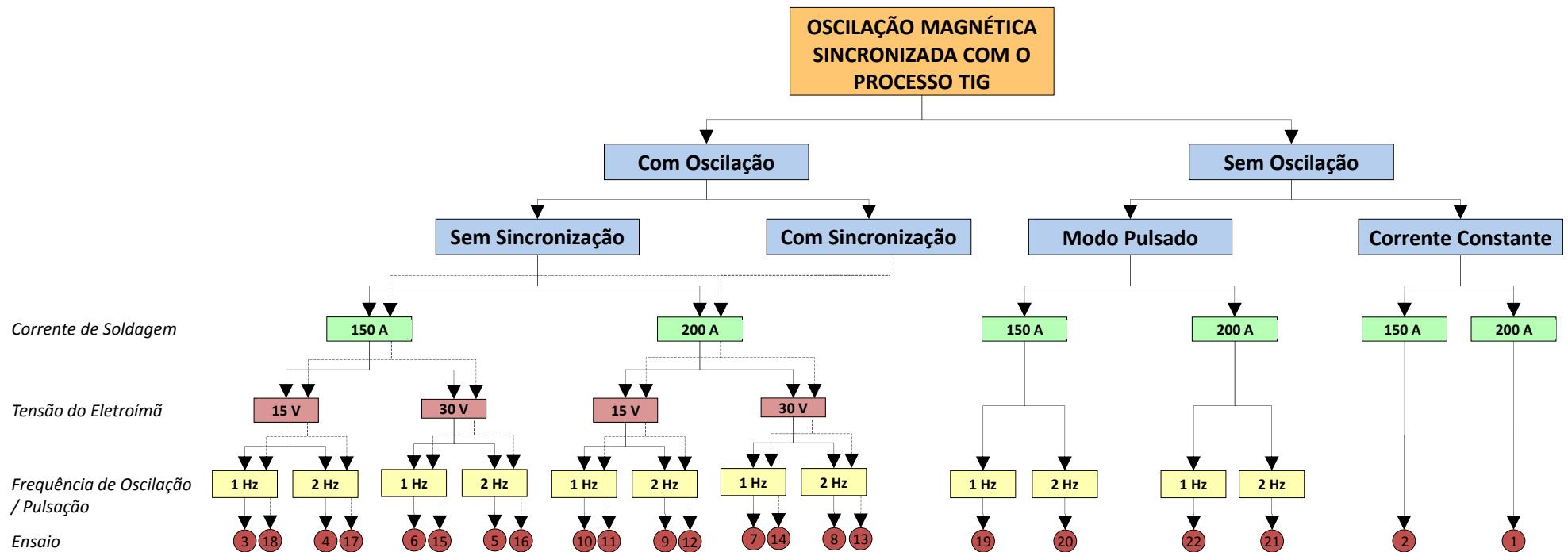


Figura 82. Fluxograma dos ensaios realizados com o processo TIG

A Tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados para os ensaios com processo TIG com corrente constante e sem oscilação do arco.

Tabela 12. Ensaio com processo TIG em aço carbono com corrente constante e sem oscilação do arco

Ensaio	Corrente de Soldagem [A]
1	200
2	150

Para a realização dos ensaios com oscilação magnética (sem e com sincronização), os tempos de parada (esquerda, central e direita) do arco foram configurados conforme apresentado na Tabela 13. Os tempos de parada utilizados resultaram em duas frequências de oscilação magnética (1 e 2 Hz). Para facilitar, as duas frequências resultantes serão mencionadas no texto ao se fazer referência aos dois conjuntos de tempos de parada de arco utilizados.

Tabela 13. Tempos de parada nas diferentes posições do arco na chapa e frequências de oscilação magnética resultantes

Tempo de Parada Esquerda [ms]	Tempo de Parada Central [ms]	Tempo de Parada Direita [ms]	Frequência de Oscilação [Hz]
300	250	200	1
150	125	100	2

A Tabela 14 apresenta os parâmetros utilizados para os ensaios com corrente constante e com oscilação magnética. Nestes ensaios foram variadas a corrente de soldagem, tensão do eletroímã (nível de deflexão do arco) e frequência de oscilação, cada um em dois níveis diferentes.

Tabela 14. Ensaio com processo TIG em aço carbono com corrente constante e com oscilação magnética

Ensaio	Corrente de Soldagem [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
3	150	15	1
4	150	15	2
5	150	30	2
6	150	30	1
7	200	30	1
8	200	30	2
9	200	15	2
10	200	15	1

Para avaliar o efeito da variação de corrente em cada posição de parada do arco, foram utilizados um nível corrente de soldagem esquerda, um de corrente de soldagem central e um de corrente de soldagem direita, mas sempre mantendo as correntes médias em 150 ou 200 A (mesmos níveis de corrente utilizados nos ensaios anteriores). A Tabela 15 apresenta os valores de corrente nas diferentes posições do arco na chapa para cada corrente média utilizada.

Tabela 15. Correntes de soldagem nas diferentes posições de parada do arco na chapa para cada corrente média utilizada

Corrente Média de Soldagem [A]	Corrente de Soldagem Esquerda [A]	Corrente de Soldagem Central [A]	Corrente de Soldagem Direita [A]
150	210	111	158
200	280	148	210

A Tabela 16 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios com processo TIG em aço carbono com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem.

Tabela 16. Ensaio com processo TIG em aço carbono com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem (as correntes em cada posição do arco durante a oscilação estão na Tabela 15)

Ensaio	Corrente de Soldagem Média [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
11	200	15	1
12	200	15	2
13	200	30	2
14	200	30	1
15	150	30	1
16	150	30	2
17	150	15	2
18	150	15	1

A Tabela 17 apresenta os ensaios com processo TIG em aço carbono com modo de soldagem “pulsado” (três de níveis de correntes diferentes em sequência) e sem oscilação magnética. Estes ensaios foram realizados com a mesma sequência de correntes e tempos dos ensaios com oscilação sincronizada para efeitos de comparação.

Tabela 17. Ensaio com processo TIG em aço carbono com modo de soldagem “pulsado” e sem oscilação magnética (a frequência de pulsação e os níveis de corrente utilizados foram os mesmos apresentados nas Tabela 13 e Tabela 15 – duas frequências de pulsação e três níveis de corrente em sequência)

Ensaio	Corrente de Soldagem Média [A]	Frequência de Pulsação [Hz]
19	150	1
20	150	2
21	200	2
22	200	1

5.3 Grandezas elétricas resultantes da soldagem TIG

A Tabela 18 apresenta as grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo TIG coletadas a partir das informações adquiridas pelo sistema de aquisição de dados. Em linhas gerais as grandezas elétricas, inclusive aquelas resultantes dos ensaios de oscilação magnética sincronizada, ficaram de acordo com o programado, evidenciando o bom funcionamento do sistema de controle do eletroímã e da fonte de soldagem no caso do processo TIG.

Tabela 18. Grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo TIG

Ensaio	Tensão do Eletroímã				Corrente de Soldagem e Tensão do Arco		
	Tensão Esquerda [V]	Tensão Central [V]	Tensão Direita [V]	Frequência [Hz]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Frequência [Hz]
CORRENTE CONSTANTE E SEM OSCILAÇÃO DO ARCO - Tabela 12							
1	-	0,07	-	-	205,07	14,53	-
2	-	0,07	-	-	154,53	12,86	-
CORRENTE CONSTANTE E COM OSCILAÇÃO MAGNÉTICA - Tabela 14							
3	-12,98	0,30	13,16	1,01	154,38	13,14	-
4	-13,03	0,53	13,23	1,97	154,41	13,03	-
5	-27,47	0,78	27,72	1,98	154,43	12,89	-
6	-27,51	-0,24	27,72	1,00	154,43	12,86	-
7	-27,49	-0,24	27,70	1,00	204,93	13,87	-
8	-27,54	-0,61	27,78	2,00	204,93	13,76	-
9	-13,03	0,51	13,23	1,98	204,82	14,22	-
10	-13,01	0,15	13,19	1,01	204,79	14,20	-
SINCRONIZAÇÃO ENTRE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA E CORRENTE DE SOLDAGEM - Tabela 16							
11	-13,02	-0,18	13,21	0,99	203,65	14,62	1,00
12	-13,04	0,41	13,22	1,99	206,44	14,15	2,04
13	-27,52	-0,60	27,74	2,01	202,95	14,18	2,03
14	-27,48	-0,28	27,68	1,00	204,67	14,35	1,00
15	-27,50	0,25	27,69	0,99	153,92	13,33	1,01
16	-27,57	-0,56	27,81	1,99	154,80	13,55	1,98
17	-13,06	-0,38	13,24	2,00	154,17	13,56	2,00
18	-13,02	-0,17	13,20	1,00	155,62	13,39	1,00
MODO DE SOLDAGEM “PULSADO” E SEM OSCILAÇÃO MAGNÉTICA - Tabela 17							
19	-	0,07	-	-	153,92	13,43	1,01
20	-	0,07	-	-	156,37	13,27	1,98
21	-	0,07	-	-	204,46	14,05	1,98
22	-	0,07	-	-	205,09	14,19	1,01

5.4 Oscilogramas resultantes da soldagem TIG

A seguir são apresentados alguns dos oscilogramas obtidos a partir das aquisições dos sinais de tensão do eletroímã, corrente de soldagem e tensão do arco, como representativos dos ensaios realizados. Os demais oscilogramas relativos aos ensaios com processo TIG não apresentados neste capítulo encontram-se no APÊNDICE I.

A Figura 83 e a Figura 84 apresentam os oscilogramas dos ensaios 3 e 8, respectivamente. Os níveis de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão do eletroímã estão de acordo com a Tabela 14 que corresponde aos experimentos realizados com o processo TIG na configuração com corrente constante e com oscilação magnética. Os valores destas medições podem ser vistos na Tabela 18. Pode-se comprovar que a tensão do eletroímã apresentou níveis conforme fora selecionado, assim como a corrente de soldagem e tensão do arco, que permaneceram constantes nos níveis desejados.

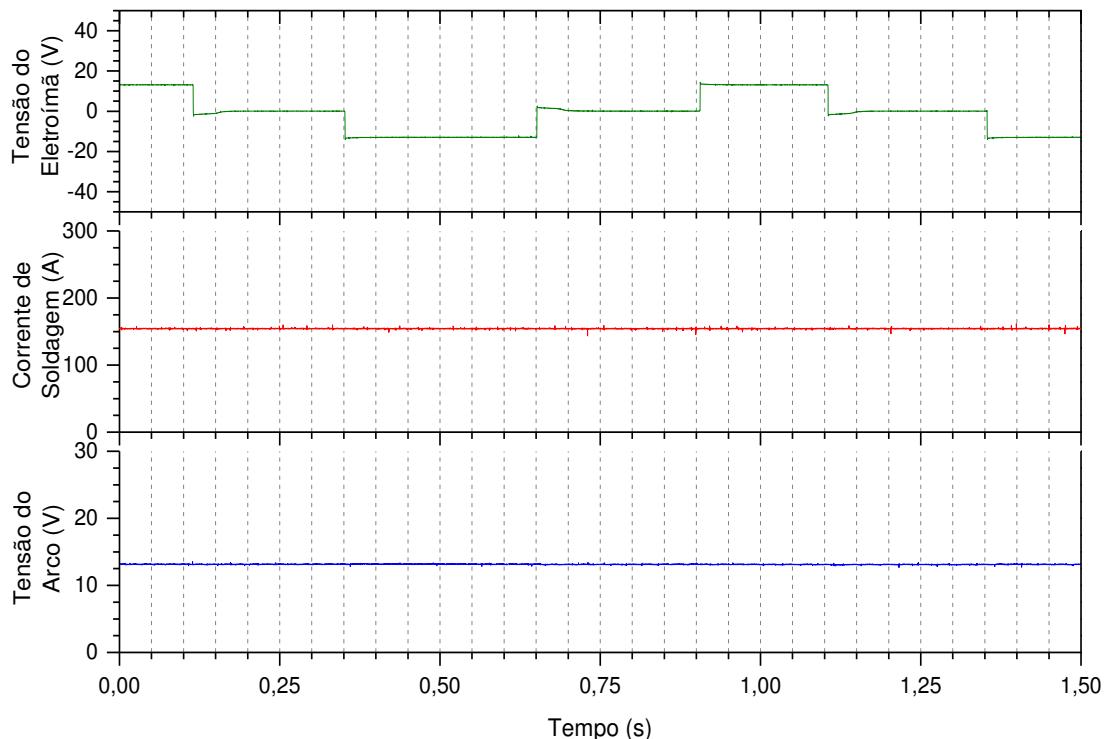


Figura 83. Oscilograma referente ao ensaio 3 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética - Tabela 14

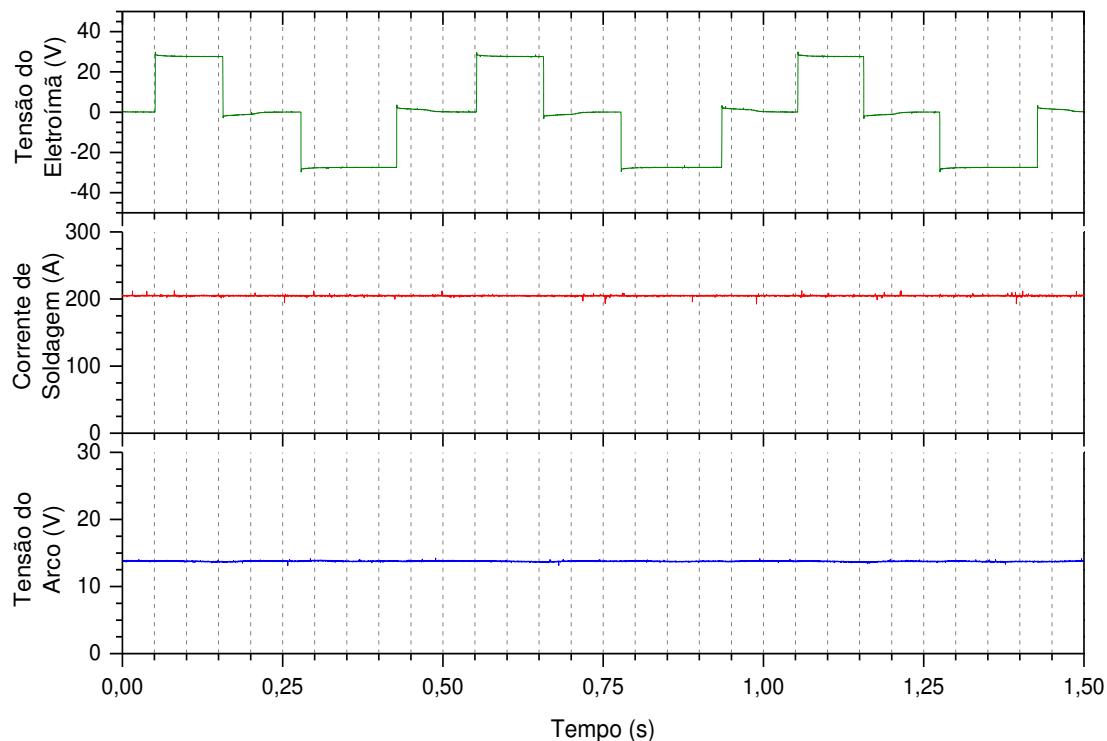


Figura 84. Oscilograma referente ao ensaio 8 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética - Tabela 14

A Figura 85 e Figura 86 apresentam os oscilogramas referentes aos ensaios com processo TIG na configuração com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem - Tabela 16. Nota-se nestes casos, que a corrente de soldagem e tensão do arco acompanharam os níveis da tensão do eletroímã, evidenciando o sincronismo, apesar de um pequeno atraso em alguns casos (não maior que 50 ms), que corresponde ao tempo necessário para se estabelecer o sinal do eletroímã, conforme descrito no item 3.3.2 Análise da tensão *versus* corrente do eletroímã. Além disso, observa-se que os níveis de corrente de soldagem e tempo de permanência na posição esquerda foi maior, esta posição corresponde à tensão do eletroímã em níveis negativos. Por último, pode-se observar que a frequência também correspondeu aos valores selecionados.

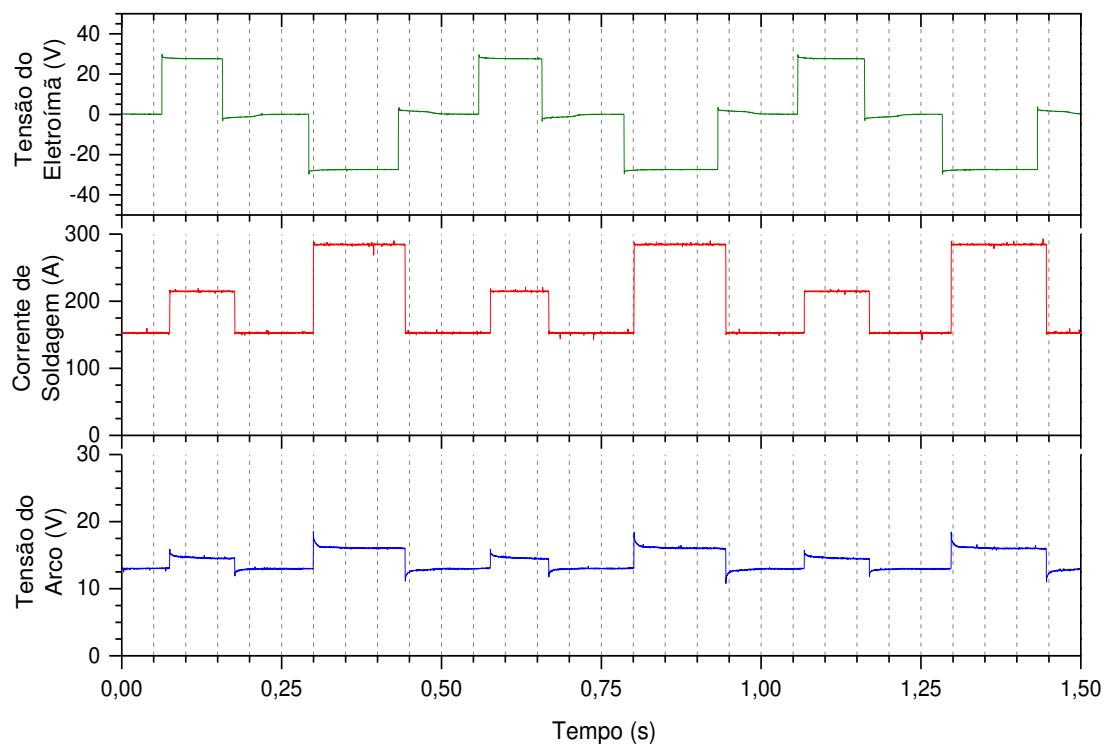


Figura 85. Oscilograma referente ao ensaio 13 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem - Tabela 16

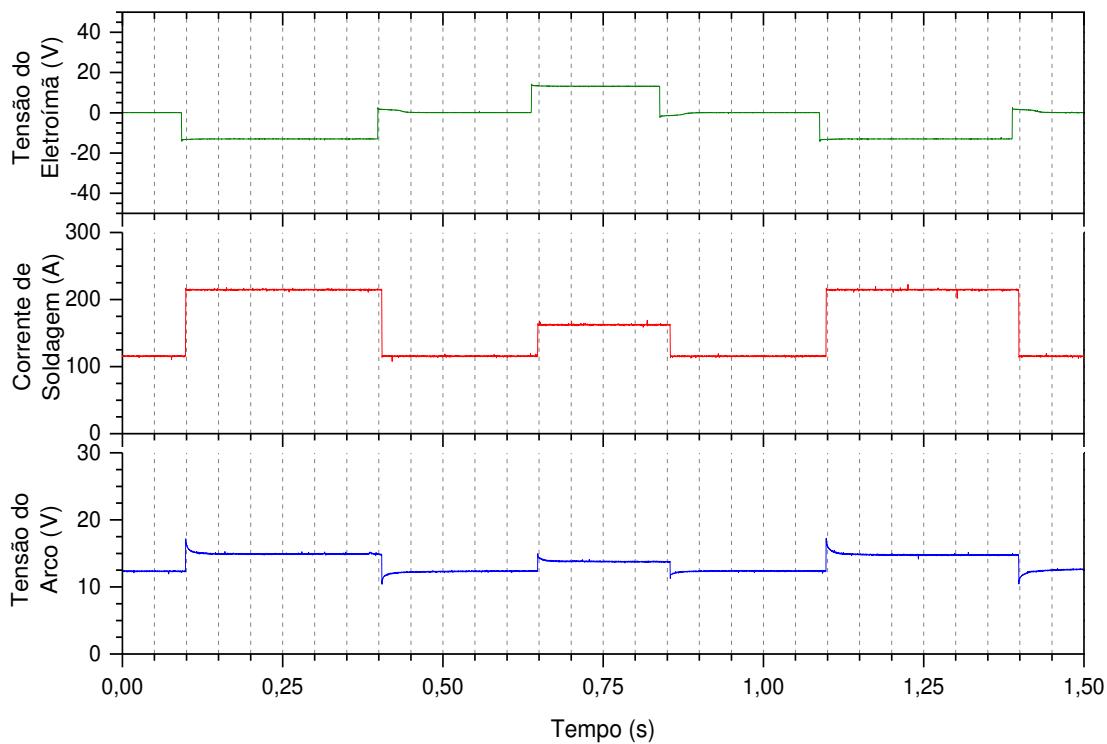
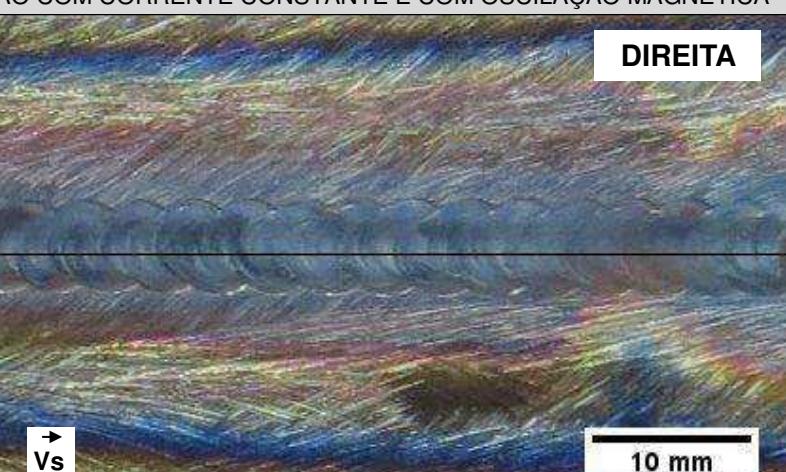
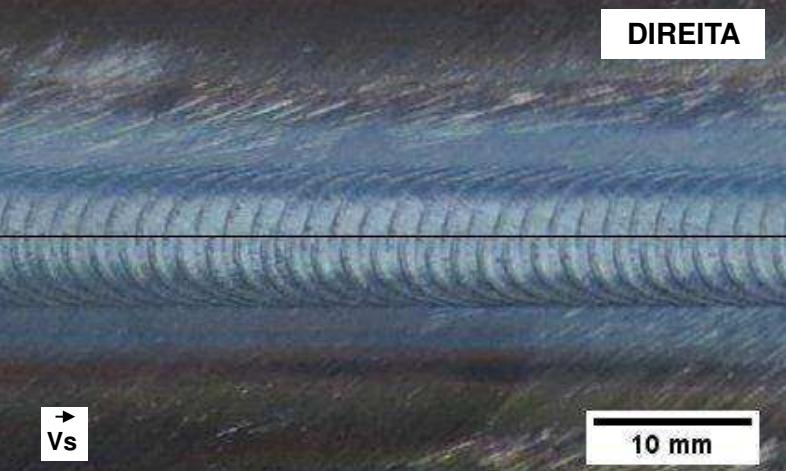
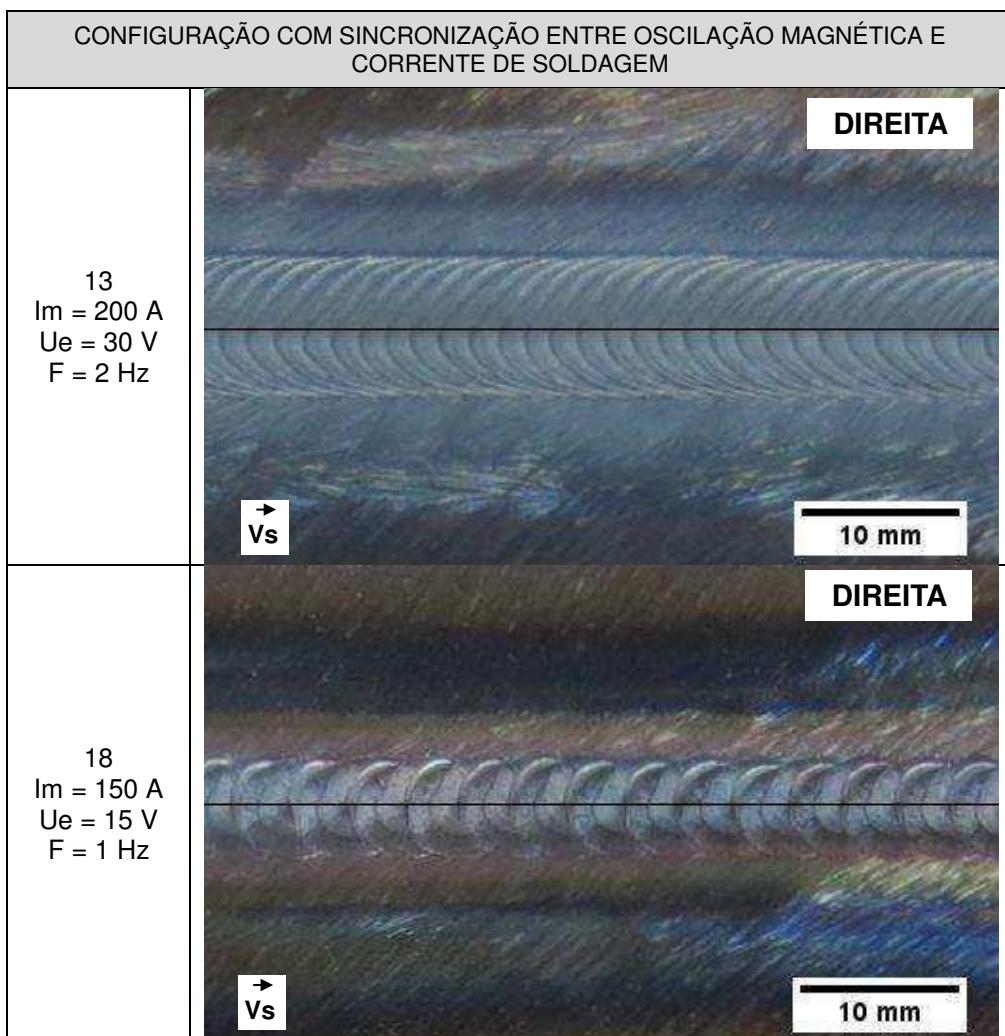


Figura 86. Oscilograma referente ao ensaio 18 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem - Tabela 16

5.5 Imagens dos cordões da soldagem TIG

A Figura 87 apresenta o aspecto superficial (foto superior) dos cordões de solda correspondentes aos oscilogramas apresentados neste capítulo. Nota-se o aumento da largura dos cordões com o aumento da amplitude de deflexão (tensão do eletroímã) e o aumento do espaçamento entre as marcas de fusão com a diminuição da frequência de oscilação, quando comparados entre si os ensaios sem sincronização (3 e 8), e os ensaios com sincronização (13 e 18). As imagens dos cordões dos outros ensaios com o processo TIG encontram-se no APÊNDICE II.

Ensaio	Imagen
CONFIGURAÇÃO COM CORRENTE CONSTANTE E COM OSCILAÇÃO MAGNÉTICA	
3 I = 150 A Ue = 15 V F = 1 Hz	
8 I = 200 A Ue = 30 V F = 2 Hz	



Onde: I = corrente de soldagem, I_m = corrente média de soldagem, U_e = tensão do eletroímã;
 F = frequência de oscilação

Figura 87. Aspecto superficial (foto superior) dos cordões de solda obtidos com o processo TIG (espessura da chapa de 3 mm) com linhas centrais correspondendo ao centro do arco sem deflexão (trajetória da ponta do eletrodo)

5.6 Medidas relacionadas à largura dos cordões da soldagem TIG

A Figura 88 mostra como foram medidos os parâmetros de largura dos cordões resultantes da soldagem TIG. O centro do cordão (linha de referência A) foi obtido através de marcações previamente realizadas no corpo de prova. Foram realizadas três medidas de largura para cada corpo de prova, em regiões diferentes do mesmo (início, meio e fim).

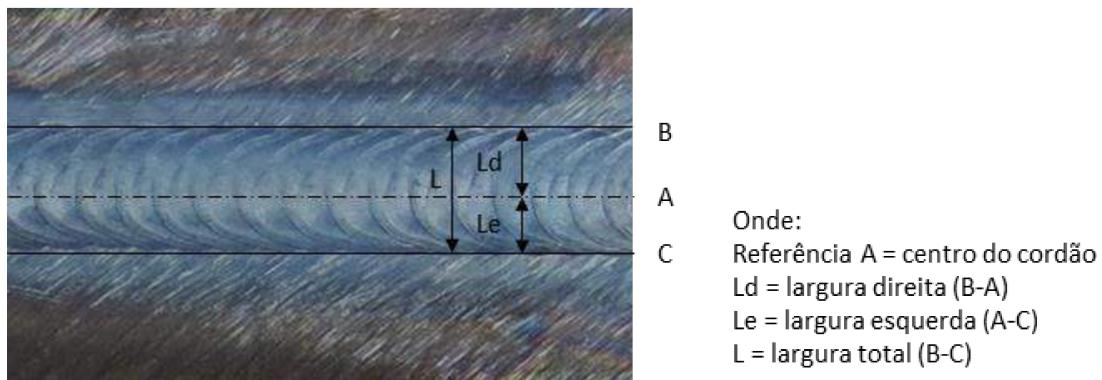


Figura 88. Ilustração de como foram medidos os parâmetros de largura dos cordões resultantes da soldagem TIG

A Tabela 19 apresenta os resultados dessas medições. A tabela completa com todas as medições realizadas está apresentada no APÊNDICE III.

Tabela 19. Parâmetros de largura dos cordões resultantes da soldagem TIG

Ensaio	Largura Esquerda [mm]	Largura Direita [mm]	Largura Total [mm]
Configuração com corrente constante e sem oscilação do arco - Tabela 12			
1	-	-	8,20
2	-	-	4,88
Configuração com corrente constante e com oscilação magnética - Tabela 14			
3	2,36	3,59	5,95
4	2,64	2,68	5,32
5	2,92	3,39	6,32
6	3,66	3,78	7,36
7	4,96	5,10	10,02
8	4,48	4,29	8,77
9	4,44	4,97	9,47
10	4,71	5,00	9,53
Configuração com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem - Tabela 16			
11	5,33	5,25	10,21
12	4,84	4,84	9,68
13	4,56	4,85	9,55
14	5,43	5,46	10,71
15	4,67	3,37	8,03
16	3,43	3,47	6,83
17	3,63	3,08	6,72
18	4,03	3,12	7,15
Configuração com modo de soldagem "pulsado" e sem oscilação magnética - Tabela 17			
19	-	-	6,32
20	-	-	6,40
21	-	-	9,30
22	-	-	10,35

Obs: Os testes preenchidos com um traço não tiveram oscilação magnética, portanto dispensando medições de largura esquerda e direita pela simetria esperada dos cordões.

5.7 Análise dos parâmetros de largura dos cordões da soldagem TIG

A Figura 89 mostra o comportamento da largura total dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A.

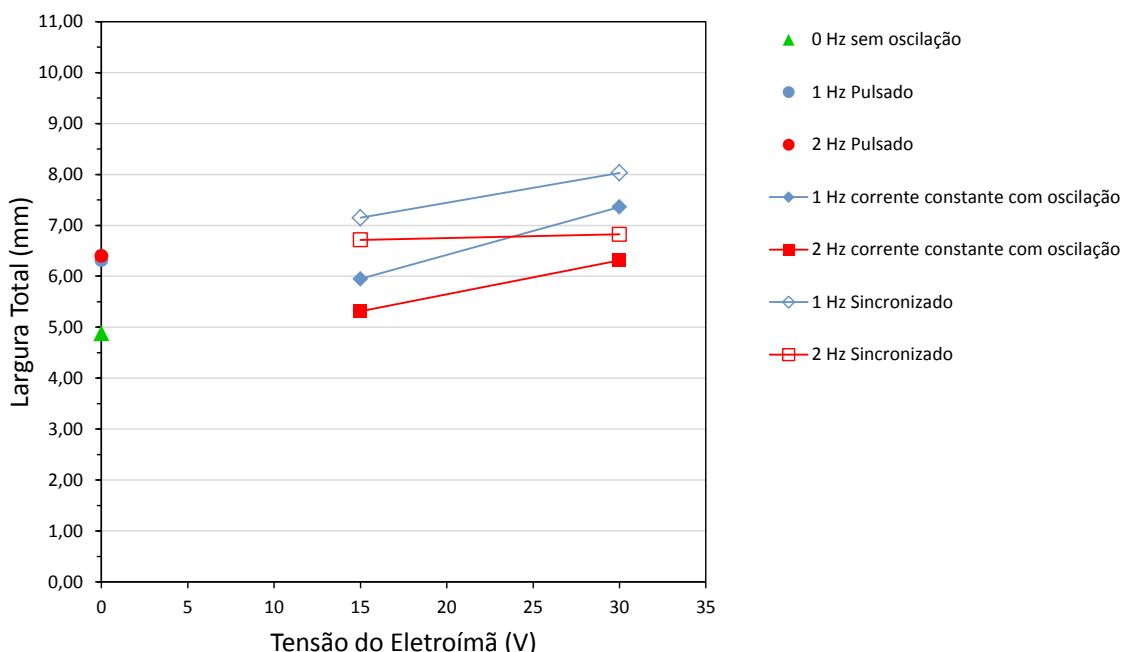


Figura 89. Largura total dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A

O menor valor de largura total foi para o caso de corrente constante sem oscilação (0 Hz sem oscilação). Nos casos pulsados ambas as frequências resultaram em cordões de largura total um pouco maior e bastante similar, já que o arco chegava a níveis mais altos de corrente, aumentando o tamanho da poça de fusão, pelo menos na superfície do cordão. Entre as duas frequências de pulsação não ocorreu mudança na largura total dos cordões, provavelmente porque “as poças” de fusão nos diferentes níveis de corrente ficaram sobrepostas, com a poça de fusão do maior nível de corrente definindo a largura total do cordão, isto pelo menos, para esta velocidade de soldagem. Em níveis gerais, pode-se dizer que as configurações pulsadas resultaram em larguras totais de níveis intermediários.

Quanto maior foi a deflexão magnética utilizada, maior a largura total resultante, conforme esperado. A configuração sincronizada resultou em maiores larguras totais quando comparada à configuração de corrente constante com oscilação. Este resultado pode ser explicado, pois, para uma mesma corrente média, as correntes laterais no caso

sincronizado, sobretudo a do lado esquerdo, foram superiores à corrente central e assim a tendência provável foi de espalhar mais o cordão.

As frequências de oscilação de 1 Hz proporcionaram maiores larguras totais que as de 2 Hz. Com a frequência menor (1 Hz) o arco passa mais tempo proporcionalmente nas posições programadas, o que confere maior tempo para os níveis de corrente atuarem nestas posições. A maior largura total alcançada ocorreu para o caso de configuração sincronizada com 1 Hz de oscilação e com maior nível de deflexão (tensão do eletroímã em 30 V).

A seguir são mostrados os gráficos de larguras parciais (esquerda e direita) para analisar melhor o efeito da sincronização dos níveis de corrente com a posição do arco durante a oscilação magnética para correntes médias de 150 A. Não são mostrados valores de largura parcial para os casos de corrente constante sem oscilação (0 Hz sem oscilação) e para os casos pulsados, pois estas condições são simétricas transversalmente à direção de soldagem.

A Figura 90 mostra o comportamento da largura esquerda dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A.

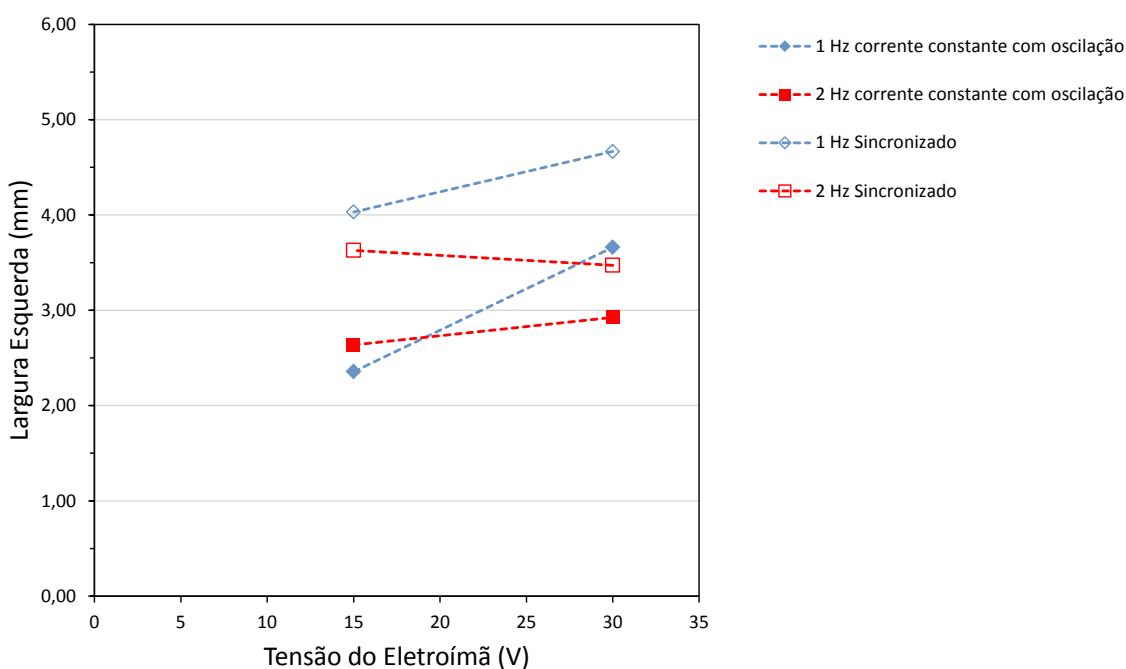


Figura 90. Largura esquerda dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A

A largura esquerda tende a aumentar com o aumento da deflexão, principalmente para a frequência de oscilação de 1 Hz. Fica claro que as configurações

sincronizadas aumentaram significativamente a largura esquerda, com mais efeito para a frequência de 1 Hz. Para o caso de 2 Hz, com menores tempos de atuação da corrente nas posições do arco, a largura resultante praticamente permaneceu sem grandes alterações com o aumento na tensão do eletroímã, tendendo inclusive, no caso sincronizado, a uma pequena diminuição. Pode ser que com 2 Hz, os tempos de atuação da corrente para promover a fusão foram tão reduzidos que o efeito do aumento da deflexão (provável aumento da largura) foi atenuado.

Assim como na largura total dos cordões, a maior largura esquerda ocorreu para o caso de configuração sincronizada com 1 Hz de oscilação e com maior nível de deflexão (tensão do eletroímã em 30 V).

A Figura 91 mostra o comportamento da largura direita dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A.

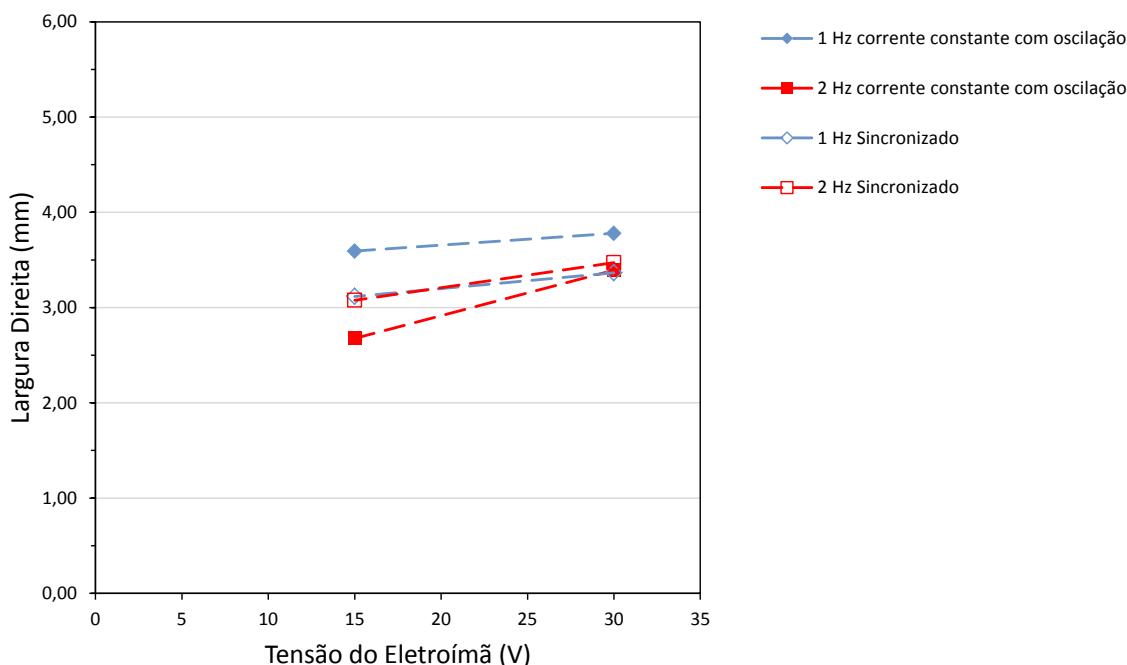


Figura 91. Largura direita dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 150 A

A largura direita tende a aumentar ligeiramente com o aumento da tensão do eletroímã. Como as correntes de soldagem na direita foram praticamente as mesmas (somente cerca de 8 A a mais para os casos sincronizados - Tabela 15), os valores de largura do lado direito do cordão pouco mudaram comparando os casos sincronizados aos casos somente com oscilação.

Comparando o efeito nas larguras total, esquerda e direita com a corrente média de soldagem de 150 A, fica evidente, principalmente para a frequência de oscilação de 1 Hz, que a largura total dos cordões é definida, sobretudo pela largura esquerda. Isso indica que o sistema de oscilação magnética sincronizada foi capaz de controlar a formação do cordão (pelo menos em termos de largura na superfície da chapa) como desejado. Ou seja, a maior corrente e tempo de parada no lado esquerdo do cordão levaram ao aumento da largura esquerda, conduzindo ao aumento da largura total. Com relação ao efeito da corrente central, em termos de largura, ela tem como função principal “ligar” as duas deflexões e fusões laterais. Este bom controle da poça de fusão poderia ser explorado, por exemplo, na soldagem de materiais dissimilares, em juntas com materiais de diferentes espessuras, em passes de raiz, em “narrow gaps”, etc., sempre procurando direcionar mais ou menos calor/fusão de acordo com a posição do arco.

A seguir são mostrados os gráficos referentes ao processo TIG com uma corrente média de soldagem mais elevada (200 A). A Figura 92 mostra o comportamento da largura total dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A.

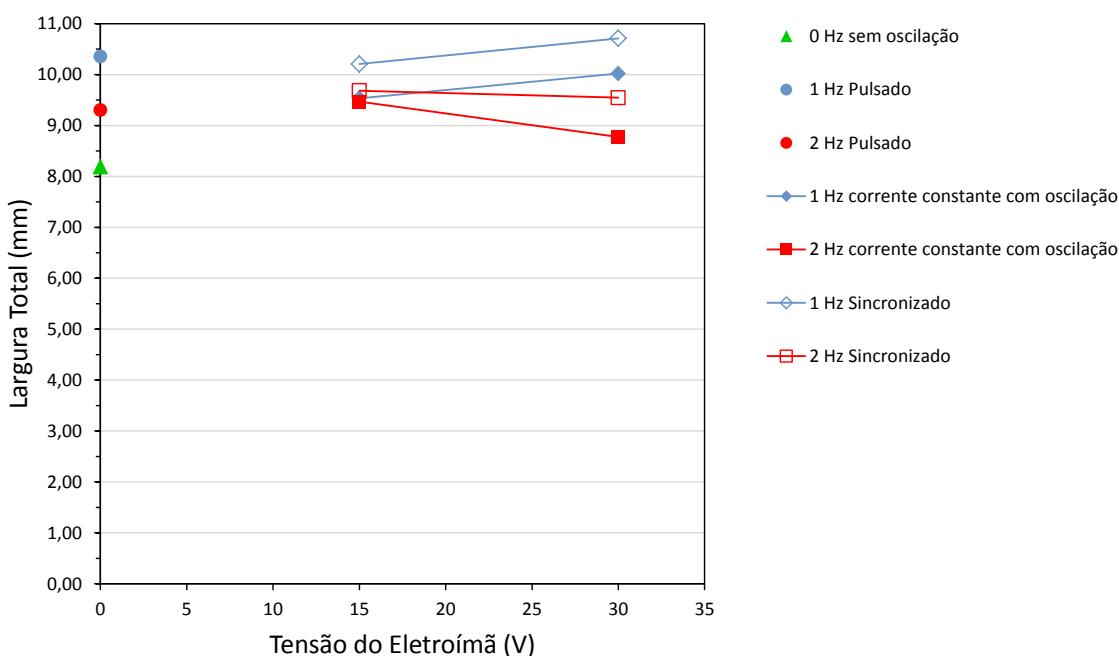


Figura 92. Largura total dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A

Assim como nos casos onde se utilizou corrente média de soldagem de 150 A, o menor valor de largura total foi para o caso de corrente constante sem oscilação (0 Hz

sem oscilação). Nos casos pulsados, a largura total obtida apresentou níveis mais elevados, sendo um pouco maior na frequência de 1 Hz provavelmente porque nesta frequência o tempo de permanência nos níveis de corrente elevada é superior.

No caso das configurações sincronizadas e naquelas de corrente constante com oscilação, observa-se que para a frequência de 1 Hz, quanto maior a deflexão magnética utilizada, maior a largura total resultante, ocorrendo o oposto para as frequências de 2 Hz (mais acentuada para a configuração com corrente constante com oscilação), ou seja, nestes casos, a largura total diminuiu com o aumento da tensão do eletroímã. Isso foi curioso, mas pode ser que não se teve o efeito esperado e mais pronunciado do aumento da largura total com o aumento da deflexão (tensão do eletroímã) devido ao aumento dos níveis de corrente (para uma corrente média de 200 A) que diminuem a deflexão do arco. Neste caso, talvez fossem necessárias maiores tensões no eletroímã, o que não foi tentado por limitações (limite de tensão/corrente da bobina) do sistema de deflexão sincronizada.

A configuração sincronizada resultou no geral em maiores larguras quando comparada à configuração de corrente constante com oscilação, assim como no caso da corrente média de 150 A. Este resultado pode ser explicado, pois, para uma mesma corrente média (neste caso 200 A), as correntes no caso sincronizado, sobretudo a do lado esquerdo, foram superiores à corrente central (vide Tabela 15) e assim a tendência provável foi de espalhar mais o cordão.

Portanto, de maneira geral, as frequências de oscilação de 1 Hz proporcionaram maiores larguras que as de 2 Hz, este fato foi mais pronunciado para o maior nível de tensão do eletroímã (30 V). Com a frequência menor (1 Hz) o arco passa mais tempo proporcionalmente nas posições programadas, o que confere maior tempo para os níveis de corrente atuarem nestas posições. A maior largura alcançada ocorreu para o caso de configuração sincronizada com 1 Hz de oscilação e com maior nível de deflexão (tensão do eletroímã em 30 V).

A seguir são mostrados os gráficos de larguras parciais (esquerda e direita) para correntes médias de 200 A, para também analisar melhor o efeito da sincronização dos níveis de corrente com a posição do arco durante a oscilação magnética. Assim como antes, não são mostrados valores de largura parcial para os casos de corrente constante sem oscilação (0 Hz sem oscilação) e para os casos pulsados, pois estas condições são simétricas transversalmente à direção de soldagem.

A Figura 93 mostra o comportamento da largura esquerda dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A.

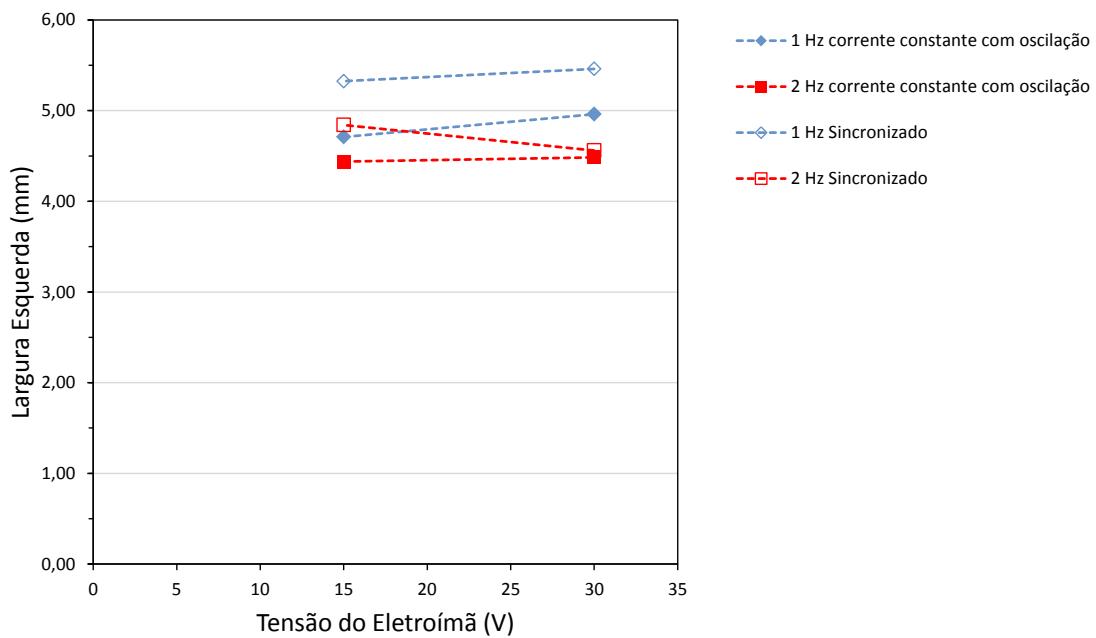


Figura 93. Largura esquerda dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A

Aqui também a largura esquerda tendeu a aumentar com o aumento da deflexão, principalmente para a frequência de oscilação de 1 Hz. Entretanto, para 2 Hz a largura esquerda praticamente não variou com o aumento na tensão do eletroímã, tendendo inclusive, no caso sincronizado, a uma pequena diminuição, provavelmente porque nesta frequência os tempos de atuação da corrente nas posições do arco são menores.

Neste caso também, a maior largura esquerda obtida foi para o caso da configuração sincronizada com 1 Hz de oscilação e com maior nível de deflexão (tensão do eletroímã em 30 V).

A Figura 94 mostra o comportamento da largura direita dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A.

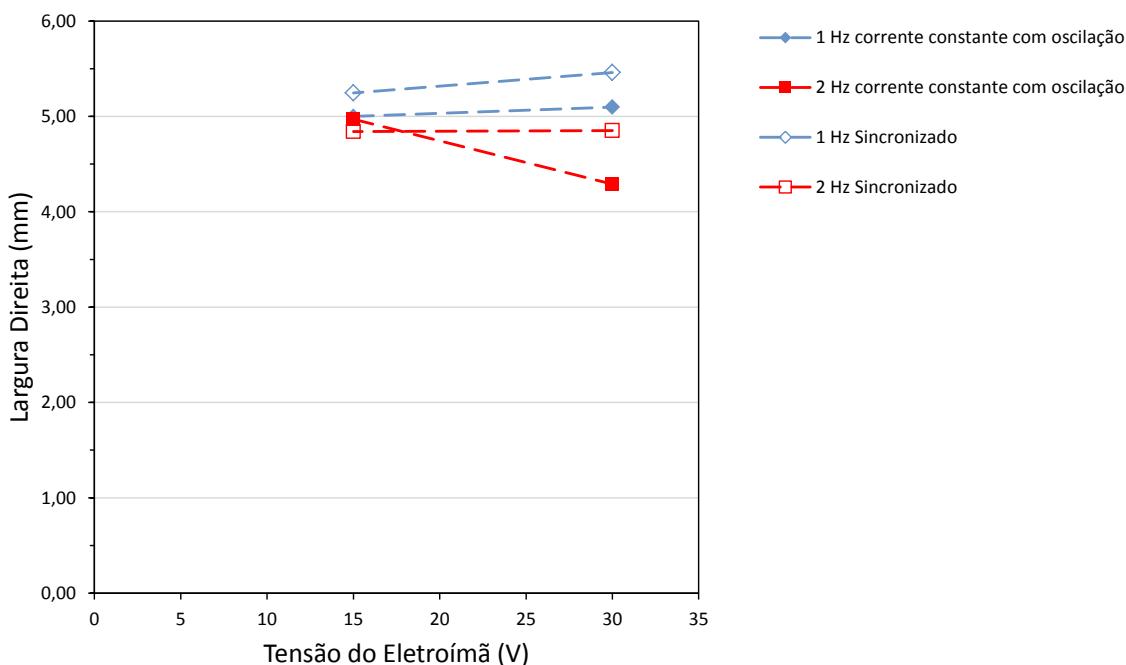


Figura 94. Largura direita dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações do processo TIG com corrente média de soldagem de 200 A

Como as correntes de soldagem na direita foram praticamente as mesmas (somente cerca de 10 A a mais para os casos sincronizados - Tabela 15), os valores de largura do lado direito do cordão pouco mudaram comparando os casos sincronizados aos casos somente com oscilação. A largura direita da configuração de corrente constante com oscilação de 2 Hz, foi a única que apresentou resultado inesperado, tendendo a diminuir com o aumento da tensão do eletroímã, sendo que este fato colaborou para a diminuição da largura total do cordão nesta configuração.

A análise dos parâmetros de largura para a corrente média de soldagem de 200 A indica, pelo menos para estes testes realizados com o processo TIG, que os resultados mais satisfatórios (maior controle da poça de fusão e da formação do cordão de solda) foram obtidos com a oscilação magnética sincronizada aos níveis de corrente na frequência de 1 Hz. Reitera-se que este bom controle da poça de fusão poderia ser explorado, por exemplo, na soldagem de materiais dissimilares, em juntas com materiais de diferentes espessuras, em passes de raiz, em “narrow gaps”, etc., sempre procurando direcionar mais ou menos calor/fusão de acordo com a posição do arco.

Comparando-se os níveis de corrente média de soldagem utilizados (150 e 200 A), os valores de largura total, esquerda e direita foram superiores para o caso da corrente de 200 A, conforme esperado, pois aumentando-se o nível de corrente tem-se um aumento na capacidade de fusão do arco. No entanto, para a média de 200 A, ao

aumentar a tensão do eletroímã, não foi observado nenhum comportamento pronunciado, como observado nas configurações com média de 150 A.

Com relação à comparação das configurações sincronizadas com as somente com oscilação, os casos sincronizados apresentaram quase sempre maiores valores de largura, para ambos os níveis de corrente média. As larguras também foram no geral maiores para os casos com frequência de oscilação de 1 Hz em relação àqueles com 2 Hz, independentemente do nível de corrente utilizado.

5.8 Efeito “visual” da sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem

De forma a demonstrar de maneira simples o efeito da sincronização entre deflexão magnética e corrente de soldagem sobre a formação superficial do cordão de solda, foram realizados alguns testes (Tabela 20), tendo como objeto de avaliação o aspecto visual e superficial dos cordões resultantes.

Tabela 20. Ensaios para demonstrar efeito “visual” da sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem (frequência de oscilação = 1 Hz; tensão do eletroímã = 30 V)

Ensaios	Velocidade de Soldagem [mm/min]	Tempo de Parada Esquerda [ms]	Tempo de Parada Central [ms]	Tempo de Parada Direita [ms]	Corrente de Soldagem Esquerda [A]	Corrente de Soldagem Central [A]	Corrente de Soldagem Direita [A]	Corrente de Soldagem Média [A]
23*	180	250	250	250	150	150	150	154,38
24	180	150	350	150	250	107	250	154,07
25	200	150	350	150	250	107	250	152,25

* Ensaio em corrente constante com oscilação magnética.

Ao comparar os resultados dos ensaios 23 (corrente constante com oscilação magnética) e 24 (oscilação magnética sincronizada), mostrados na Figura 95, pode-se notar que, para uma mesma frequência de oscilação, mesma tensão aplicada ao eletroímã, e mesmos níveis de corrente média de soldagem e de velocidade de soldagem, a condição com corrente constante com oscilação magnética (oscilação convencional) não resultou em um cordão com fusão contínua nas laterais. Já utilizando a oscilação magnética sincronizada, houve continuidade na fusão em ambas as laterais do cordão. Dessa forma, fica demonstrado pelo aspecto visual da superfície dos cordões que a oscilação magnética amplia a capacidade de se ajustar o formato dos cordões de solda. Na oscilação convencional, para se ter maior fusão nas laterais poderia se aumentar o tempo de permanência do arco em cada lateral e diminuir no centro, mas isso certamente resultaria em aumento das “ondas de fusão” laterais, deixando o cordão cada vez mais em “zig-zag”, já que o arco passaria muito tempo em uma lateral antes

de voltar ao centro e ir para a outra lateral. A formação das “ondas de fusão” nas laterais poderia também ser contornada pela diminuição da velocidade de soldagem, mas com sacrifício da produtividade. Na concepção de oscilação sincronizada, os tempos de parada podem ser modificados e a capacidade de fusão em cada posição do arco (representada aqui simplificadamente pelo produto entre corrente elétrica utilizada e tempo de sua atuação) pode ser preservada pela mudança da corrente de soldagem em cada posição (na Tabela 20 notar que o produto entre a corrente e o tempo em cada posição do arco resulta sempre em 37,5 ampère.segundo). Assim pode-se evitar a formação de “ondas de fusão” nas laterais dos cordões sem recorrer a reduções na velocidade de soldagem (perda de produtividade).

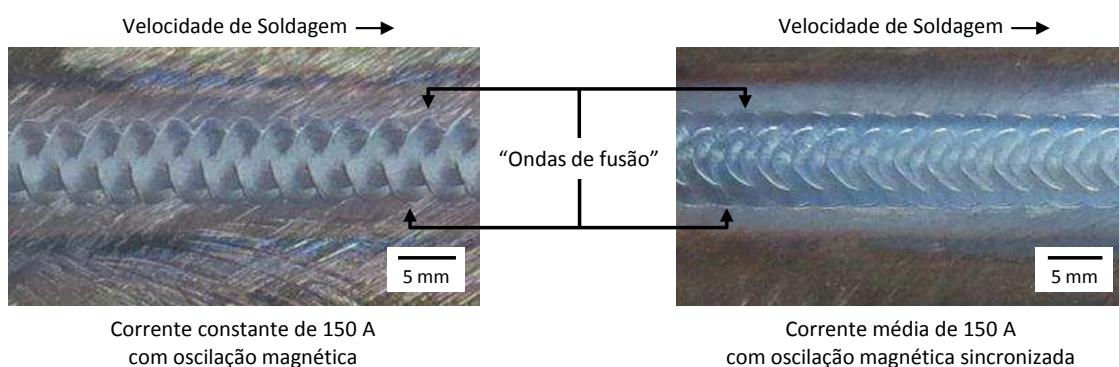


Figura 95. Aspecto superficial dos cordões resultantes dos ensaios 23 (a) e 24 (b) da Tabela 20

Por fim, o ensaio 25 foi feito para demonstrar com maior clareza as marcas de atuação das diferentes capacidades de fusão do arco em cada posição com a utilização da oscilação magnética sincronizada. Os níveis de corrente e os tempos em cada posição de parada do arco foram os mesmos do ensaio 24 (a capacidade fusão do arco - produto entre corrente elétrica utilizada e tempo de sua atuação - foi igual nas laterais, mas diferente no centro do cordão). Entretanto, no ensaio 25 houve um pequeno aumento na velocidade de soldagem para causar um maior espaçamento entre as marcas de atuação do arco. Como mostrado na Figura 96, as denominadas marcas de atuação do arco foram representadas pelos contornos de fusão deixados pelo arco em cada posição de parada. As marcas denotam algo como marcas de pulsação de corrente típicas do processo TIG Pulsado, só que deslocadas tanto longitudinalmente (como seria no TIG Pulsado) quanto transversalmente em relação à linha central do cordão. Nota-se a formação de maiores marcas com a maior corrente (laterais do cordão) e das menores marcas com a menor corrente. Essas marcas tendem a ficar

mais evidentes (espaçadas) para menores frequências e maiores amplitudes de oscilação e para maiores velocidades de soldagem.

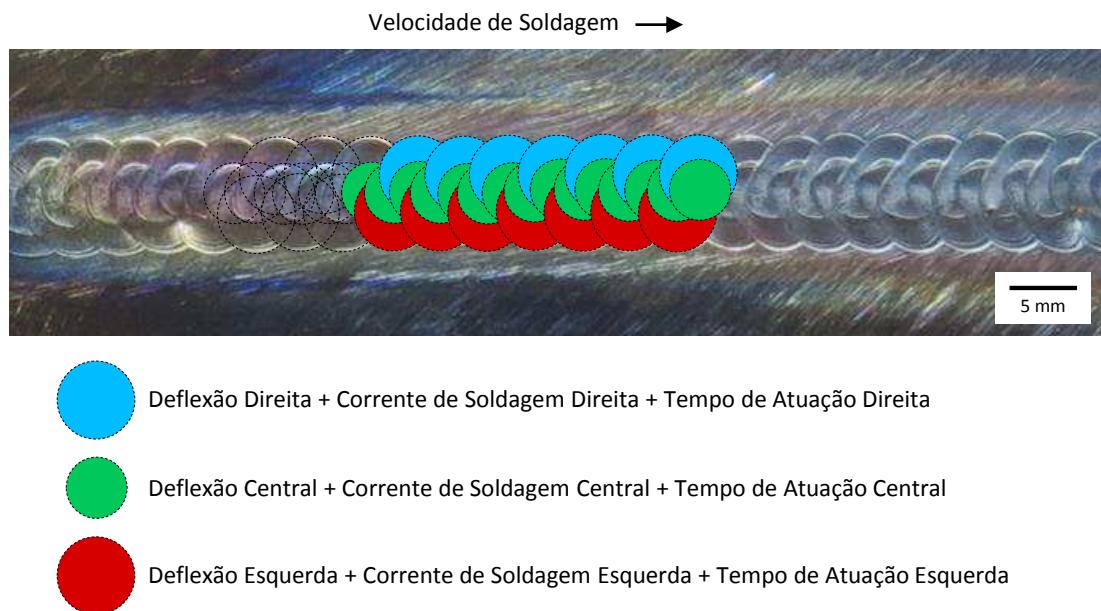


Figura 96. Aspecto superficial do cordão e marcas de atuação das diferentes capacidades de fusão do arco (iguais nas laterais, mas diferente no centro do cordão) em cada posição da oscilação sincronizada resultantes do ensaio 25 da Tabela 20

CAPÍTULO VI

OSCILAÇÃO MAGNÉTICA SINCRONIZADA COM O PROCESSO MIG/MAG

Neste capítulo são apresentados os parâmetros utilizados, a sequência experimental, bem como os resultados e as respectivas análises da avaliação da oscilação magnética sincronizada com o processo MIG/MAG. Neste caso, a oscilação (posição do arco) foi sincronizada com modos operacionais (de transferência metálica) de soldagem. Assim, tentou-se controlar a geometria do cordão combinando um modo de soldagem de maior energia nas laterais (modo Spray CC+ na esquerda e direita) com um modo de soldagem de menor energia (modo CC- ou Pulsado CC+) no centro do cordão. De forma a embasar a análise desta combinação, são apresentadas grandezas elétricas resultantes (tanto do eletroímã, quanto do processo de soldagem), os oscilogramas dos sinais elétricos obtidos (tanto do eletroímã, quanto do processo de soldagem), o aspecto superficial dos cordões obtidos (acompanhado da secção transversal típica), além de medidas relacionadas à geometria da zona fundida resultante. Para complementar a avaliação com o processo MIG/MAG, foi utilizada filmagem de alta velocidade para observar o comportamento do arco, da poça de fusão e das gotas em transferência.

6.1 Materiais e equipamentos utilizados na soldagem MIG/MAG

Além dos equipamentos apresentados anteriormente, foi utilizada uma tocha de soldagem MIG/MAG automática. Como material de base, foram utilizadas chapas de comum ao aço carbono, de 3 mm de espessura, 250 mm de comprimento e 60 mm de largura. As chapas foram limpas por lixadeira elétrica manual. As soldagens foram feitas por simples deposição sobre chapa. Como ilustrado na Figura 97, as soldagens foram feitas com os corpos de prova sobre um suporte de aço e afastados 1 mm acima do mesmo para deixar a configuração mais propensa a penetrações elevadas. Nesses ensaios foi utilizada a versão α do software de controle do eletroímã e a montagem do eletroímã foi em paralelo à direção de soldagem, resultando respectivamente em três

posições de parada do arco e em uma oscilação do mesmo transversal/lateral à direção de soldagem.

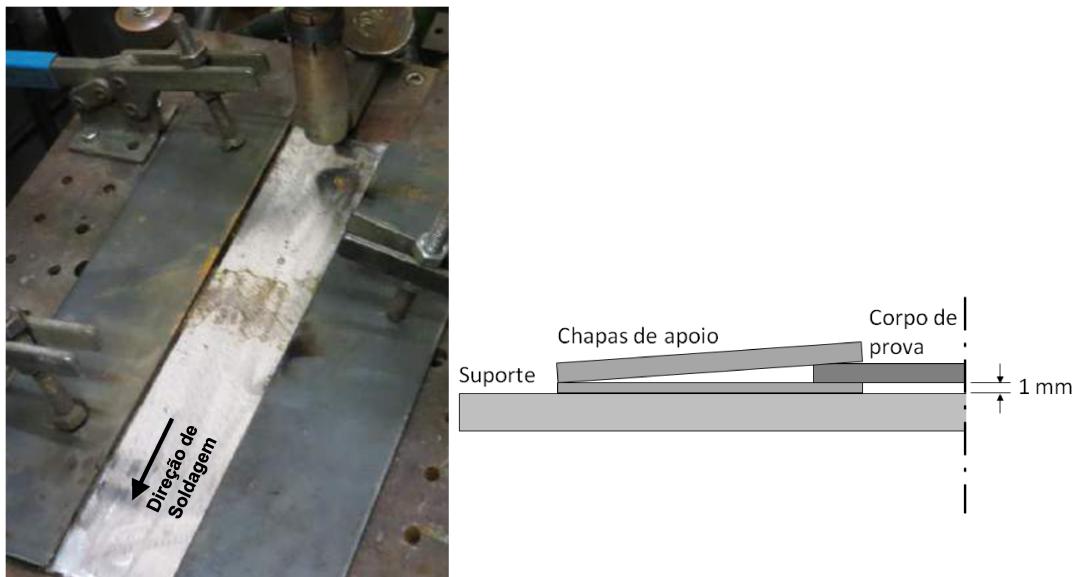


Figura 97. Montagem de corpos de prova para soldagem MIG/MAG (oscilação transversal/lateral - os corpos de prova foram montados afastados 1 mm acima do suporte para deixar a configuração mais propensa à penetrações elevadas)

6.2 Parâmetros gerais da soldagem MIG/MAG

A Tabela 21 apresenta os parâmetros gerais utilizados para o processo MIG/MAG.

Tabela 21. Parâmetros gerais do processo MIG/MAG para os ensaios em aço carbono

Distância Bico de Contato Peça - DBCP [mm]	22
Distância Eletroímã Arco/Eletrodo [mm]	15
Distância Eletroímã Peça [mm]	3
Velocidade de Soldagem [cm/min]	54
Gás	Ar+5%O ₂
Vazão de Gás [l/min]	14
Arame Eletrodo	AWS ER70S-6
Diâmetro do Eletrodo [mm]	1,2

Foram conduzidas duas combinações de ensaios; a primeira combinou os modos de soldagem Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro; a segunda combinou os modos de soldagem Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e Pulsado na polaridade

positiva (CC+) no centro. Assim, o modo de soldagem com maior energia foi direcionado às laterais do cordão e os modos com menor energia foi direcionado ao centro dos cordões, visando obter redução de penetração com aumento de largura, algo interessante, por exemplo, para aplicações de revestimentos soldados.

Foram realizados 15 ensaios com o processo MIG/MAG, que são apresentados na sequência, mesmo que em tabelas diferentes, por questões de rastreabilidade. Além das combinações sincronizadas propostas, foram feitos ensaios em condições de referência com modos de soldagem sem oscilação magnética e mesmo com oscilação magnética não sincronizada. Por se trabalhar com níveis de corrente de soldagem mais elevados na soldagem MIG/MAG do que anteriormente na soldagem TIG, os níveis de tensão do eletroímã utilizados com o MIG/MAG foram maiores na tentativa de garantir deflexões de arco mais significativas em termos de efeitos.

A Figura 98 mostra onde foram medidos os parâmetros relacionados à geometria da zona fundida resultante da soldagem MIG/MAG (foram feitas medições em duas secções transversais para cada corpo de prova). Com exceção do caso da largura, os outros parâmetros geométricos (reforço superior, área depositada superior, área fundida, reforço na raiz, área depositada na raiz, diluição e penetração máxima) foram determinados a partir das secções transversais (média de dois valores). Para a medição da largura foram utilizadas as imagens da vista superior dos cordões, em procedimento semelhante ao realizado para as medições de largura nos experimentos realizados na soldagem TIG.

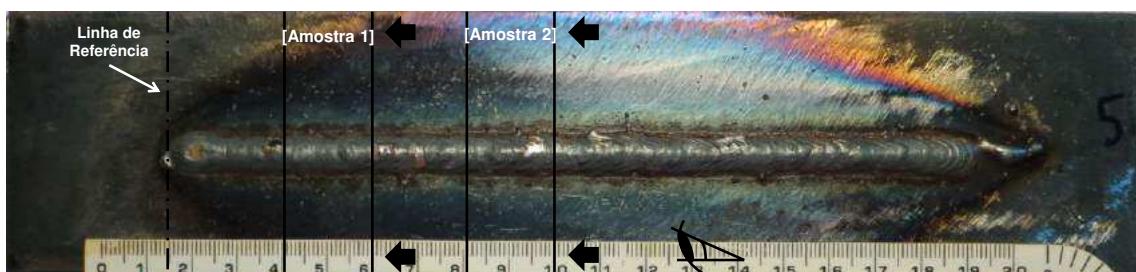


Figura 98. Posição das secções transversais para medições dos parâmetros relacionados à geometria da zona fundida resultante da soldagem MIG/MAG (a linha de referência foi traçada no final do cordão de solda)

6.3 Spray polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-)

6.3.1 Parâmetros

As configurações para os ensaios realizados para esta combinação são mostradas na forma de fluxograma na Figura 99.

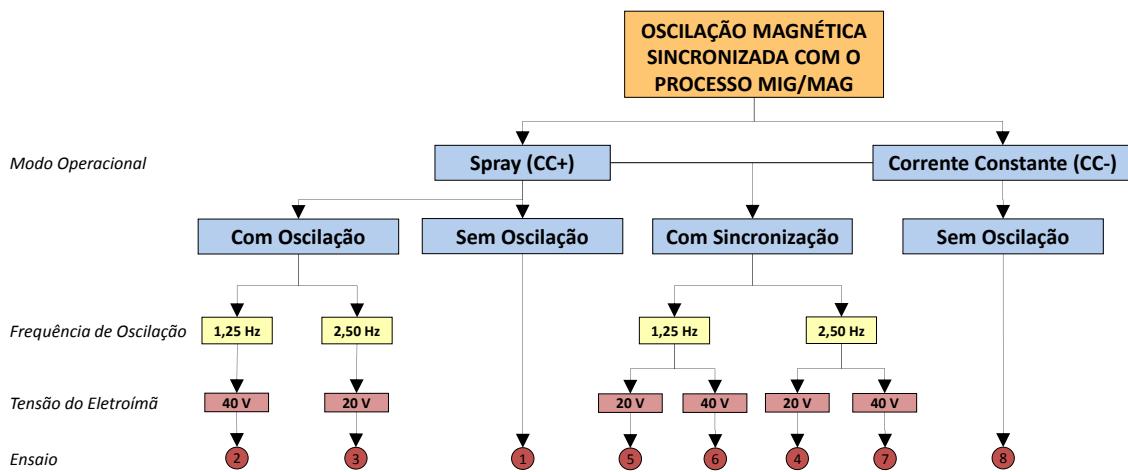


Figura 99. Fluxograma dos ensaios realizados com o processo MIG/MAG para combinação Spray (CC+) e Corrente Constante (CC-)

A Tabela 22 apresenta os parâmetros do ensaio com soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) sem oscilação. Estes parâmetros foram selecionados com base em pré-testes realizados, a velocidade de alimentação utilizada foi de 7 m/min.

Tabela 22. Soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) sem oscilação

Ensaio	Corrente de Soldagem [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
1	240	0	0

Com intuito de verificar o efeito da mudança da frequência de oscilação magnética, principalmente nos casos sincronizados, foram utilizadas duas frequências distintas (1,25 e 2,5 Hz). Neste caso, os tempos de parada do arco (permanência nas posições de atuação do arco) foram iguais, conforme mostra a Tabela 23.

Tabela 23. Tempos de parada nas diferentes posições do arco na chapa para cada frequência de oscilação magnética na soldagem MIG/MAG

Frequência de Oscilação [Hz]	Tempo de Parada Esquerda [ms]	Tempo de Parada Central [ms]	Tempo de Parada Direita [ms]
1,25	200	200	200
2,50	100	100	100

A Tabela 24 apresenta os parâmetros utilizados para soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central).

Tabela 24. Soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central)

Ensaio	Corrente de Soldagem [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
2	240	40	1,25
3	240	20	2,50

A Tabela 25 apresenta os parâmetros utilizados para soldagem MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro.

Tabela 25. Soldagem MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro

Ensaio	Corrente de Soldagem nas Laterais [A]	Corrente de Soldagem no Centro [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
4	240	-72	20	2,50
5	240	-72	20	1,25
6	240	-72	40	1,25
7	240	-72	40	2,50

A Tabela 26 mostra os parâmetros para a soldagem MIG/MAG com corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação. Estes parâmetros foram selecionados baseados em pré-testes, a velocidade de alimentação utilizada foi de 3,5 m/min.

Tabela 26. Soldagem MIG/MAG com corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação

Ensaio	Corrente de Soldagem [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
8	-72	0	0

6.3.2 Grandezas elétricas resultantes

A seguir são apresentadas as grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG em modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) medidas a partir das informações adquiridas pelo sistema de aquisição de dados. De maneira geral, as grandezas elétricas, inclusive aquelas resultantes dos ensaios de oscilação magnética sincronizada, ficaram de

acordo com o programado, evidenciando o bom funcionamento do sistema de controle do eletroímã e da fonte de soldagem no caso do processo MIG/MAG.

A Tabela 27 apresenta os valores das grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG com corrente constante em modo Spray na polaridade positiva (CC+) sem oscilação, referente ao ensaio da Tabela 22.

Tabela 27. Grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG com corrente constante em modo Spray na polaridade positiva (CC+) sem oscilação

Ensaio	Tensão do Eletroímã [V]	Spray (CC+)	
		Corrente Média [A]	Tensão Média [V]
1	0,08	240,16	26,72

A Tabela 28 apresenta os valores das grandezas elétricas da soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central), referente à Tabela 24. E a Tabela 29 mostra os valores das grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referentes aos ensaios da Tabela 25.

Tabela 28. Grandezas elétricas da soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central)

Ensaio	Tensão do Eletroímã				Modo Spray (CC+)		
	Tensão Esquerda [V]	Tensão Central [V]	Tensão Direita [V]	Frequência [Hz]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Tempo de Parada [ms]
2	37,34	0,60	-37,02	1,25	240,10	26,73	0,20
3	18,11	0,74	-17,92	2,55	240,26	26,27	0,10

Tabela 29. Grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro

Ensaio	Tensão do Eletroímã				Modo CC-			Modo Spray (CC+)		
	Tensão Esquerda [V]	Tensão Central [V]	Tensão Direita [V]	Frequência [Hz]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Tempo de Parada [ms]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Tempo de Parada [ms]
4	18,08	-0,68	-17,89	2,50	-75,54	-18,49	0,09	240,62	25,78	0,10
5	18,02	0,48	-17,82	1,25	-75,53	-17,45	0,19	240,74	25,69	0,20
6	37,29	-0,40	-36,99	1,25	-75,61	-18,26	0,19	240,64	26,02	0,19
7	37,48	1,16	-37,22	2,51	-75,53	-17,77	0,10	240,31	27,46	0,10

A Tabela 30 apresenta os valores das grandezas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG com corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação, referentes ao ensaio da Tabela 26.

Tabela 30. Grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG com corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação

Ensaio	Tensão do Eletroímã [V]	Modo CC-	
		Corrente Média [A]	Tensão Média [V]
8	0,10	-75,13	-20,57

6.3.3 Oscilogramas e imagens em alta velocidade da soldagem

Abaixo são mostrados os oscilogramas e as imagens (do arco, da poça e mesmo das gotas metálicas) das soldagens realizadas utilizando o modo Spray na polaridade positiva (CC+) e o modo corrente constante na polaridade negativa (CC-). Sem exceção, os níveis de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão do eletroímã ficaram de acordo com o programado.

A Figura 100 apresenta o oscilograma e a imagem do ensaio 1, referente à configuração Spray polaridade positiva (CC+) sem oscilação e correspondente à Tabela 22. Nota-se um arco com bastante intensidade luminosa, característico da soldagem MIG/MAG em modo Spray ou com elevada corrente. Os sinais de corrente de soldagem e tensão do arco ficaram bastante estáveis, como esperado.

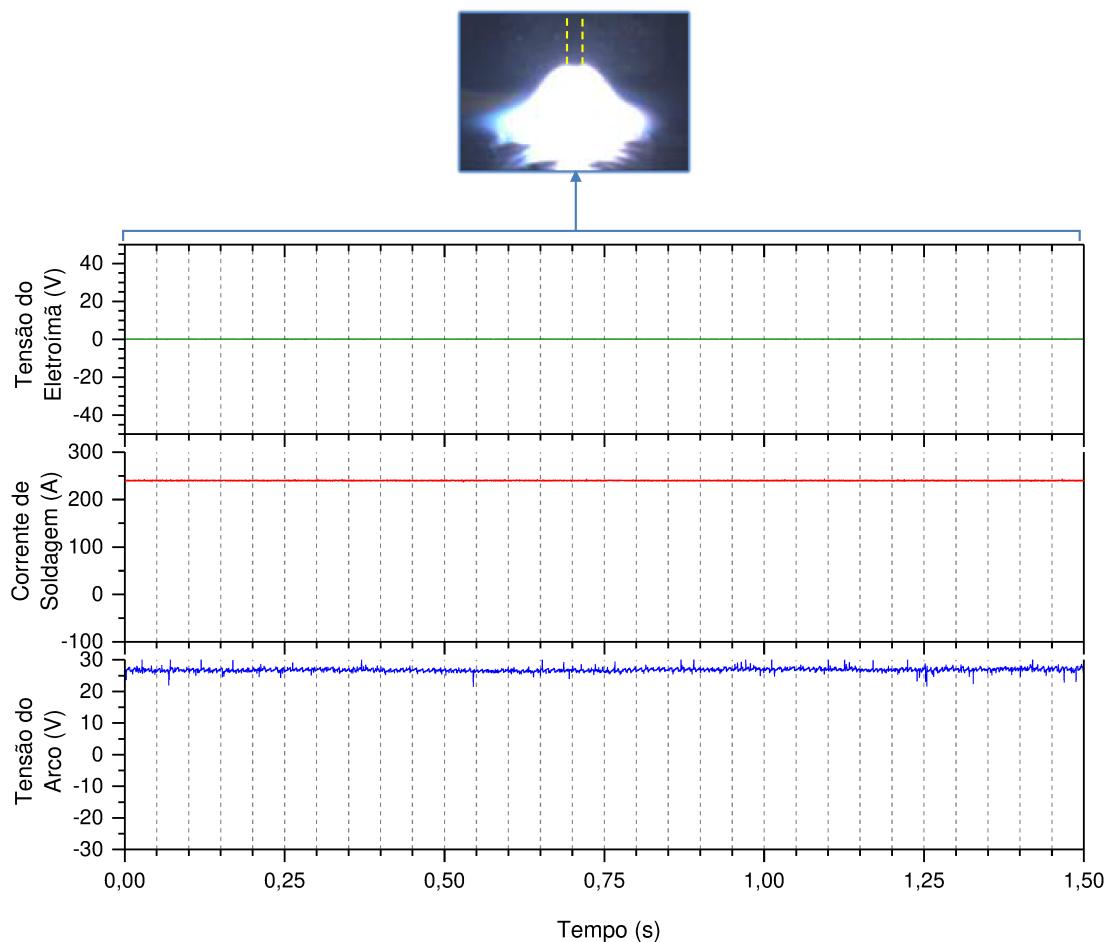


Figura 100. Oscilograma e imagem da configuração Spray polaridade positiva (CC+) sem oscilação, referente ao ensaio 1 da Tabela 22

A Figura 101 e Figura 102 apresentam os oscilogramas e as imagens da soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central), referente à Tabela 24. Nota-se o arco defletido nas laterais e estável ao centro (sem deflexão). Também é possível notar que uma maior tensão do eletroímã levou a uma maior deflexão do arco (a tensão do eletroímã e deflexão são maiores na Figura 101 em relação à Figura 102). Além disso, foi possível ver algo como uma “calda” do plasma (região lateral sem o brilho intenso do arco elétrico) na direção da deflexão, nitidamente mais pronunciada com maiores níveis de deflexão. Os sinais de corrente de soldagem e tensão do arco ficaram bastante estáveis, apenas com o sinal de tensão ondulando levemente em função de deflexão (mudança de comprimento de arco).

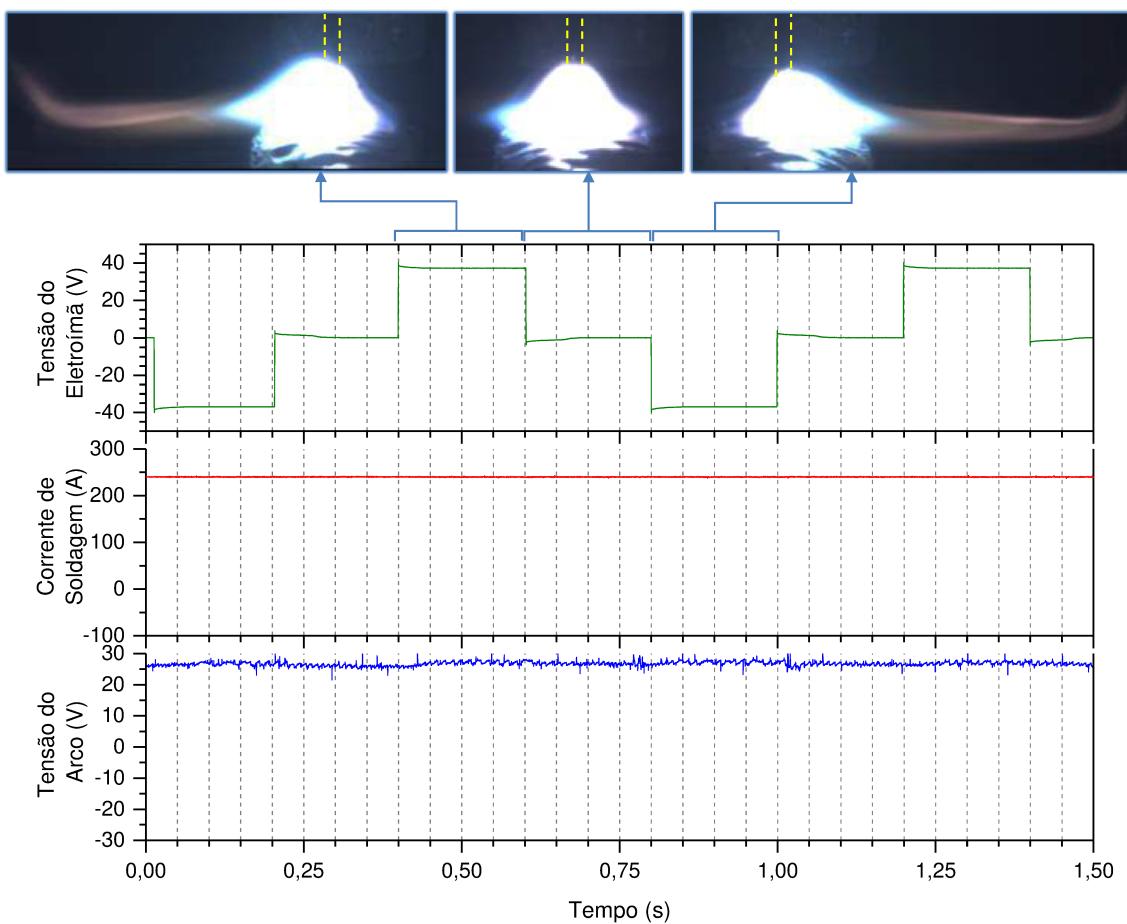


Figura 101. Oscilograma e imagem da configuração Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central), referente ao ensaio 2 da Tabela 24 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz)

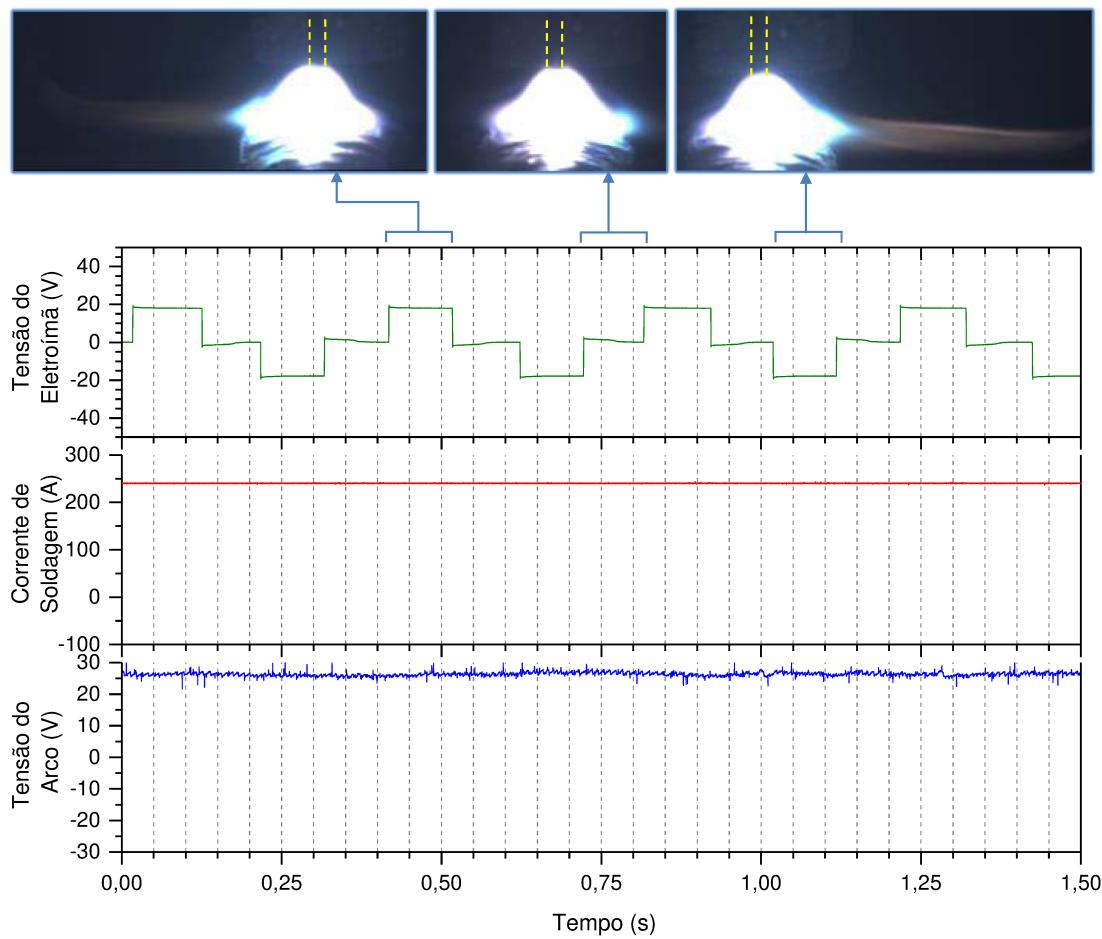


Figura 102. Oscilogramma e imagem da configuração Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central), referente ao ensaio 3 da Tabela 24 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)

A Figura 103, a Figura 104, a Figura 105 e a Figura 106 mostram os oscilogramas e as imagens das soldagens dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, correspondente aos ensaios da Tabela 25. Pelos oscilogramas é possível verificar que os sinais do eletroímã (deflexão magnética) e da corrente de soldagem (consequentemente da tensão do arco) estão sincronizados, apesar de um pequeno atraso em alguns casos para mudança da corrente em relação ao sinal de tensão do eletroímã (sinal de controle). Nota-se a atuação de maior energia (maior corrente – maior brilho do arco – modo Spray) nas laterais e de menor energia (menor corrente – menor brilho do arco – modo CC-) no centro. Com relação às gotas metálicas, não foi possível verificar se estas eram defletidas na mesa direção do arco, já que o brilho intenso do mesmo não permitiu observá-las com clareza. A poça parece ter se mantido estável em todos os ensaios, exibindo apenas mais movimentação no momento de mudança do modo de soldagem, provavelmente por mudança na pressão

exercida pelo arco (maior no modo Spray e nas laterais). Também é possível notar que as maiores tensões do eletroímã levaram a maiores deflexões do arco (a tensão do eletroímã e deflexão são maiores na Figura 105 e Figura 106 em relação à Figura 104 e à Figura 103, respectivamente).

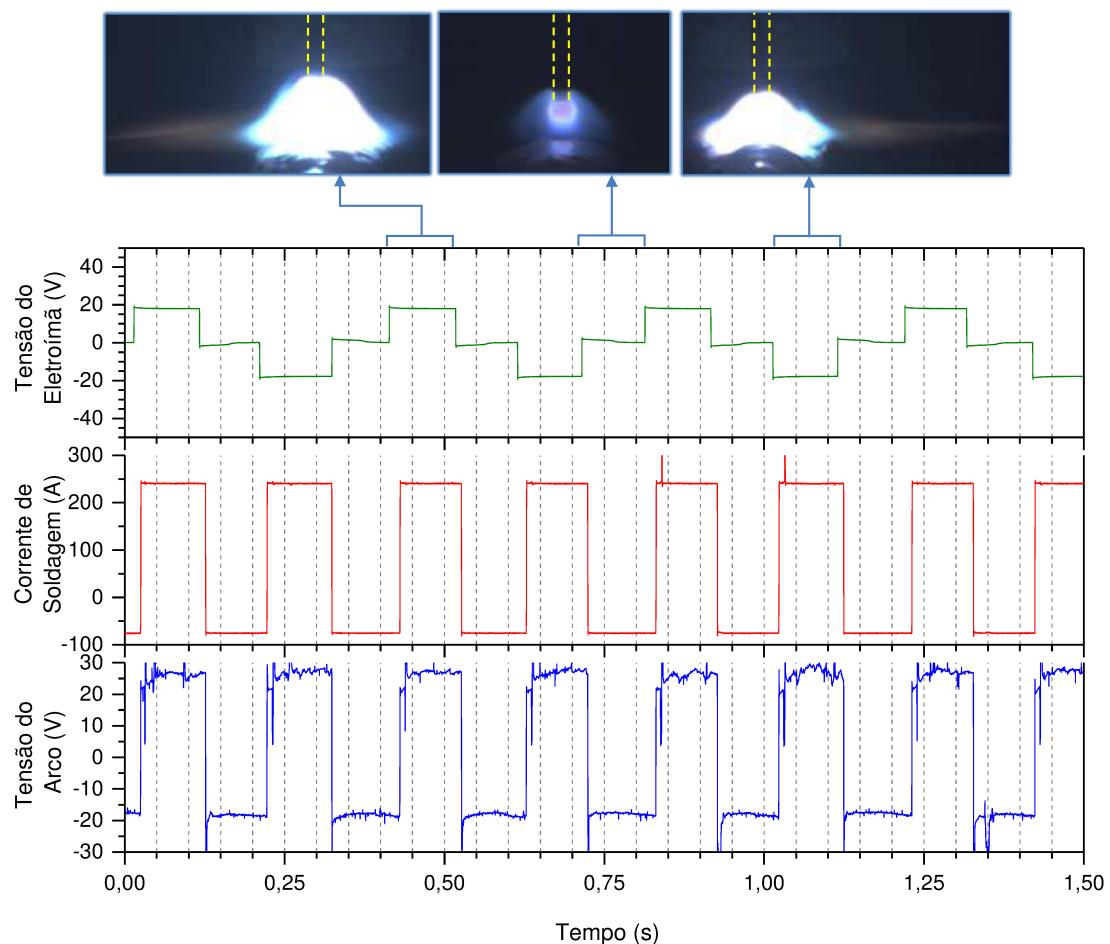


Figura 103. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 4 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)

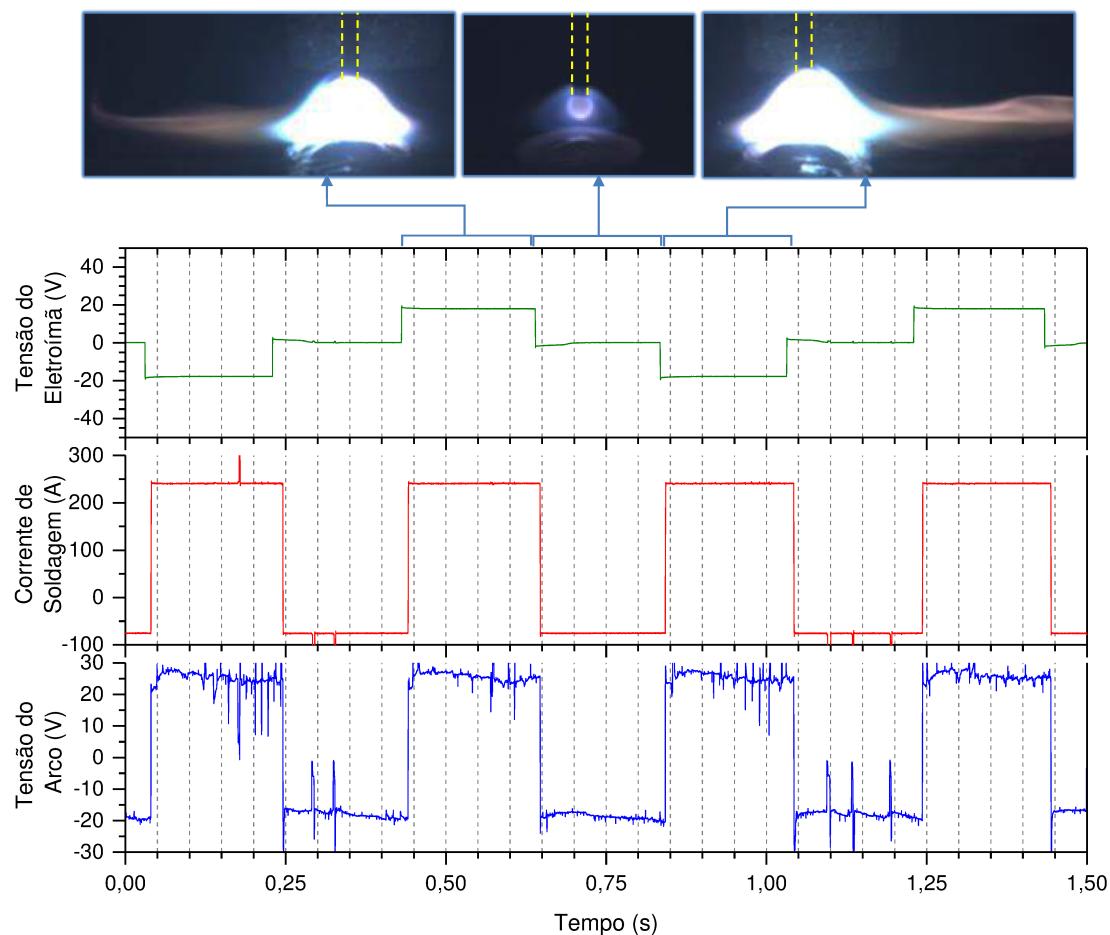


Figura 104. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 5 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz)

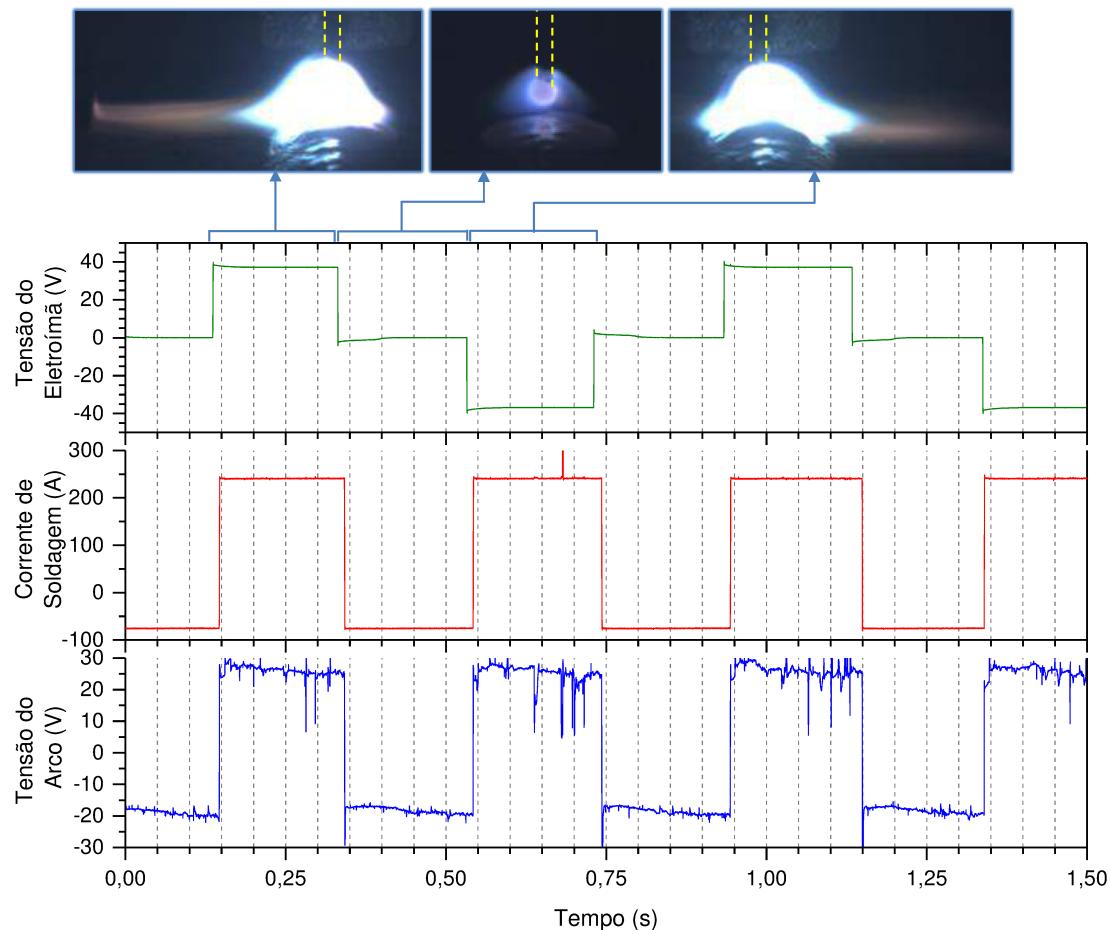


Figura 105. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 6 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz)

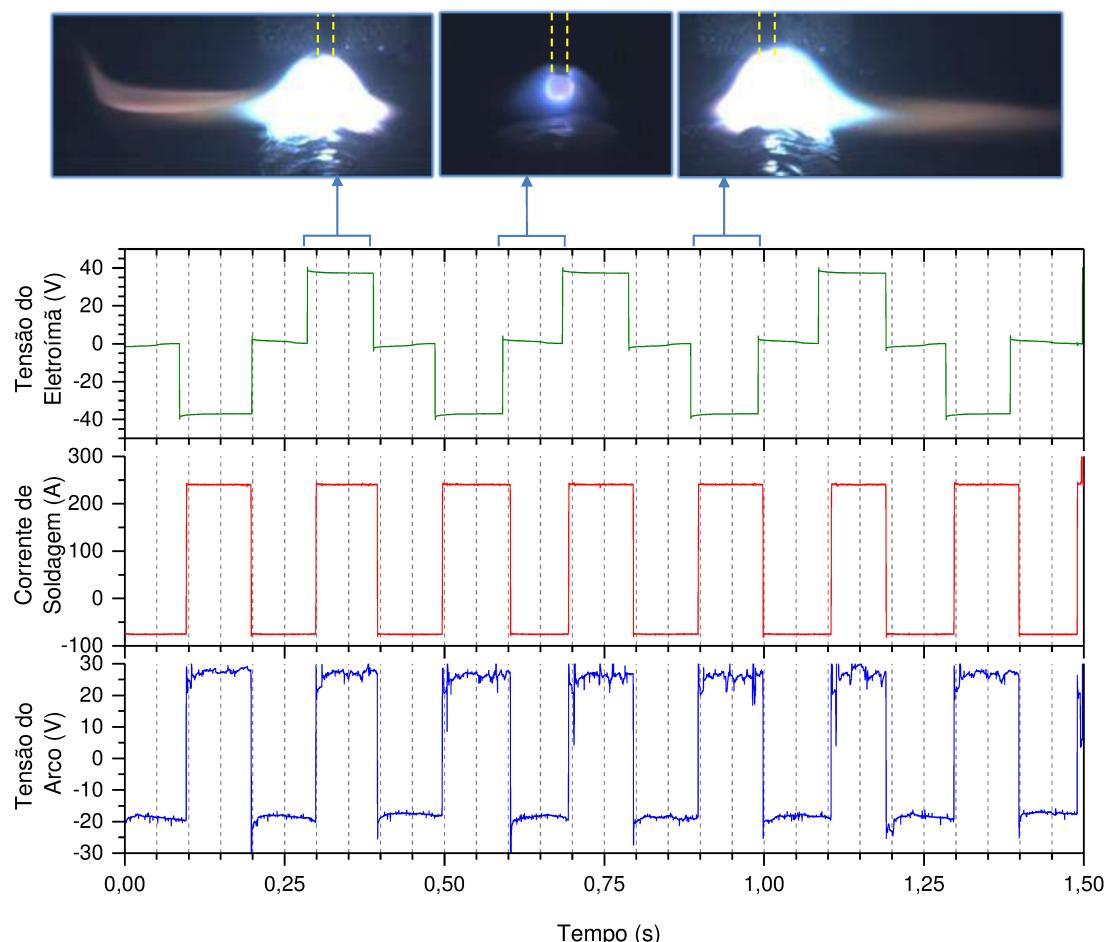


Figura 106. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) no centro, referente ao ensaio 7 da Tabela 25 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)

A Figura 107 mostra o gráfico resultante da soldagem MIG/MAG com modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação, correspondente à Tabela 26. Nota-se um arco com menor intensidade luminosa em relação à imagem do arco no modo Spray (Figura 100), o que é característico da soldagem MIG/MAG em modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) ou com baixa corrente. Os sinais de corrente de soldagem e tensão do arco ficaram conforme esperado.

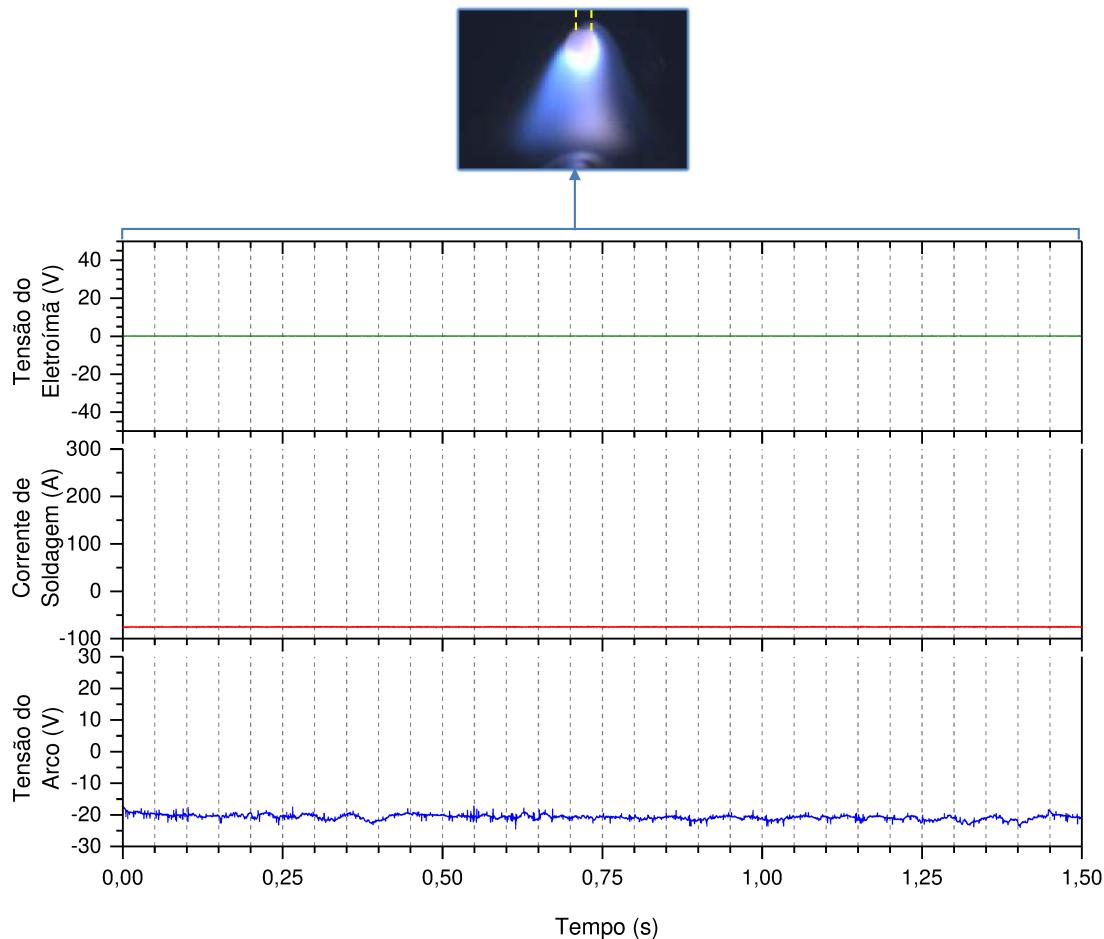
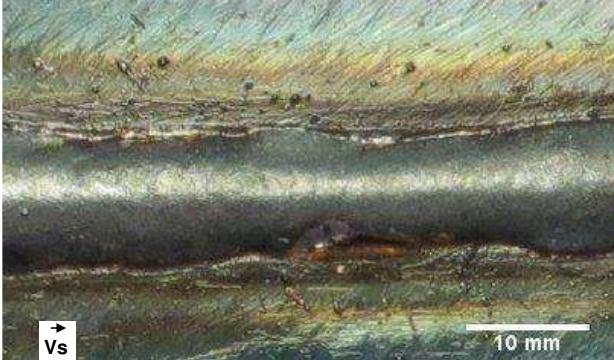
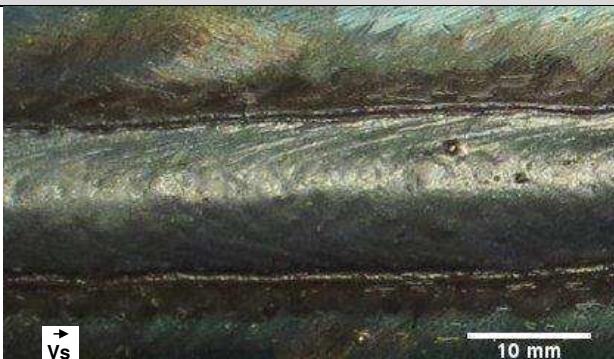
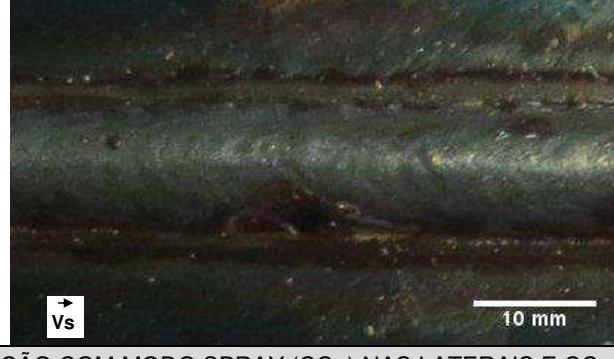
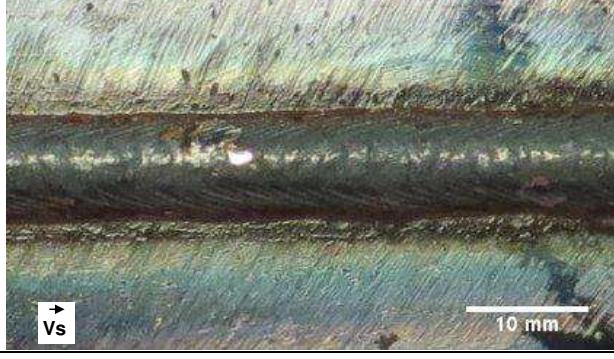


Figura 107. Oscilograma e imagem da configuração com processo MIG/MAG com modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) sem oscilação, referente ao ensaio 8 da Tabela 26

6.3.4 Imagens dos cordões

A Figura 108 apresenta as imagens da vista superior e das macrografias típicas dos cordões dos ensaios utilizando a soldagem MIG/MAG em modo Spray eletrodo positivo (CC+) e modo corrente constante eletrodo negativo (CC-). Vale destacar as imagens dos ensaios 6 e 7 (feitos com oscilação magnética sincronizada e tensão do eletroímã em 40 V), nos quais é possível notar o deslocamento da penetração máxima para as laterais dos cordões. No “cordão” do ensaio 8 (condição referencial para a configuração de corrente constante eletrodo negativo (CC-)), nota-se um aspecto ruim devido à formação de gotas “bem frias” (sem molhamento) que são depositadas sobre a chapa, indicando que este modo tem menor energia térmica.

Ensaio	Imagen	
MODO SPRAY (CC+) SEM OSCILAÇÃO		
1		
MODO SPRAY (CC+) COM OSCILAÇÃO		
2		
3		
SINCRONIZAÇÃO COM MODO SPRAY (CC+) NAS LATERAIS E CC- NO CENTRO		
4		

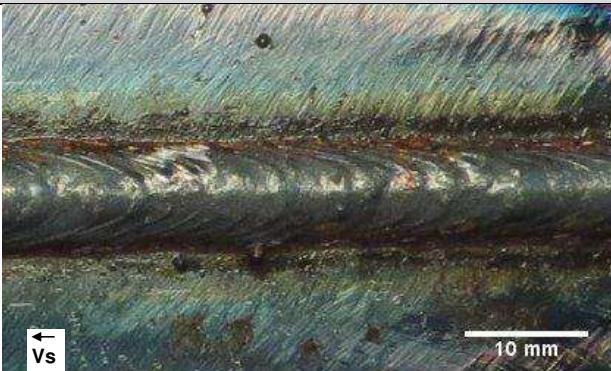
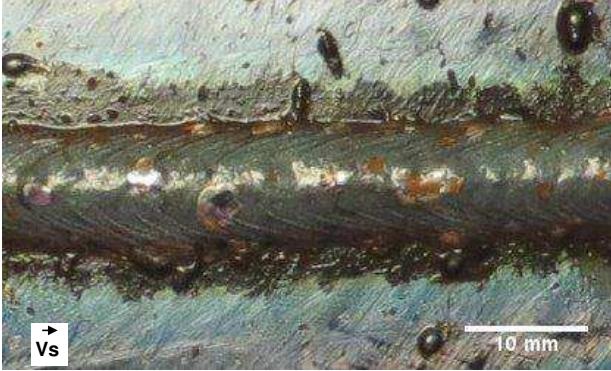
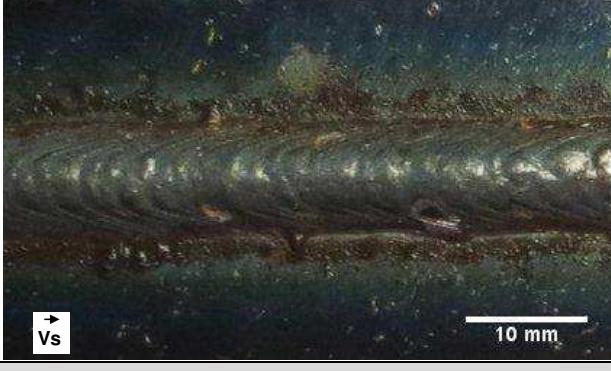
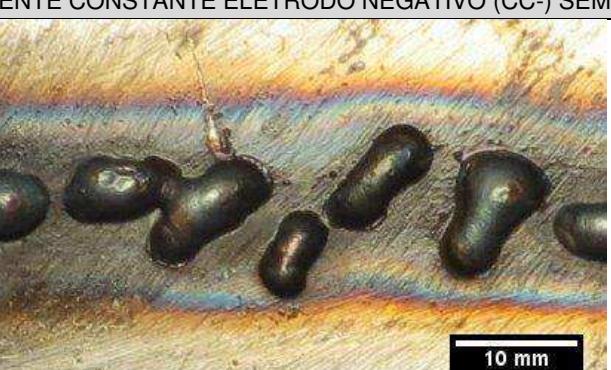
Ensaio	Imagen	
5		
6		
7		
MODO CORRENTE CONSTANTE ELETRODO NEGATIVO (CC-) SEM OSCILAÇÃO		
8		

Figura 108. Aspecto superficial (foto superior), acompanhada da respectiva macrografia típica (espessura da chapa de 3 mm), dos cordões de solda obtidos com o processo MIG/MAG em modo Spray polaridade positiva (CC+) e modo CC-

6.3.5 Medidas relacionadas à geometria da zona fundida

A Tabela 31 apresenta as medidas médias relacionadas à geometria da zona fundida dos cordões resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG em modo Spray com polaridade positiva (CC+) e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-). A tabela completa com todas as medições realizadas a partir das secções transversais está apresentada no APÊNDICE IV e a tabela completa com as medições da largura está apresentada no APÊNDICE V. Para o ensaio 8 (condição referencial para configuração corrente constante eletrodo negativo (CC-)) os valores não foram medidos/apresentados devido à irregularidade do “cordão”, conforme visto na Figura 108.

Tabela 31. Medidas médias relacionadas à geometria da zona fundida dos cordões resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG em modo Spray com polaridade positiva (CC+) e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-)

Ensai o	Largur a [mm]	Reforço Superio r [mm]	Reforço na Raiz [mm]	Área Depositad a Superior [mm ²]	Área Depositad a na Raiz [mm ²]	Área Fundida [mm ²]	Diluiçã o [%]	Penetraçã o Máxima [mm]
MODO SPRAY (CC+) SEM OSCILAÇÃO								
1	10,86	2,73	0,62	21,88	3,21	25,47	50	3,00
MODO SPRAY (CC+) COM OSCILAÇÃO								
2	12,14	2,18	1,39	15,95	7,00	25,90	53	3,00
3	10,36	2,45	1,08	16,42	6,11	23,59	51	3,00
SINCRONIZAÇÃO COM MODO SPRAY (CC+) NAS LATERAIS E MODO CC- NO CENTRO								
4	7,62	2,59	-	14,90	-	6,42	30	1,57
5	8,41	2,29	-	11,89	-	5,57	32	1,17
6	9,37	2,29	-	14,50	-	6,79	32	1,00
7	8,82	2,40	-	12,25	-	7,81	39	2,41

* Para o ensaio 8 os valores não foram medidos/apresentados devido à irregularidade do “cordão”.

6.3.6 Análise das medidas relacionadas à geometria da zona fundida

A seguir são realizadas as análises das medidas relacionadas à geometria da zona fundida para as combinações dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante na polaridade negativa (CC-).

A Figura 109 mostra o comportamento da penetração máxima dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante na polaridade negativa (CC-). A configuração com modo Spray sem oscilação e aquelas com oscilação (nas duas frequências) resultaram em penetração total (vide ensaios 1, 2 e 3 da Figura 108),

indicando que a energia, para a espessura de chapa utilizada, foi em excesso. Os valores de penetração resultantes das configurações com sincronização foram inferiores, de acordo com o esperado. Analisando as configurações com sincronização, nota-se que a tendência da penetração máxima foi diferente para as duas frequências de oscilação, ou seja, aumentando-se a deflexão do eletroímã a penetração diminui ligeiramente para a frequência de oscilação de 1,25 Hz e aumentou consideravelmente para a frequência de 2,5 Hz. Entretanto ao se observar as macrografias destes ensaios (vide ensaios 4, 5, 6 e 7 da Figura 108), nota-se que a penetração tendeu a se concentrar no centro para os ensaios com a deflexão menor (tensão do eletroímã de 20 V) – ensaios 4 e 5, enquanto que para uma deflexão maior (tensão do eletroímã de 40 V) – ensaios 6 e 7, nota-se claramente a tendência do crescimento da penetração nas laterais. Portanto, a análise do gráfico isoladamente não é conclusiva, visto que se percebe ao analisar as macrografias que a região de aumento da penetração foi distinta.

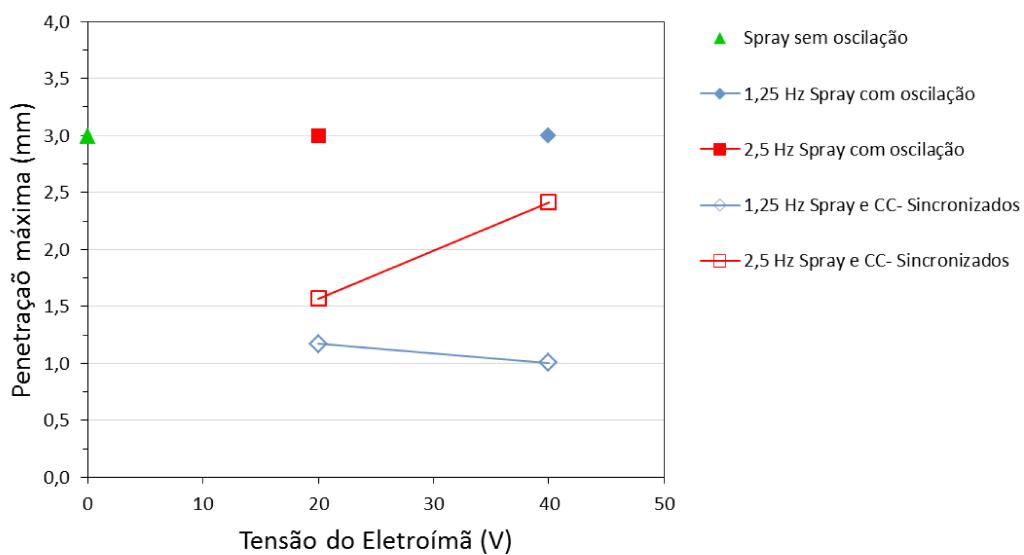


Figura 109. Penetração máxima dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-)

A Figura 110 mostra o comportamento da largura dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante na polaridade negativa (CC-). A tendência foi a largura aumentar com o aumento da tensão do eletroímã e, conforme esperado, as maiores larguras ocorreram para as configurações apenas com modo Spray, sem e com oscilação. As configurações com modos sincronizados, por passarem parte do tempo num modo de baixa energia (CC-), resultaram em larguras menores em comparação às configurações somente com modo Spray (tanto sem como com

oscilação). Analisando as configurações com sincronização, observa-se que a largura foi maior para a frequência de oscilação de 1,25 Hz (vide ensaios 5 e 6 Figura 108).

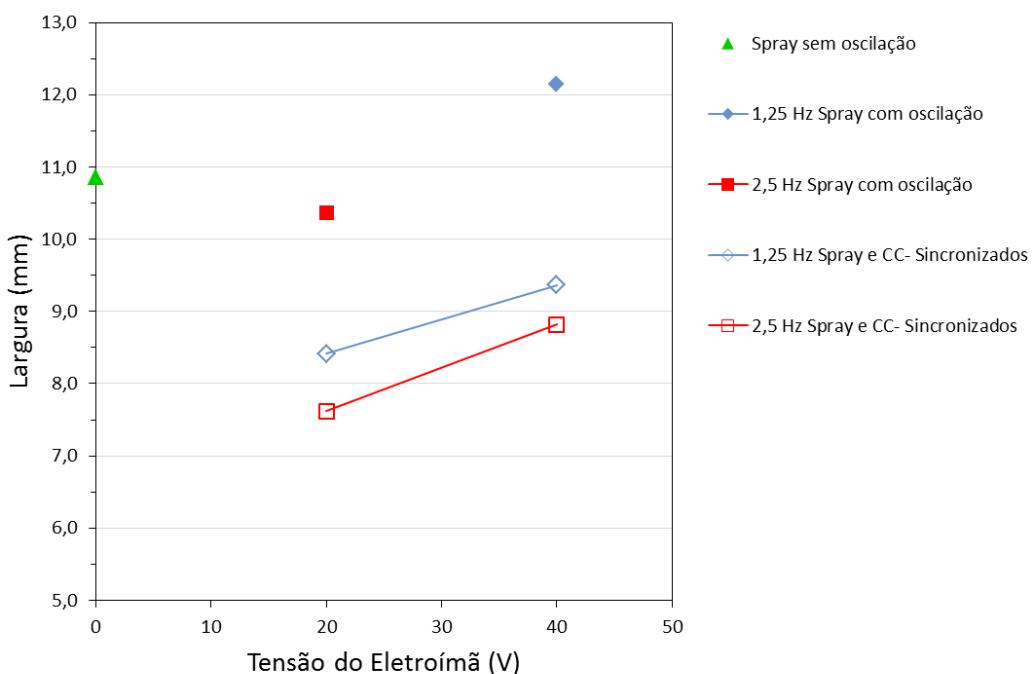


Figura 110. Largura dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-)

A Figura 111 mostra o comportamento do reforço superior dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante na polaridade negativa (CC-). O reforço tendeu a diminuir com o aumento da tensão do eletroímã (no caso de 1,25 Hz pouco variou), apresentando um comportamento oposto ao da largura, conforme esperado. O maior reforço ocorreu com modo Spray sem oscilação, fato esperado pela maior quantidade de material depositado (maior velocidade de alimentação de arame) sempre no centro do cordão. As configurações com modos sincronizados e Spray com oscilação resultaram em reforços menores aos da configuração com modo Spray sem oscilação e próximos entre si, mostrando que o efeito da sincronização neste fator geométrico do cordão não é tão evidente.

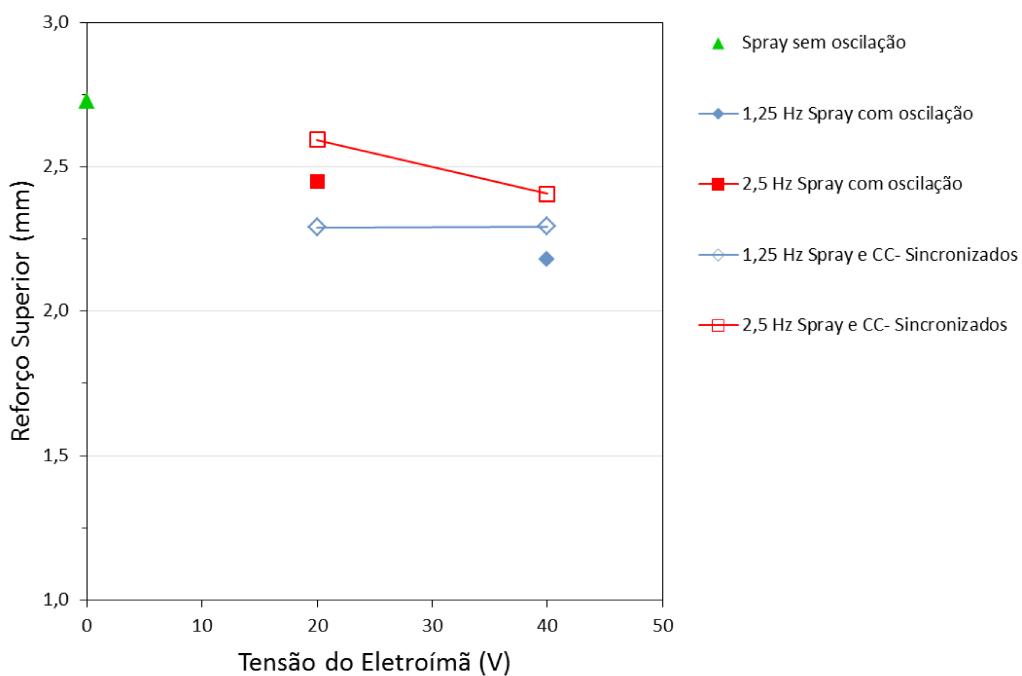


Figura 111. Reforço superior dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-)

A Figura 112 mostra o comportamento da área fundida dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante na polaridade negativa (CC-). Como esperado, as maiores áreas fundidas ocorreram para as configurações com modo Spray sem e com oscilação. Os valores de área fundida resultantes das configurações com sincronização foram significativamente menores em relação aos valores das configurações com modo Spray sem e com oscilação. Para as configurações sincronizadas, o aumento da deflexão aumentou a área fundida com as duas frequências de oscilação (1,25 e 2,5 Hz), provavelmente devido à tendência geral de aumento de largura e de penetração dos cordões para as duas frequências de oscilação (vide Figura 110 e Figura 109). Talvez o aumento da área fundida (e também da largura e da penetração) com o aumento da deflexão nos casos sincronizados possa ser explicado por uma possível diminuição da sobreposição de material fundido nas laterais do cordão; com o arco sendo mais defletido existiria menor barreira de metal fundido entre o arco e o metal de base, ou seja, o calor do arco agiria mais próximo ao metal de base, levando a maior fusão. Por fim, nos casos sincronizados, a frequência de 2,5 Hz apresentou níveis maiores de área fundida.

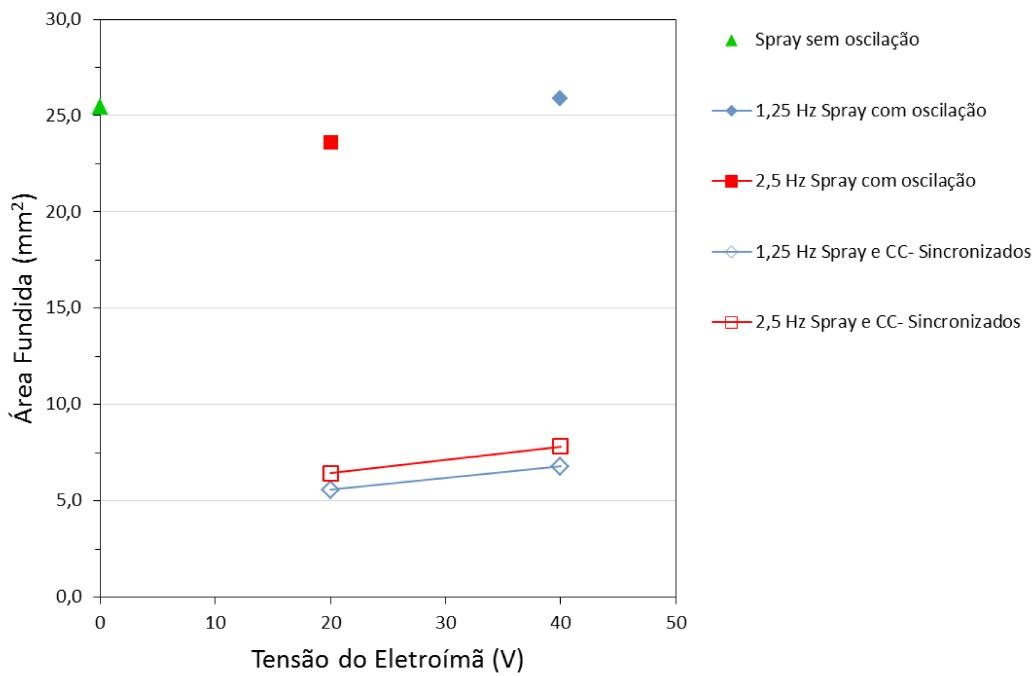


Figura 112. Área fundida dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-)

A Figura 113 mostra o comportamento da diluição dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante na polaridade negativa (CC-). Os valores de diluição para as configurações de modo Spray sem e com oscilação ficaram próximos entre si e maiores em relação às configurações sincronizadas. Analisando as configurações sincronizadas, nota-se que com o aumento da tensão do eletroímã (deflexão), para a frequência de 1,25 Hz a diluição praticamente não variou, enquanto que para a frequência de 2,5 Hz a diluição aumentou significativamente, provavelmente devido ao aumento da penetração (vide Figura 109). Neste caso, o aumento da largura também pode ter contribuído para este aumento na diluição. A diluição foi menor para a tensão do eletroímã em 20 V e a frequência de oscilação em 2,50 Hz.

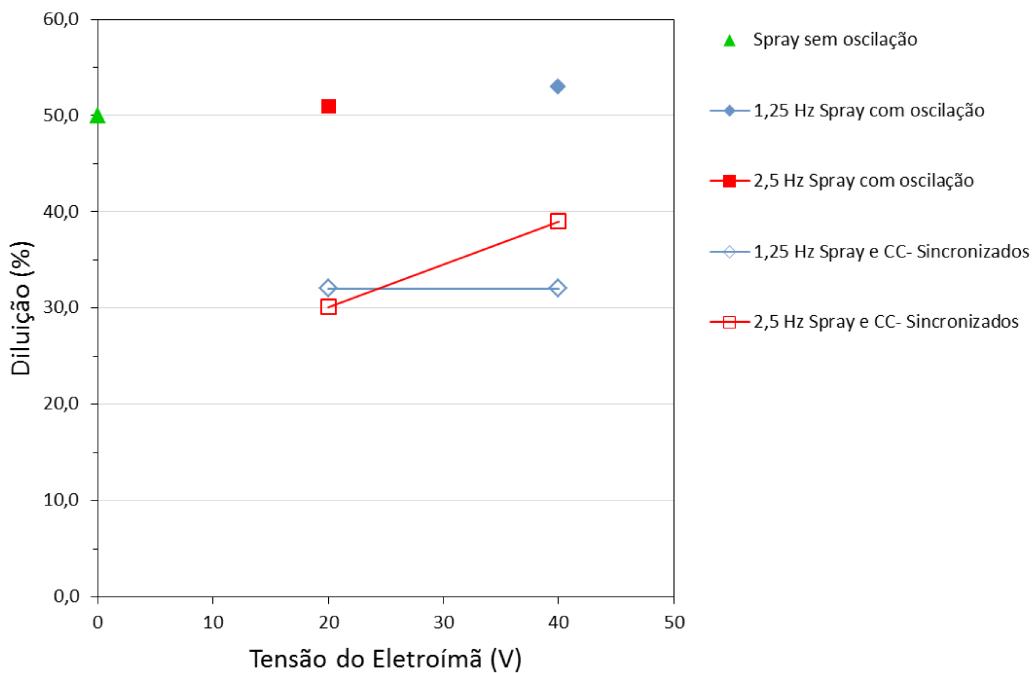


Figura 113. Diluição dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-)

Assim, com a sincronização da oscilação magnética do arco com o processo de soldagem MIG/MAG em modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo corrente constante na polaridade negativa (CC-) foi possível controlar a geometria do cordão/zona fundida formada. Neste caso, foi possível diminuir a diluição dos cordões resultantes (embora a taxa de deposição metálica não tenha sido mantida constante), com pouca variação no reforço superior e ao mesmo tempo com aumento de largura dos cordões e com tendência de maior concentração da penetração nas laterais.

6.4 Spray polaridade positiva (CC+) e Pulsado polaridade positiva (CC+)

6.4.1 Parâmetros

As configurações para os ensaios realizados para esta combinação são mostradas na forma de fluxograma na Figura 114.

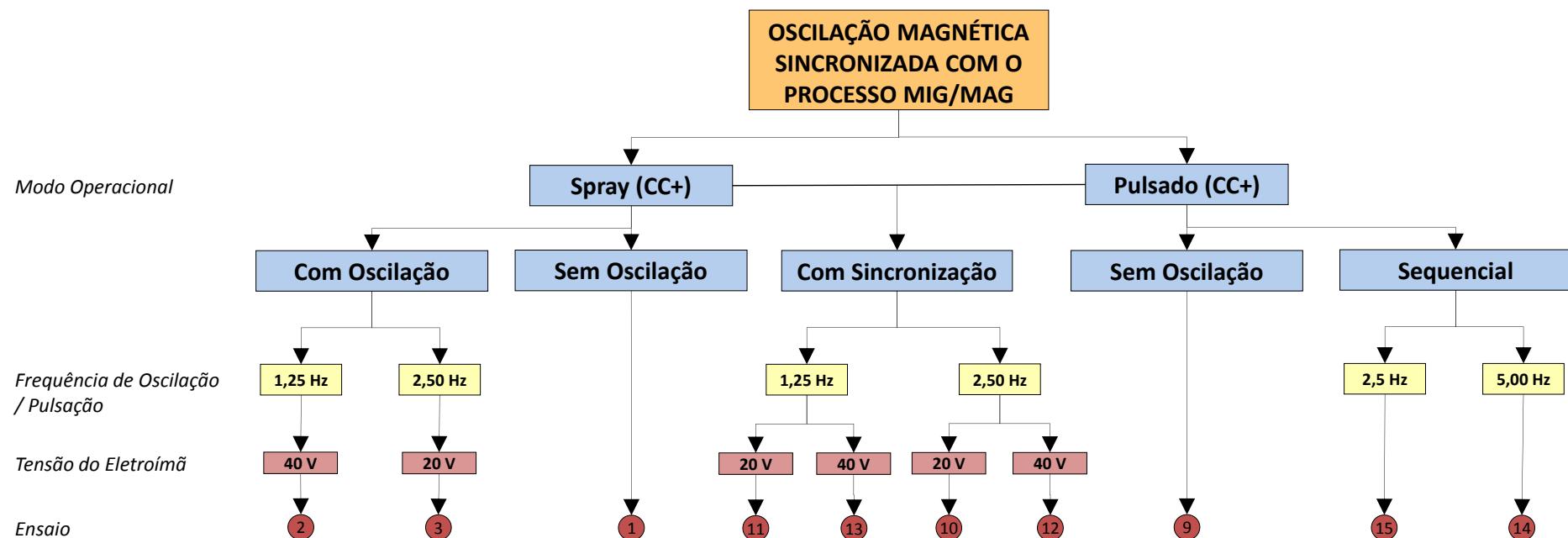


Figura 114. Fluxograma dos ensaios realizados com o processo MIG/MAG para combinação Spray (CC+) e modo Pulsado (CC-)

Os parâmetros utilizados aqui para o modo Spray na polaridade positiva (CC+) foram os mesmos usados no item 6.3 Spray polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-).

Na Tabela 32 são apresentados os parâmetros de corrente e de tempo utilizados no caso da soldagem MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+), cuja transferência metálica resulta em uma gota por pulso (KOVALENKO et al., 2013).

Tabela 32. Parâmetros da soldagem MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) (transferência metálica de uma gota por pulso)

Corrente de Soldagem Média [A]	Corrente de Pulso [A]	Corrente de Base [A]	Tempo de Pulso [ms]	Tempo de Base [ms]	Velocidade de Alimentação [m/min]	Frequência de Pulso [Hz]
100	250	40	7,7	19,3	2,8	37

A Tabela 33 mostra os parâmetros do ensaio com soldagem MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação.

Tabela 33. Soldagem MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação

Ensaio	Corrente de Soldagem Média [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
9	100	0	0

A Tabela 34 apresenta os parâmetros utilizados para soldagem MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro do cordão.

Tabela 34. Soldagem MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro

Ensaio	Corrente de Soldagem nas Laterais [A]	Corrente de Soldagem Média no Centro [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Oscilação [Hz]
10	240	100	20	2,50
11	240	100	20	1,25
12	240	100	40	2,50
13	240	100	40	1,25

Na Tabela 35 são mostrados os parâmetros para soldagem MIG/MAG combinada sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+). A frequência apresentada refere-se ao intervalo entre a alteração dos modos de soldagem (como se estivesse com oscilação), pois,

como citado anteriormente, a tensão do eletroímã, que governa a alteração destes modos, passa pelo nível central (neste caso zero) após o pulso de tensão em cada uma das laterais. Para estes ensaios, o controle do eletroímã era ligado, mas a fonte de alimentação de tensão para a bobina não. Assim, tinha-se o sinal para mudança dos modos operacionais de soldagem, mas sem deflexão magnética.

Tabela 35. Soldagem MIG/MAG combinada sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+)

Ensaio	Corrente de Soldagem para Spray CC+ [A]	Corrente de Soldagem Média para Pulsado [A]	Tensão do Eletroímã [V]	Frequência de Alternância entre Modos Operacionais [Hz]
14	240	100	0	5,0
15	240	100	0	2,5

O modo Pulsado também foi tentando nas laterais do cordão. Entretanto, como neste caso a corrente atinge níveis baixos (corrente de base – baixa rigidez do arco) várias vezes durante o ciclo de pulsação, o arco apagou com certa recorrência pela ação do campo magnético (tensão do eletroímã). Este fenômeno foi estudado anteriormente em Reis et al. (2012) e Reis et al. (2013), onde foi demonstrado que arcos de baixa corrente são apagados com maior facilidade por apresentarem menor rigidez térmica. De acordo com os testes da caracterização do arco TIG (CAPÍTULO IV), fica claro que arcos de baixa corrente também têm menor rigidez mecânica e, por isso, também são mais defletidos e assim mais facilmente apagados. A Figura 115 ilustra o apagamento do arco MIG/MAG ao se aplicar a oscilação magnética com modo Pulsado no centro e nas laterais. Entretanto, a questão do apagamento de arco não impede o modo Pulsado de ser utilizado no centro do cordão, uma vez que nesta posição não é aplicado campo magnético.

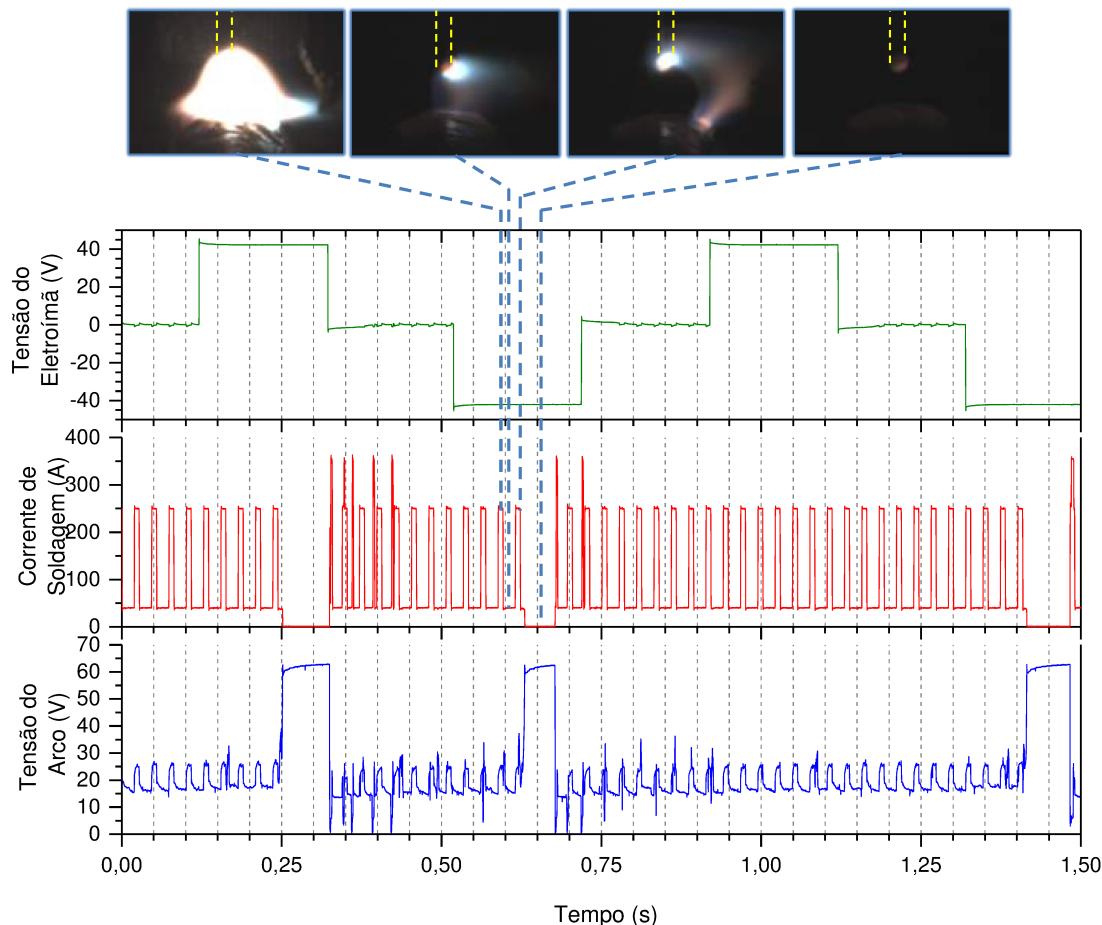


Figura 115. Oscilograma com imagens mostrando o apagamento do arco utilizando soldagem MIG/MAG modo Pulsado nas laterais e no centro

6.4.2 Grandezas elétricas resultantes

A seguir são apresentadas as grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG em modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) medidas a partir das informações adquiridas pelo sistema de aquisição de dados. As grandezas elétricas, inclusive aquelas resultantes dos ensaios de oscilação magnética sincronizada, ficaram de acordo com o programado, evidenciando novamente o bom funcionamento do sistema de controle do eletroímã e da fonte de soldagem no caso do processo MIG/MAG.

A Tabela 36 apresenta as grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação, referentes ao ensaio da Tabela 33. A Tabela 27 e a Tabela 28 (seção anterior) já mostraram respectivamente os valores das grandezas elétricas resultantes dos ensaios com o processo MIG/MAG em modo Spray com corrente constante na polaridade positiva (CC+) sem oscilação e com oscilação (nas laterais e no centro).

Tabela 36. Grandezas elétricas resultantes do ensaio com processo MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação

Ensaio	Tensão do Eletroímã [V]	Modo Pulsado (CC+)				
		Corrente de Pico [A]	Corrente de Base [A]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Frequência de Pulsação [Hz]
9	0,15	251,24	36,63	101,16	19,63	41,32

Obs: Para facilitar as medições os valores de corrente de pico e de base correspondem aos valores máximos e mínimos medidos, respectivamente.

A Tabela 37 mostra as grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro do cordão, referentes aos ensaios da Tabela 34. E na Tabela 38 são mostradas as grandezas elétricas resultantes da soldagem MIG/MAG combinada sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+).

Tabela 37. Grandezas elétricas resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro

Ensaio	Tensão do Eletroímã				Modo Pulsado (CC+)					Modo Spray (CC+)			
	Tensão Esquerda [V]	Tensão Central [V]	Tensão Direita [V]	Frequência [Hz]	Corrente de Pico [A]	Corrente de Base [A]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Frequência de Pulsação [Hz]	Tempo de Parada [ms]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Tempo de Parada [ms]
10	18,23	-0,59	-17,81	2,52	255,89	37,92	101,92	18,99	39,06	0,09	240,59	28,58	0,09
11	18,17	0,55	-17,74	1,26	256,92	36,63	98,75	20,16	35,71	0,20	240,68	27,96	0,20
12	37,57	-1,01	-37,10	2,50	256,15	36,89	98,51	19,85	35,46	0,11	240,81	27,93	0,09
13	37,45	-0,34	-36,93	1,25	256,92	37,92	98,09	19,21	37,59	0,21	241,17	27,28	0,19

Obs: Para facilitar as medições os valores de corrente de pico e de base correspondem aos valores máximos e mínimos medidos, respectivamente.

Tabela 38. Grandezas elétricas resultantes das soldagens MIG/MAG combinadas sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+)

Ensaio	Tensão do Eletroímã [V]	Modo Pulsado (CC+)					Modo Spray (CC+)		
		Corrente de Pico [A]	Corrente de Base [A]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]	Frequência de Pulsação [Hz]	Tempo de Pulso* [ms]	Corrente Média [A]	Tensão Média [V]
14	0,17	253,57	35,08	98,04	22,43	35,46	0,10	240,62	28,49
15	0,17	255,89	37,41	98,35	20,56	35,46	0,20	240,73	27,73

Obs: Para facilitar as medições os valores de corrente de pico e de base correspondem aos valores máximos e mínimos medidos, respectivamente.

*Tempo de pulso neste contexto é o tempo em que o processo permaneceu no modo de soldagem em questão.

6.4.3 Oscilogramas e imagens em alta velocidade da soldagem

A seguir são mostrados os oscilogramas e as imagens (do arco, da poça e mesmo das gotas metálicas) das soldagens realizadas utilizando o modo Spray na polaridade positiva (CC+) e o Pulsado na polaridade positiva (CC+). Sem exceção, os níveis de corrente de soldagem, tensão do arco e tensão do eletroímã ficaram de acordo com o programado.

A Figura 100 (seção anterior) já apresentou o oscilograma e a imagem referente à configuração Spray polaridade positiva (CC+) sem oscilação e correspondente à Tabela 22. Além disso, a Figura 101 e a Figura 102 (seção anterior) já apresentaram os oscilogramas e as imagens da soldagem MIG/MAG com modo Spray na polaridade positiva (CC+) com oscilação (paradas de arco laterais e central), referente à Tabela 24.

A Figura 116 apresenta o oscilograma e as imagens do ensaio 9, referente à configuração em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação e correspondente à Tabela 33. Nota-se um arco com bastante intensidade luminosa nos picos de corrente e de menor intensidade nas bases de corrente, o que é característico da soldagem MIG/MAG em modo Pulsado na polaridade positiva (CC+). Os sinais de corrente de soldagem e tensão do arco ficaram bem estáveis, como esperado.

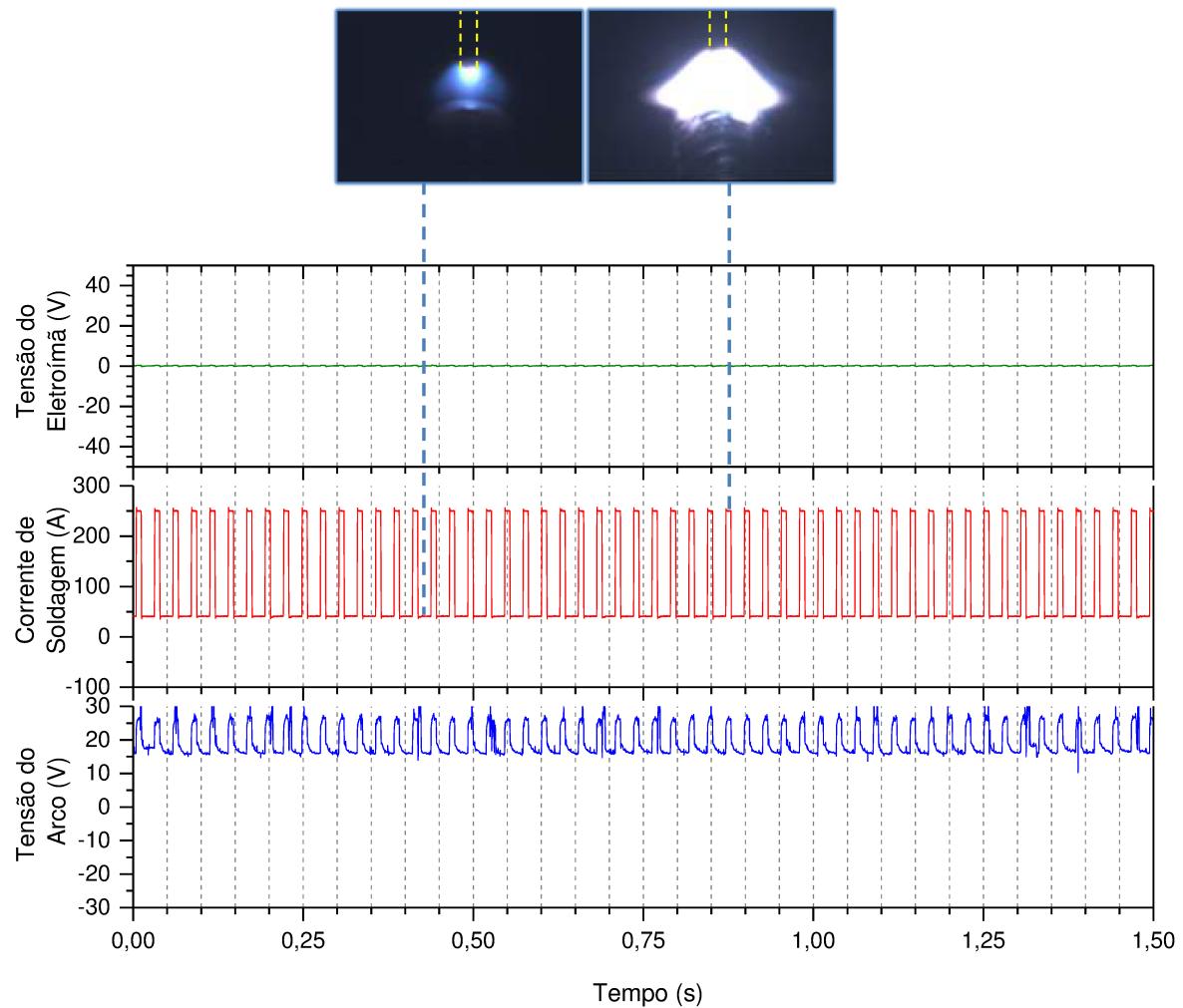


Figura 116. Oscilogramma e imagens da configuração modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) sem oscilação, referente ao ensaio 9 da Tabela 33

A Figura 117, Figura 118, Figura 119 e Figura 120 apresentam os oscilogramas e as imagens das soldagens dos ensaios com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado polaridade positiva (CC+) no centro do cordão, correspondente aos ensaios da Tabela 34. Pelos oscilogramas é possível verificar que os sinais do eletroímã (deflexão magnética) e da corrente de soldagem (consequentemente da tensão do arco) ficaram sincronizados, apesar do pequeno atraso em alguns casos para mudança da corrente em relação ao sinal de tensão do eletroímã (sinal de controle). Nota-se também a atuação de maior energia (maior corrente - maior brilho do arco - modo Spray) nas laterais e de menor energia (momentos de menor corrente - menor brilho do arco - modo Pulsado CC+) no centro. Com relação às gotas metálicas, mais uma vez não foi possível verificar se estas eram defletidas na mesa direção do arco, já que o brilho intenso do mesmo não permitiu observá-las com clareza. Entretanto, pelos vídeos foi possível comprovar a ocorrência de transferência metálica de uma gota por pulso no centro do cordão.

A poça parece ter se mantido estável em todos os ensaios, mas com grande movimentação no momento de mudança do modo de soldagem e no momento dos picos de corrente do modo Pulsado, provavelmente por mudança na pressão exercida pelo arco (maior no modo Spray e nos picos de corrente do modo Pulsado). Desta vez não foi possível observar com clareza que as maiores tensões do eletroímã levaram a maiores deflexões do arco (vide Figura 119 e Figura 120 em relação à Figura 117 e à Figura 118, respectivamente).

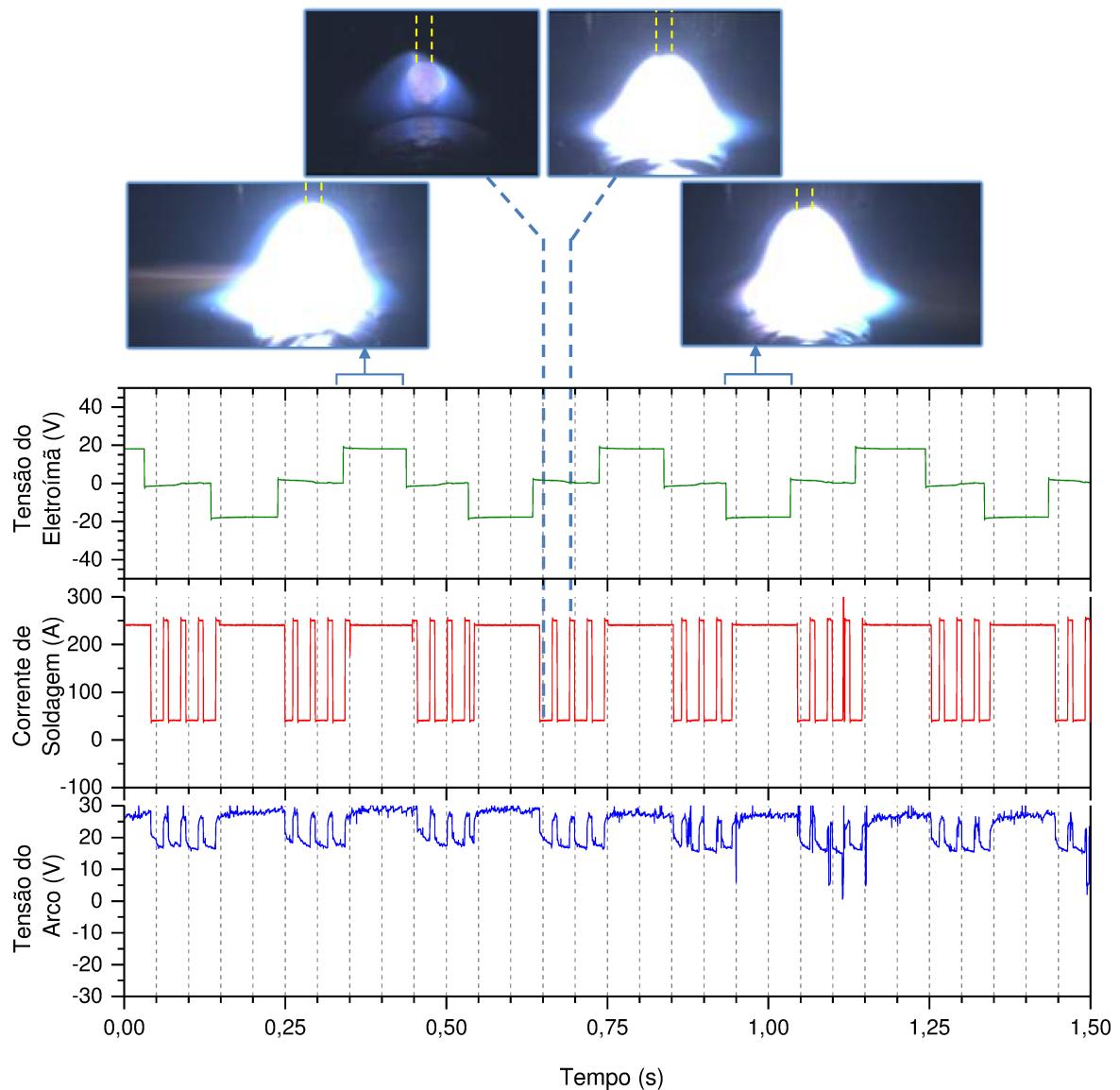


Figura 117. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 10 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)

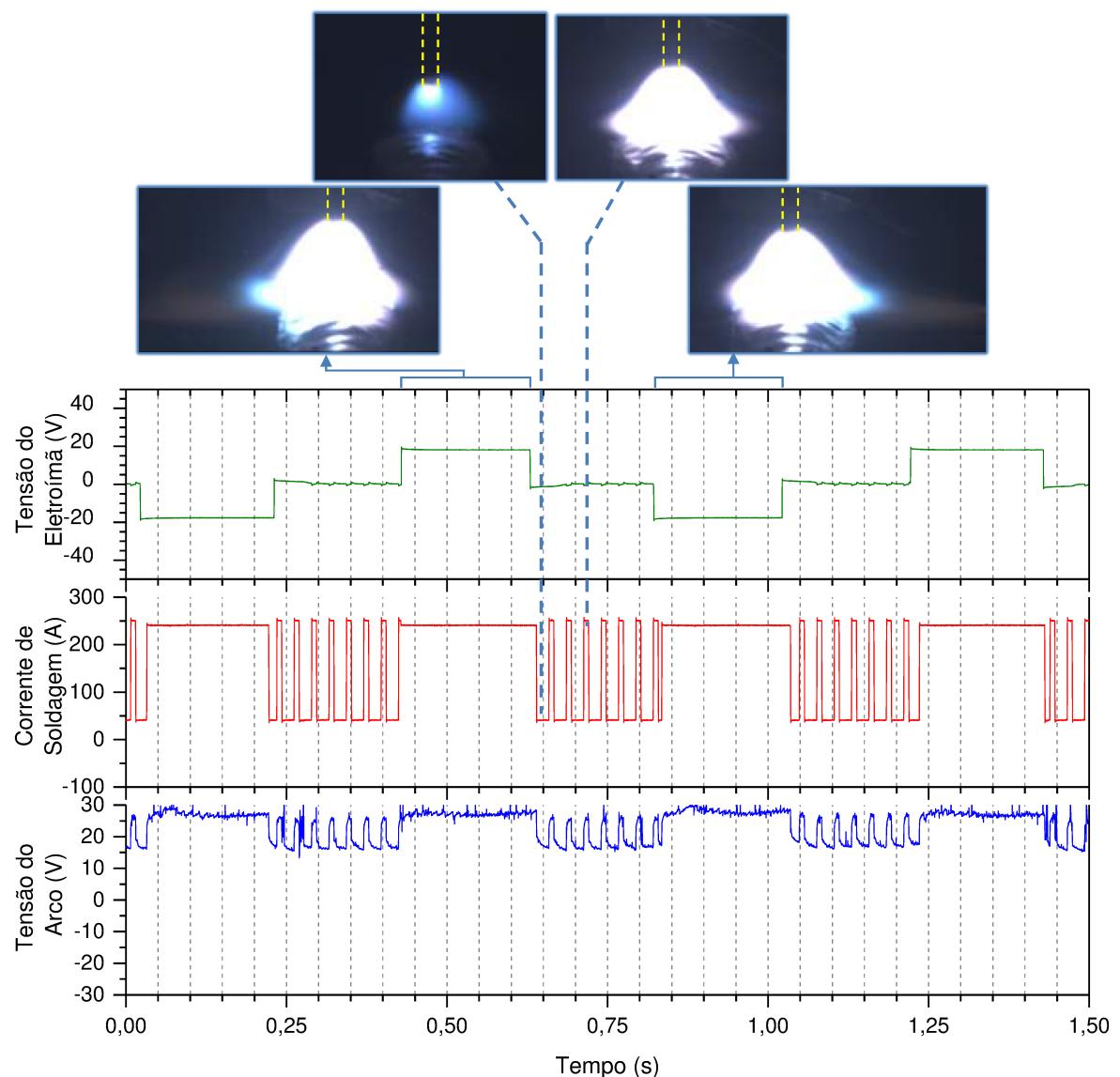


Figura 118. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 11 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 20 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz).

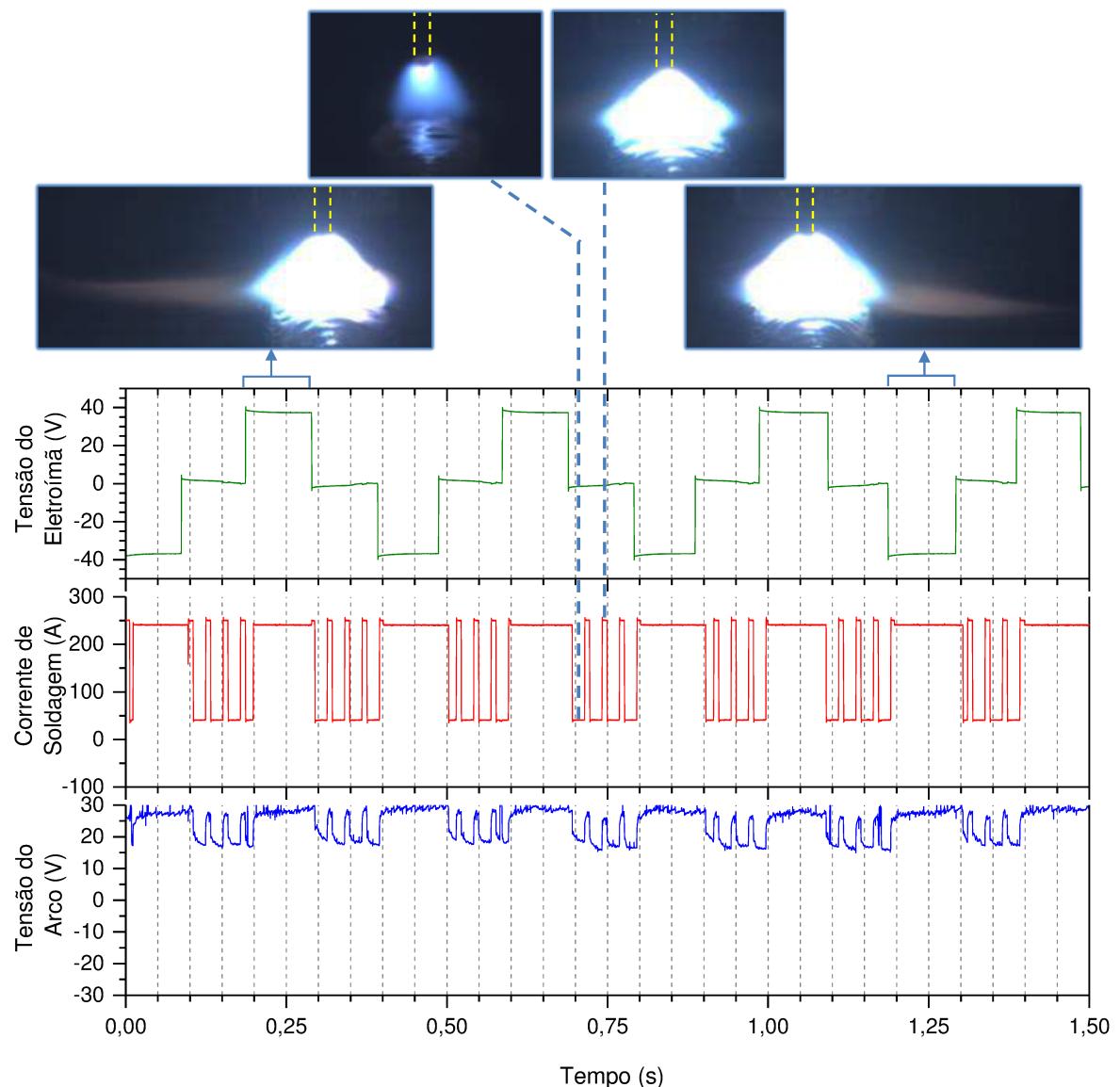


Figura 119. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 12 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 2,5 Hz)

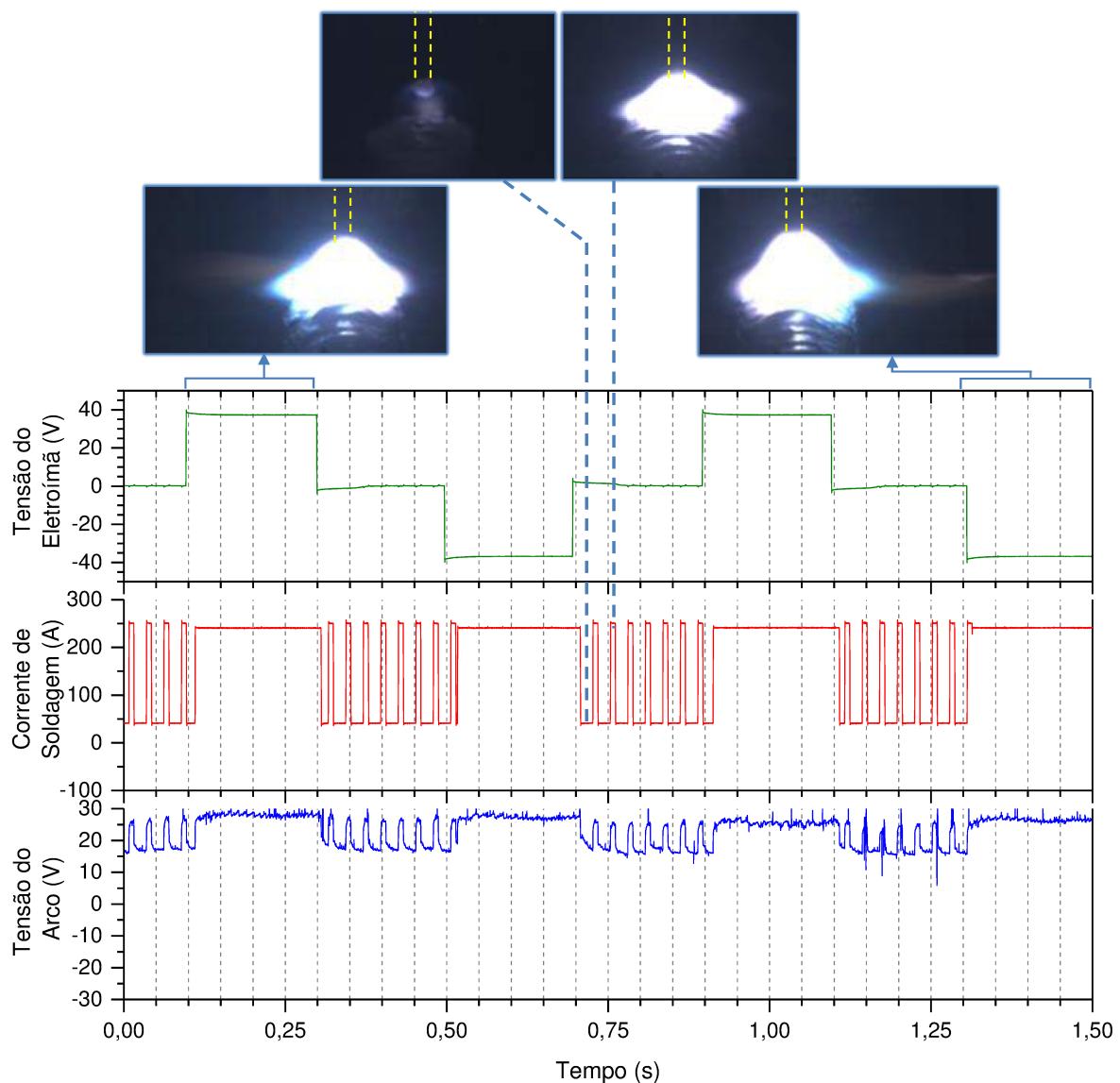


Figura 120. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG com sincronização entre modo Spray na polaridade positiva (CC+) nas laterais e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) no centro, referente ao ensaio 13 da Tabela 34 (tensão do eletroímã em 40 V e frequência de oscilação em 1,25 Hz)

A Figura 121 e a Figura 122 mostram os oscilogramas e as imagens das soldagens MIG/MAG combinadas sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+), correspondente aos ensaios da Tabela 35. Nestes casos, apesar de ativo (em três níveis), o sinal de tensão do eletroímã foi utilizado apenas para comandar a mudança sequencial dentre os modos operacionais na fonte de soldagem, mas não havia campo magnético aplicado (não havia tensão chegando ao eletroímã, pois a fonte de alimentação de tensão da bobina estava desligada). Apesar de não se ter o sinal de controle apresentado como referência, foi possível verificar pelo sinal de

corrente a mudança sequencial entre os modos operacionais de soldagem, alternando entre maior energia (maior corrente - maior brilho do arco - modo Spray) e menor energia (momentos de menor corrente - menor brilho do arco - modo Pulsado CC+).

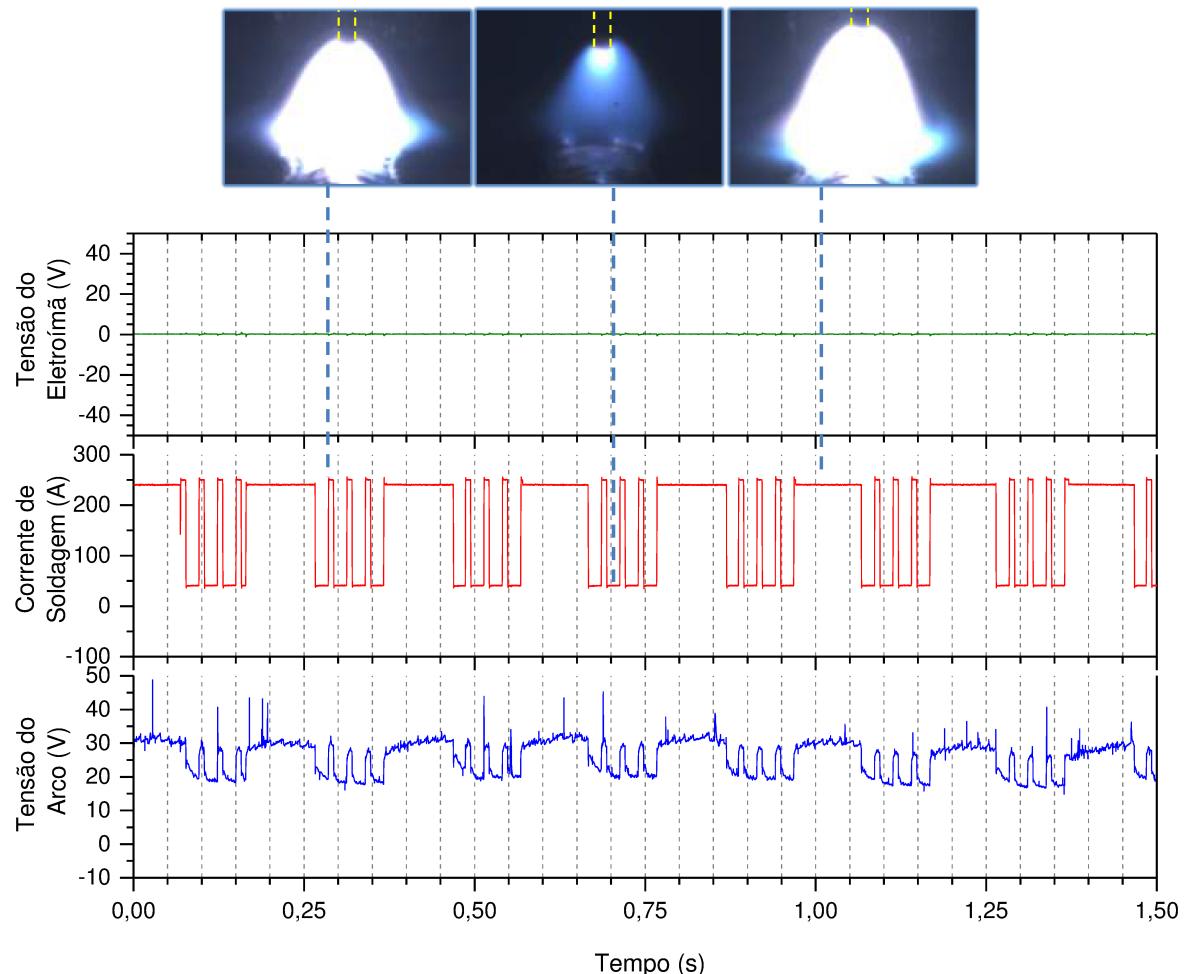


Figura 121. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG combinado sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+), referente ao ensaio 14 da Tabela 35 (frequência de pulsação de modos operacionais em 5 Hz)

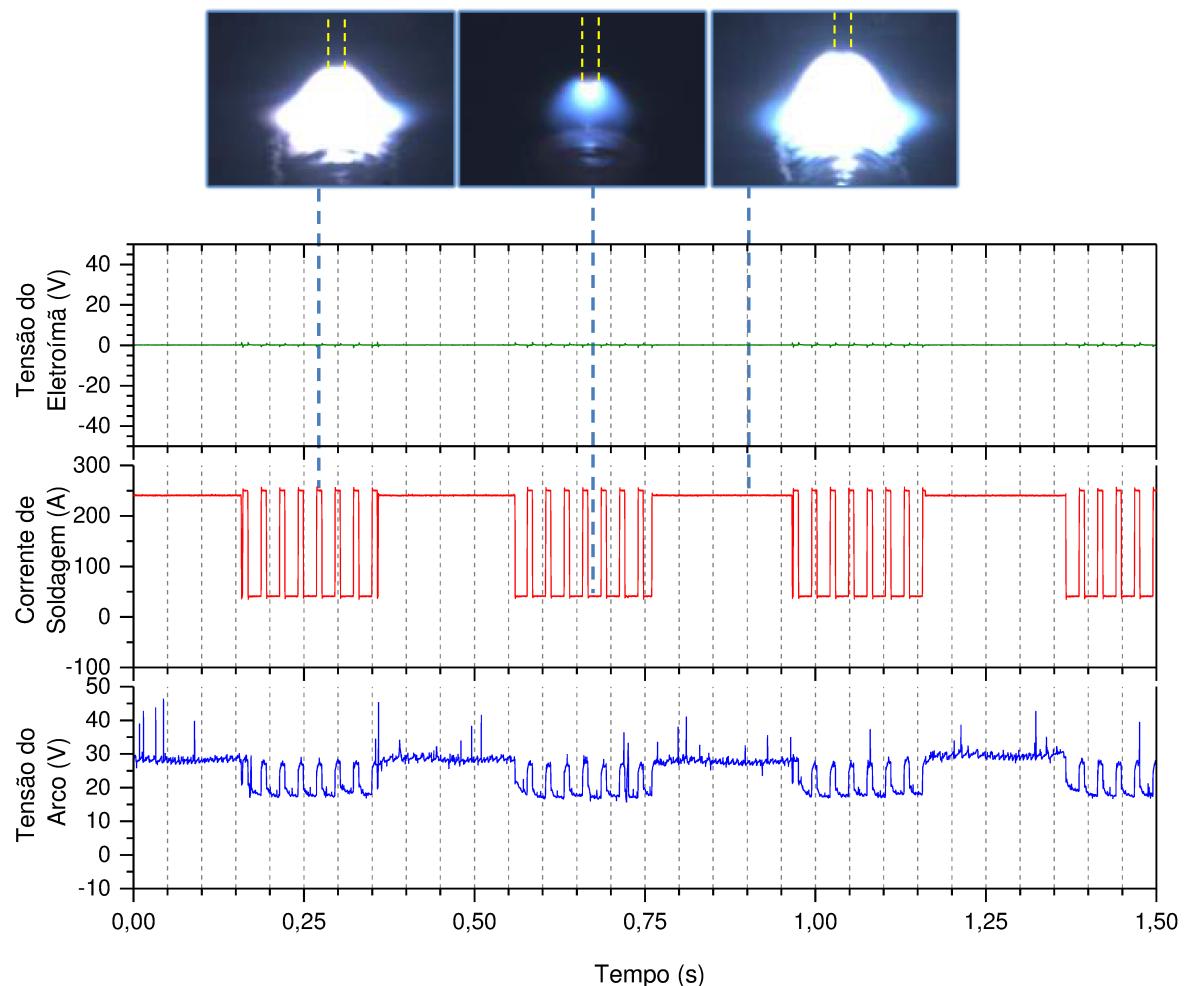
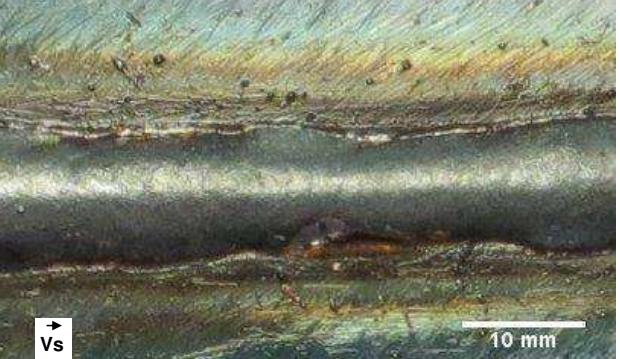
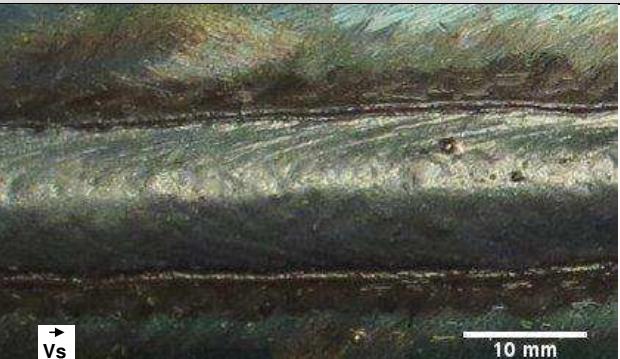
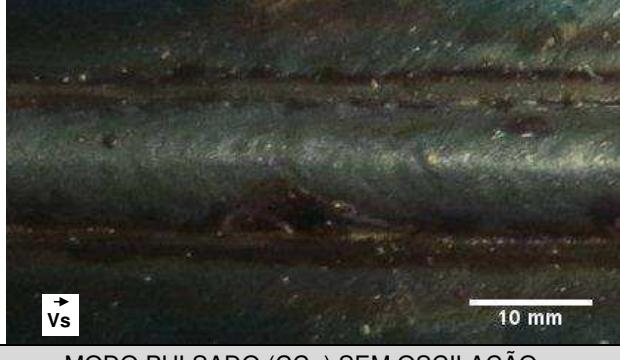
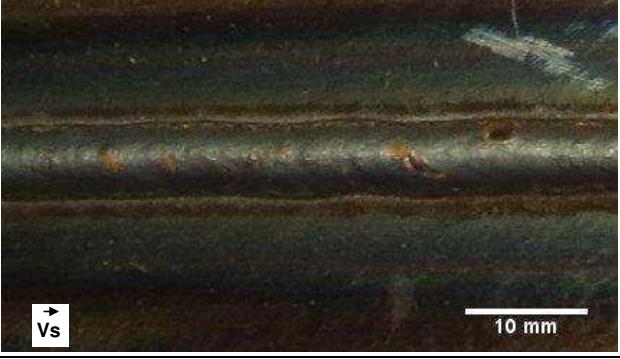
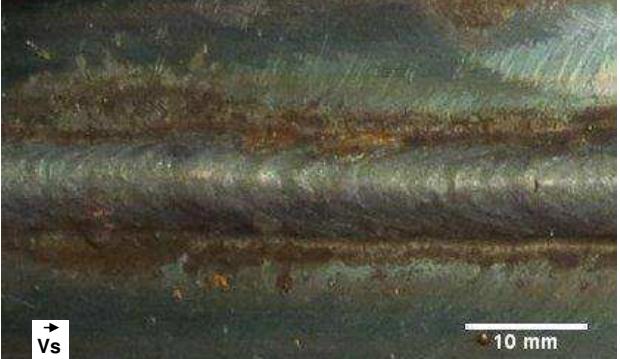
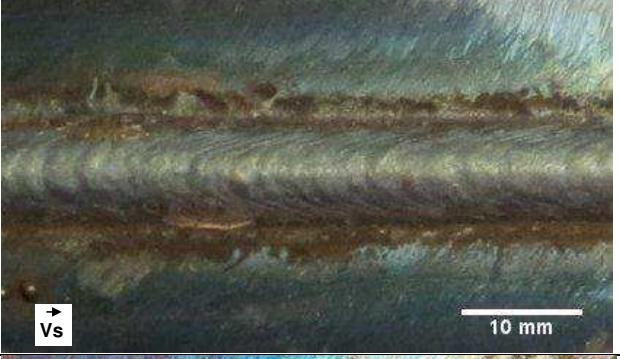
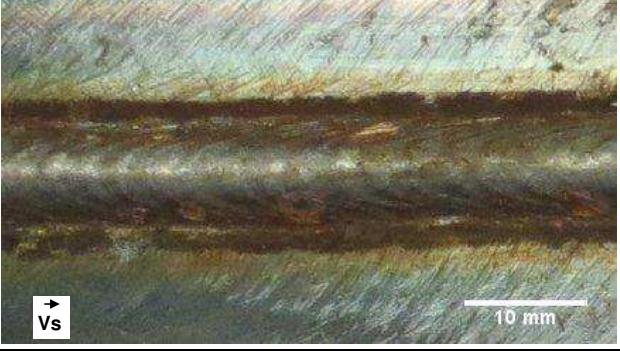


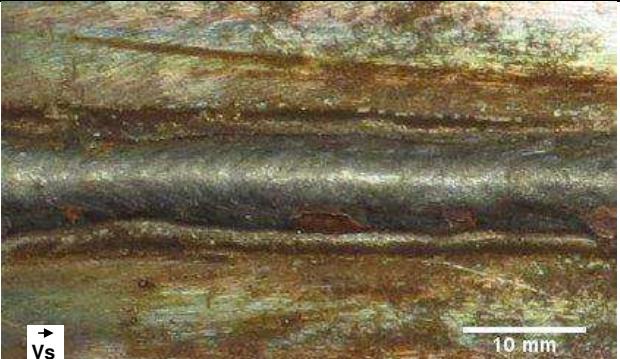
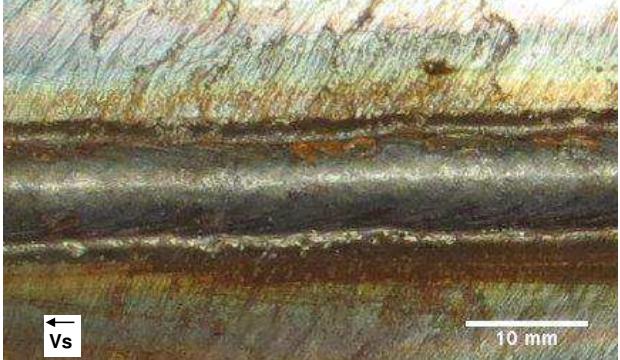
Figura 122. Oscilograma e imagens da configuração com processo MIG/MAG combinado sequencialmente com modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+), referente ao ensaio 15 da Tabela 35 (frequência de pulsação de modos operacionais em 2,5 Hz)

6.4.4 Imagens dos cordões

A Figura 123 apresenta as imagens da vista superior e das macrografias típicas dos cordões dos ensaios utilizando a soldagem MIG/MAG em modo Spray eletrodo positivo (CC+) e modo Pulsado eletrodo positivo (CC+). É importante destacar as imagens dos ensaios de 10 a 13 (feitos com oscilação magnética sincronizada), nas quais é possível notar mudanças na largura (maior do que com o modo pulsado sozinho) e penetração (menor do que com o modo Spray sozinho) dos cordões. Além disso, a penetração visualmente diminuiu e ficou menos concentrada no centro dos cordões com o aumento da tensão do eletroímã (40 V) (ensaços 12 e 13 em comparação com os ensaios 10 e 11, respectivamente).

Ensaio		Imagen	
MODO SPRAY (CC+) SEM OSCILAÇÃO			
1*			
MODO SPRAY (CC+) COM OSCILAÇÃO			
2*			
3*			
MODO PULSADO (CC+) SEM OSCILAÇÃO			
9			

Ensaio	Imagen		
SINCRONIZAÇÃO COM MODO SPRAY (CC+) NAS LATERAIS E MODO PULSADO (CC+) NO CENTRO			
10			⊗ Vs
11			⊗ Vs
12			⊗ Vs
13			⊗ Vs

Ensaio	Imagen	
COMBINAÇÃO SEQUENCIAL COM MODO SPRAY (CC+) E MODO PULSADO (CC+)		
14	 	
15	 	

* As imagens dos ensaios 1, 2 e 3, já mostradas na seção anterior, são repetidas aqui para facilitar comparações.

Figura 123. Aspecto superficial (foto superior), acompanhada da respectiva macrografia típica (espessura da chapa de 3 mm), dos cordões de solda obtidos com o processo MIG/MAG em modo Spray polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+)

6.4.5 Medidas relacionadas à geometria da zona fundida

A Tabela 39 apresenta as medidas médias relacionadas à geometria da zona fundida dos cordões resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG em modo Spray com polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+). A tabela completa com todas as medições realizadas a partir das secções transversais está apresentada no APÊNDICE IV e a tabela completa com as medições da largura está apresentada no APÊNDICE V.

Tabela 39. Medidas médias relacionadas à geometria da zona fundida dos cordões resultantes dos ensaios com processo MIG/MAG em modo Spray com polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+)

Ensai o	Largur a [mm]	Reforço Superio r [mm]	Reforço na Raiz [mm]	Área Depositad a Superior [mm ²]	Área Depositad a na Raiz [mm ²]	Área Fundida [mm ²]	Diluiçã o [%]	Penetraçã o Máxima [mm]
MODO SPRAY (CC+) SEM OSCILAÇÃO								
1*	10,86	2,73	0,62	21,88	3,21	25,47	50	3,00
MODO SPRAY (CC+) COM OSCILAÇÃO								
2*	12,14	2,18	1,39	15,95	7,00	25,90	53	3,00
3*	10,36	2,45	1,08	16,42	6,11	23,59	51	3,00
MODO PULSADO (CC+) SEM OSCILAÇÃO								
9	6,32	2,09	-	8,41	-	2,98	26	1,12
SINCRONIZAÇÃO COM MODO SPRAY (CC+) NAS LATERAIS E MODO PULSADO (CC+) NO CENTRO								
10	7,59	2,30	-	12,77	-	11,52	47	2,55
11	8,18	2,40	-	12,25	-	7,81	39	2,41
12	7,90	2,28	-	11,96	-	6,58	36	1,55
13	8,91	2,27	-	11,67	-	9,42	45	2,19
COMBINAÇÃO SEQUENCIAL COM MODO SPRAY (CC+) E MODO PULSADO (CC+)								
14	7,50	2,56	-	13,35	-	8,99	40	2,20
15	7,92	2,27	-	11,58	-	6,92	37	2,16

* Os dados dos ensaios 1, 2 e 3, apesar de já mostrados na seção anterior, são repetidos aqui para facilitar comparações.

6.4.6 Análise das medidas relacionadas à geometria da zona fundida

A seguir são realizadas as análises das medidas relacionadas à geometria da zona fundida para as combinações do modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+).

A Figura 124 mostra o comportamento da penetração máxima dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+).

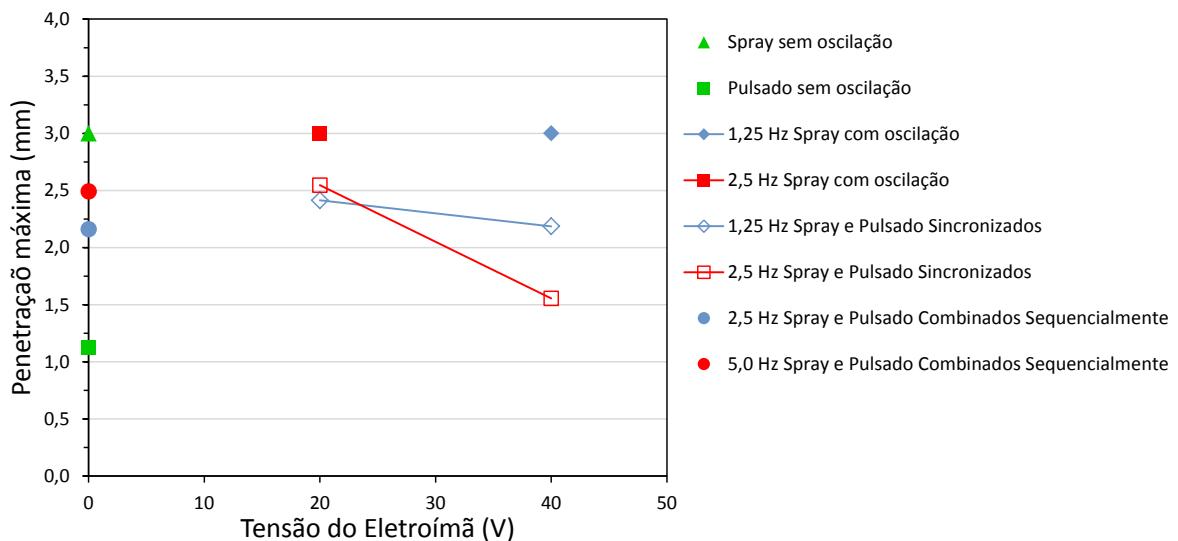


Figura 124. Penetração máxima dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)

A configuração com modo spray sem oscilação e aquelas com oscilação (nas duas frequências) resultaram em penetração total (vide ensaios 1, 2 e 3 da Figura 123), indicando que a energia, para a espessura de chapa utilizada, foi em excesso. Conforme previsto, a configuração com modo pulsado sem oscilação resultou na menor penetração por ser tratar do modo de soldagem com menor energia, dentre os utilizados. Os valores de penetração resultantes das configurações com sincronização e das configurações com modos combinados sequencialmente foram intermediários, de acordo com o esperado.

Focando agora somente nos casos sincronizados, aumentando-se a deflexão do eletroímã a penetração dos cordões diminuiu, de forma mais pronunciada para a maior frequência de oscilação (2,5 Hz) (penetração mais concentrada no centro do cordão nos ensaios 10 e 11 do que nos ensaios 12 e 13 da Figura 123). Para a menor deflexão (tensão do eletroímã em 20 V) não houve diferença entre a penetração máxima obtida para as diferentes frequências de oscilação do arco. Entretanto, para a maior deflexão (tensão do eletroímã em 40 V) a diferença de penetração máxima obtida foi elevada, com a frequência de oscilação maior (2,5 Hz) resultando na menor penetração (vide ensaios 12 e 13 da Figura 123). Com a maior deflexão (tensão do eletroímã em 40 V) e a maior frequência de oscilação (2,5 Hz) na configuração sincronizada foi possível inclusive reduzir a penetração máxima em relação às configurações com modos combinados sequencialmente.

A Figura 125 mostra o comportamento da largura dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+). A tendência foi a largura

aumentar com o aumento da tensão do eletroímã. Como esperado, as maiores larguras ocorreram para as configurações com modo Spray sem e com oscilação e a menor largura usando o modo Pulsado sem oscilação. As configurações com modos sincronizados e aquelas com modos combinados sequencialmente resultaram em larguras menores ao se comparar com as configurações somente com modo Spray (tanto sem como com oscilação) e larguras maiores se comparado à configuração com modo Pulsado sem oscilação. Com a maior deflexão (tensão do eletroímã em 40 V) nas configurações sincronizadas foi possível aumentar a largura em relação às configurações com modos combinados sequencialmente. Ainda analisando as configurações com sincronização, observa-se uma diferença mais significativa de larguras obtidas com o maior nível de deflexão (tensão do eletroímã em 40 V), com a frequência de oscilação de 1,25 Hz favorecendo maiores larguras (vide ensaios 11 e 13 Figura 123).

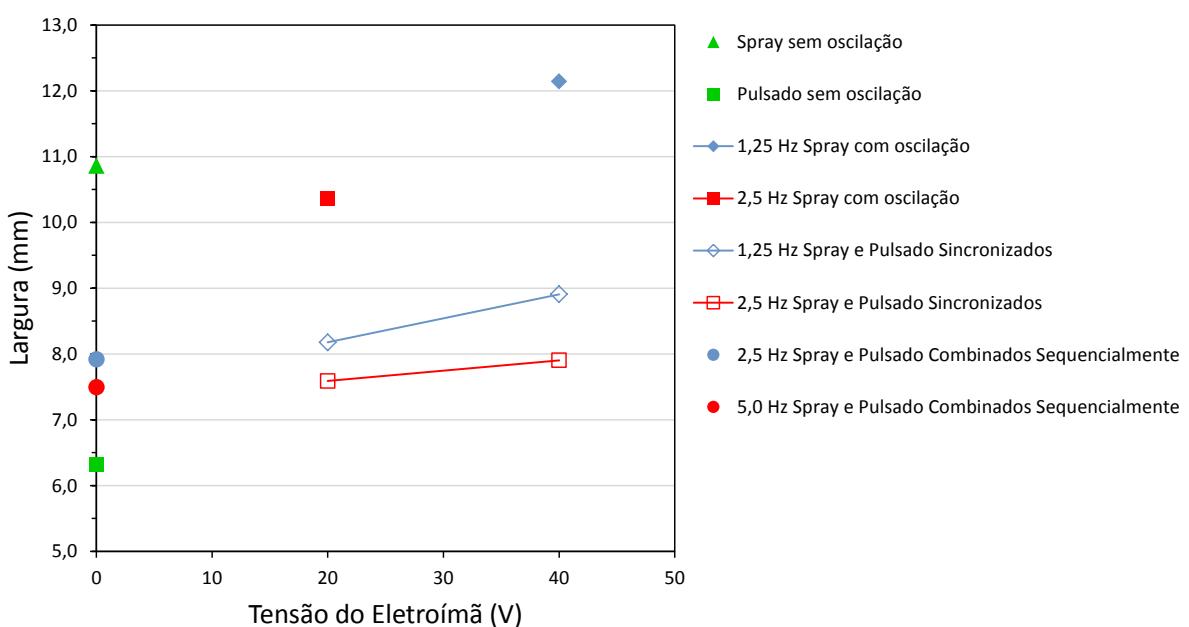


Figura 125. Largura dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)

A Figura 126 mostra o comportamento do reforço superior dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+). O maior reforço ocorreu com modo Spray sem oscilação e o menor com o modo pulsado sem oscilação. As configurações com modos sincronizados e aquelas com modos combinados sequencialmente resultaram em reforços intermediários e próximos entre si, independentemente dos níveis de deflexão e de frequência de oscilação utilizados. Focando nos casos sincronizados, conforme

previsto, o efeito no reforço superior foi em direção contrária ao ocorrido com a largura; já que a quantidade de material depositado foi a mesma, se a largura aumenta o reforço diminui. Nota-se que o reforço tendeu a diminuir com o aumento da tensão do eletroímã (no caso de 2,5 Hz com menor evidência).

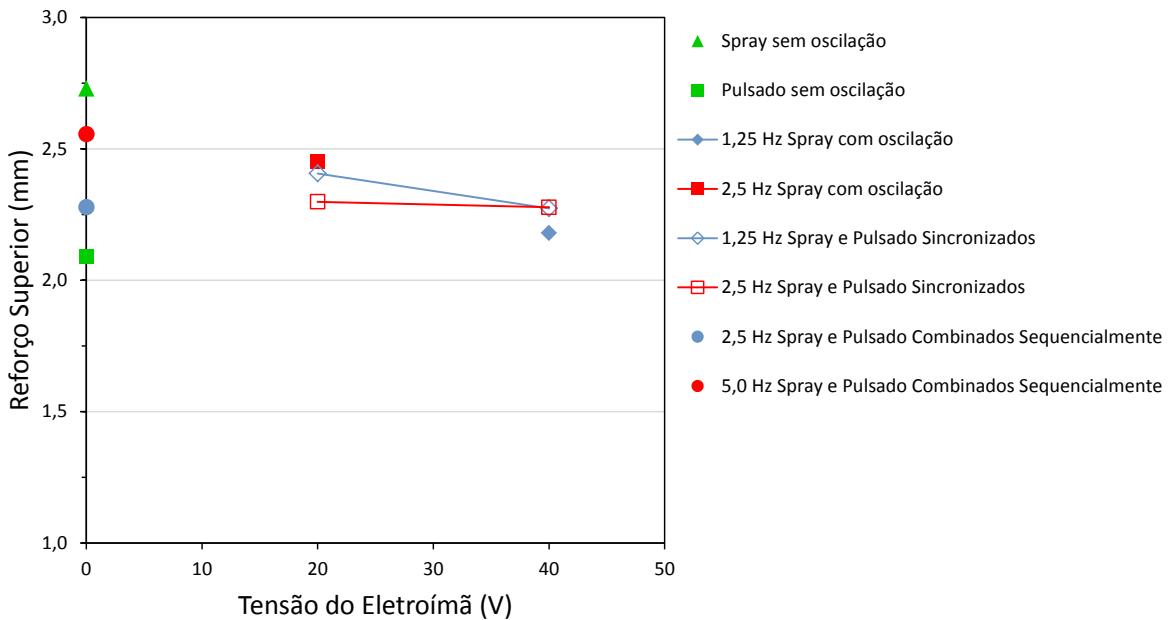


Figura 126. Reforço superior dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)

A Figura 127 mostra o comportamento da área fundida dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+). Como esperado, as maiores áreas fundidas ocorreram para as configurações com modo Spray sem e com oscilação e as menores com o uso do modo Pulsado sem oscilação. As áreas fundidas resultantes das configurações com sincronização e das configurações com modos combinados sequencialmente foram intermediárias e similares entre si, mas em geral ficando mais bem próximas à área obtida com o modo Pulsado sem oscilação. Para as configurações sincronizadas, o aumento da deflexão aumentou a área fundida no caso da oscilação em 1,25 Hz e provocou a redução da área fundida no caso da oscilação em 2,5 Hz. No caso da frequência de oscilação em 2,5 Hz, provavelmente a grande diminuição da penetração com o aumento da deflexão (vide Figura 124) foi preponderante para a definição deste efeito de redução da área fundida, já que a largura pouco variou com o aumento da deflexão (vide Figura 125). Já para o caso da frequência de oscilação de 1,25 Hz, provavelmente a área fundida aumentou com o aumento da deflexão devido à maior influência do aumento da

largura (vide Figura 125) que foi mais pronunciado do que a diminuição da penetração (vide Figura 124) com o aumento da deflexão.

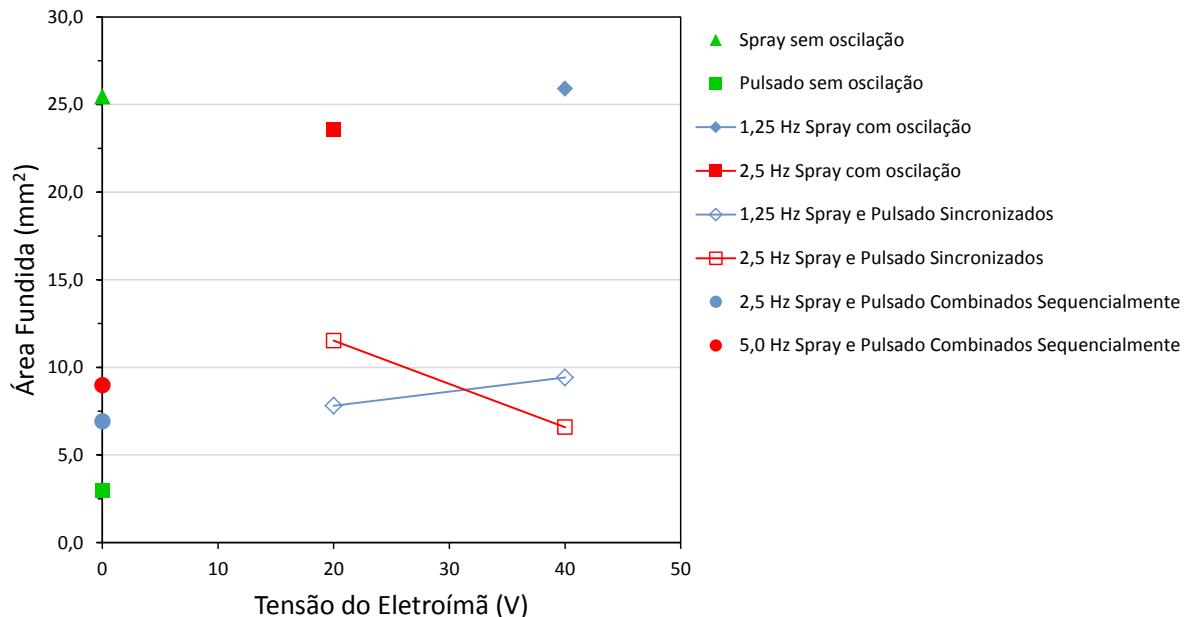


Figura 127. Área fundida dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)

A Figura 128 mostra o comportamento da diluição dos cordões com a mudança na tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+). Nota-se que a diluição tendeu a acompanhar o efeito visto na área fundida (vide Figura 127). A única diferença foi em relação à proximidade que os valores de diluição resultantes das configurações com sincronização e das configurações com modos combinados sequencialmente apresentaram em relação aos valores obtidos com as configurações com modo Spray sem e com oscilação. Desconsiderando-se a configuração com o modo pulsado sem oscilação, a menor diluição foi obtida com a configuração sincronizada com a maior deflexão (tensão do eletroímã em 40 V) e maior frequência de oscilação magnética (2,5 Hz).

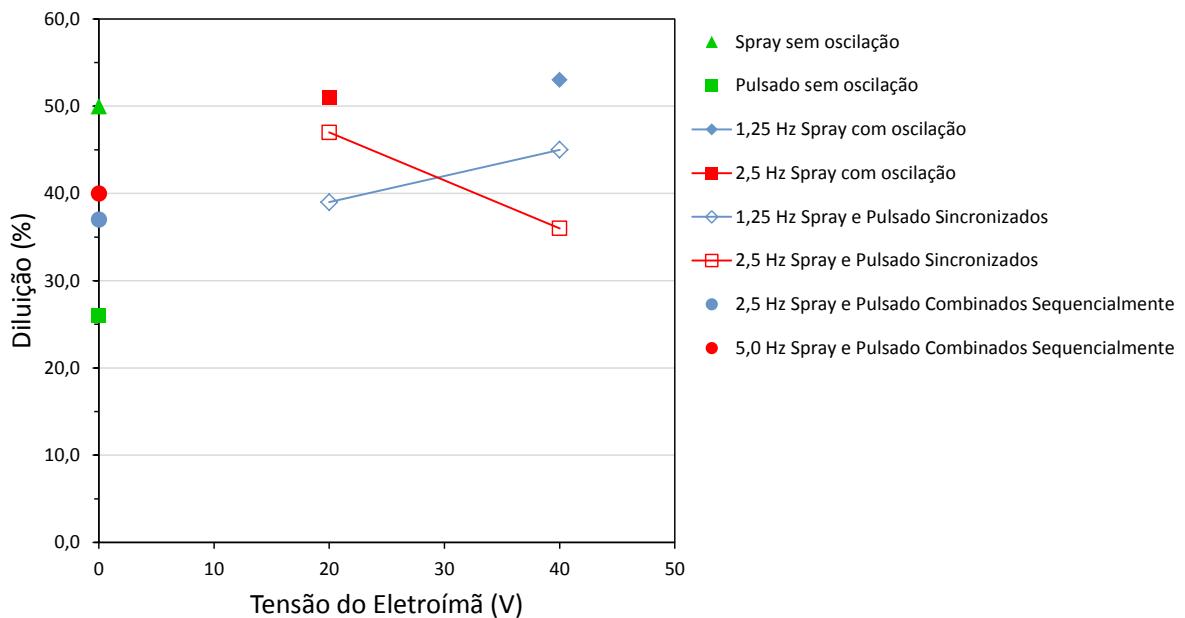


Figura 128. Diluição dos cordões *versus* tensão do eletroímã (deflexão) para diferentes configurações de uso dos modos Spray na polaridade positiva (CC+) e Pulsado na polaridade positiva (CC+)

Assim, com a sincronização da oscilação magnética do arco com o processo de soldagem MIG/MAG em modo Spray na polaridade positiva (CC+) e modo Pulsado na polaridade positiva (CC+) foi possível controlar a geometria do cordão/zona fundida formada. Neste caso, também foi possível diminuir a diluição dos cordões resultantes (apesar da taxa de deposição metálica não ter sido mantida constante), mas com pouca variação no reforço superior e ao mesmo tempo com aumento de largura e tendência de menor concentração da penetração no centro dos cordões.

6.5 Spray polaridade positiva (CC+) e corrente constante polaridade negativa (CC-) *versus* Spray polaridade positiva (CC+) e Pulsado polaridade positiva (CC+)

Em relação às duas combinações de oscilação magnética sincronizadas com diferentes modos operacionais da soldagem MIG/MAG avaliadas, pode-se dizer que a utilização do modo corrente constante polaridade negativa (CC-), ao invés do modo Pulsado polaridade positiva (CC+), na posição central do arco resultou em menores patamares de diluição e tendência de maiores penetrações nas laterais dos cordões formados. Em ambas as combinações sincronizadas, a largura dos cordões apresentou tendência de aumento com a elevação da tensão do eletroímã (nível de deflexão) aplicada ao modo Spray polaridade positiva (CC+) nas posições laterais do arco.

Acredita-se que tais combinações sincronizadas de oscilação magnética com modos operacionais MIG/MAG, principalmente com o modo corrente constante polaridade negativa (CC-) na posição central do arco, possam ser otimizadas (pelas amplitudes de deflexão magnética do arco e pelos níveis de corrente de soldagem e respectivos tempos de atuação em cada posição do arco) para levar à formação de depósitos (cordões de solda) de altura (reforço) e largura elevadas e de baixa diluição, algo bem propício à execução de revestimentos soldados. Outra possível aplicação seria na soldagem de juntas de partes de diferentes espessuras, na qual poderia se utilizar, por exemplo, um modo de soldagem MIG/MAG de maior energia sobre a parte mais espessa e um modo de menor energia sobre a parte de menor espessura.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

A seguir são listadas as conclusões acerca dos objetivos propostos de sincronizar a deflexão magnética com processos de soldagem a arco (modos operacionais e/ou níveis de correntes) e de avaliar a potencialidade desta técnica para controlar/modificar os resultados da soldagem, mais especificamente em termos de geometria externa e interna dos cordões produzidos.

- a) Em relação ao SISTEMA DE SINCRONIZAÇÃO
 - A partir da avaliação do sincronismo dos sinais de controle do eletroímã e dos sinais provenientes da fonte de soldagem (tensão do arco e corrente de soldagem) e através da análise do tempo de resposta do equipamento foi evidenciada a eficiência do sistema de sincronização desenvolvido.
- b) Em relação à CARACTERIZAÇÃO DA DEFLEXÃO DO ARCO
 - O modelo teórico proposto para a deflexão magnética do arco indicou o mesmo comportamento verificado nos experimentos realizados, mostrando que a deflexão é diretamente proporcional ao campo magnético, ao quadrado do comprimento do arco e inversamente proporcional à corrente de soldagem, inclusive em concordância com outros modelos encontrados na literatura;
 - Apesar de representar a tendência de comportamento real do fenômeno de deflexão do arco, o modelo teórico de deflexão não conseguiu estimar o valor da deflexão real.
- c) Em relação à OSCILAÇÃO MAGNÉTICA SINCRONIZADA COM O PROCESSO TIG
 - A configuração sincronizada resultou quase sempre em maiores valores de largura quando comparada à configuração de corrente constante com oscilação. Além disso, quanto maior foi a deflexão magnética utilizada, maior a largura total resultante, conforme esperado;
 - A análise dos parâmetros de largura para ambas as correntes médias de soldagem utilizadas indicou que os melhores resultados (maior controle da poça de fusão e da

formação do cordão de solda) foram obtidos com a oscilação magnética sincronizada aos níveis de corrente na frequência de 1 Hz;

- A largura do lado esquerdo, onde havia maior nível de corrente e tempo de permanência do arco, provavelmente influenciou mais o aumento da largura total, demonstrando que o sistema de oscilação magnética sincronizada foi capaz de controlar a formação do cordão (pelo menos em termos de largura na superfície da chapa) como desejado. Ou seja, a maior corrente e tempo de parada no lado esquerdo do cordão levaram ao aumento da largura esquerda, conduzindo ao aumento da largura total.
- d) Em relação à OSCILAÇÃO MAGNÉTICA SINCRONIZADA COM O PROCESSO MIG/MAG
- Para ambas as combinações de modos operacionais da soldagem MIG/MAG sincronizadas (modo CC- ou Pulsado CC+ no centro e modo Spray CC+ nas laterais esquerda e direita dos cordões), notou-se que a penetração tendeu a se concentrar no centro dos cordões para os ensaios com a deflexão menor (tensão do eletroímã de 20 V), enquanto que para uma deflexão maior (tensão do eletroímã de 40 V), observou-se a tendência do crescimento da penetração nas laterais. A tendência foi a largura aumentar com o aumento da tensão do eletroímã. O reforço tendeu a diminuir com o aumento da tensão do eletroímã, apresentando um comportamento oposto ao da largura, conforme esperado. Assim, foi possível controlar a geometria do cordão/zona fundida formada, com aumento de largura dos cordões e com tendência de maior concentração da penetração nas laterais;
 - A utilização do modo corrente constante polaridade negativa (CC-), ao invés do modo Pulsado polaridade positiva (CC+), na posição central do arco resultou em menores patamares de diluição e tendência de maiores penetrações nas laterais dos cordões formados.

CAPÍTULO VIII

TRABALHOS FUTUROS

Com objetivo de explorar melhor a ideia proposta neste trabalho, são listadas as seguintes sugestões para dar continuidade e contribuir para aprofundar o entendimento e ampliar as aplicações do método proposto:

- Adicionar ao sistema de oscilação sincronizada a possibilidade de defletir o arco com intensidades diferentes em cada posição (incluindo a central). Além disso, utilizar sistemas que permitam um nível maior de deflexão (tensão de alimentação do eletroímã);
- Adicionar ao sistema de oscilação sincronizada um ajuste de “*delay*” entre o sinal de oscilação e de disparo da fonte de soldagem, para permitir maior controlabilidade do sistema;
- Avaliar o sincronismo com o processo TIG e/ou MIG/MAG em aplicações como na soldagem de materiais dissimilares, em juntas com materiais de diferentes espessuras, em passes de raiz, em “*narrow gaps*”, na execução de revestimentos, visando refino de grão dos cordões de solda, na soldagem fora de posição, etc., sempre procurando direcionar mais ou menos calor/fusão de acordo com a posição do arco e necessidade;
- Realizar oscilação longitudinal (*switch back*) sincronizada com os processos TIG e MIG/MAG para verificar os efeitos, por exemplo, na geometria da zona fundida, velocidade máxima de soldagem e refino de grão;
- Filmar o processo MIG/MAG com a técnica de oscilação magnética sincronizada utilizando câmera de alta velocidade e sem a luz do arco para verificar o comportamento das gotas em transferência;
- Avaliar outras frequências de oscilação magnética sincronizada para explorar melhor seu efeito no controle da geometria dos cordões de solda resultantes.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AP AUTOMATION. **Magnetic Arc Control.** Disponível em: <<http://www.ap-automation.com/products/magnetic-arc-control/>>. Acesso em: 10 mai. 2009.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook.** 9th edition. Volume 2: Welding processes. Part 1. Miami, FL: AWS, 2004. 720 p.
- BLUNT, F. J.; RIBTON, C. N. **Design of Electromagnets for arc oscillation in surfacing applications for MIG and TIG processes.** 2000.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos.** 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- BRACARENSE et al. **A Soldagem Gmaw (ou Mig-Mag).** Disponível em: <<http://www.abs-soldagem.org.br/centraladm/docs/revistas/Ensino.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2014
- BRACARENSE, A. Q.; SOARES, L. F. **Uso de Oscilação Magnética do Arco Elétrico para Preenchimento de Passe de Raiz em Juntas Chanfradas de Aços Baixo Carbono Através do Processo GMAW.** In: VI CONEM, Ago/2010, Campina Grande, PB, Brasil.
- CHEN, X. Q.; SMITH, J. S.; LUCAS, J.. Microcomputer controlled arc oscillator for automated TIG welding. **Journal Of Microcomputer Applications.** Liverpool, Uk, p. 347-360. 1990.
- DUTRA et al. Improving Surfacing Performance with GMAW: A method of synchronizing polarity is used for applications that require minimal dilution. **Welding Journal.** v. 92, n. 5, p. 42-47, May, 2013.
- ENAPATI, 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).** v. 10, n. 6, p. 297-303. abr. 2014.

ESAB. **Processo de Soldagem - TIG (GTAW).** Disponível em: <http://www.esab.com.br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm>. Acesso em: 22 nov. 2014.

FASCHING, A. A.; EDWARDS, G. R.; DAVID, S. A.. Grain refinement and hydrogen embrittlement in iron aluminide alloy FA129. **Science And Technology Of Welding And Joining.** v. 2, n. 4, p.167-173, jan. 1997.

GREENE, W. J. **Magnetic oscilation of wedling arc.** US Patent 2,920,183, New York, 1960.

HANGIL. **Magnetic Arc Oscillator.** Disponível em:

<<http://www.autowelding.com/eproduct29.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2012.

HOULDCROFT, P.; JOHN, R. **Welding and Cutting.** 1. ed. Cambridge: Woodhead-Faulkner Limited, 1988. 232p.

IMC. **Manual de Instruções: DIGIPlus A7 - A fonte de Soldagem Multiprocesso a Arco Inteligente devido a seu processador ARM de 32 bits.** 5. Ed. Palhoça, SC, Brasil, 2012.

JETLINE ENGINEERING. **Magnetic Arc Control Systems.** Disponível em: <<http://www.jetline.com/product.aspx?i=14523&c=31&pp=8&sb=0&p=0>>. Acesso em: 15 abr. 2012.

JOHNSON, P. W. **Lectures in Plasma Physics, Chicago, Illinois.** Disponível em: <<http://mypages.iit.edu/~johnsonpo/>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

KANG, Y. H.; NA S. J. A Study on the Modeling of Magnetic Arc Deflection and Dynamic Analysis. **Welding Journal.** January, 2002.

KANG, Y. H.; NA S. J. Characteristics of Welding and Arc Signal in Narrow Groove Gas Metal Arc Welding Using Electromagnetic Arc Oscillation: Experiments produce optimum parameters for obtaining uniform and sufficient groove face penetration. **Welding Journal.** p. 93-S-99-S, May, 2003.

KOVALENKO et al. **Aplicação e Avaliação de Novas Técnicas de Revestimentos por Soldagem MIG/MAG: Implementation and Evaluation of New Coating Techniques by MIG/MAG Welding.** In: XXXIX CONSOLDA, Nov/2013, Curitiba, PR, Brasil.

KUMAR, A.; SHAILESH, P.; SUNDARRAJAN, S.. Optimization of magnetic arc oscillation process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments. **Materials And Design.** p. 1094-1913. 2008.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1986. 340p.

LIM, Y. C. et al. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement: Part 1 – Autogenous nickel alloy welds. **Science And Technology Of Welding And Joining**. v. 15, n. 7, p. 583-589. 2010a.

LIM, Y. C. et al. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement: Part 2 – Nickel alloy weld overlays. **Science And Technology Of Welding And Joining**. v. 15, n. 5, p.400-406, 2010b.

MARQUES, P. V. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema para soldagem TIG mecanizada**. 1984. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MELLO, A. H. **We have a welder shortage, Houston Chronicle**. Disponível em: <<http://www.chron.com/jobs/article/Houston-we-have-a-welder-shortage-4851720.php>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

MILLER. **Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)**. Illinois, 2013.

NASCIMENTO, L. A. **Avaliação dos Processos GMAW com Transferência por Curto Circuito Convencional e Controlado (STT) Aplicados na Soldagem Circunferencial Mecanizada**. 2015. 311 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Sheet NI USB-6008, NI USB-6009**. Disponível em: <<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>>. Acesso em: 15 dez. 2014.

REIS, R. P. **Assessment of low current tandem GMAW processes with waveform control and with aid of laser beam**. 13/Nov/2009. p10. p11. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

REIS, R. P.; SCOTTI, A.; NORRISH, J.; CUIURI, D. Investigation on Welding Arc Interruptions in the Presence of Magnetic Fields: Welding Current Influence. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 40, p. 870-876, 2012.

REIS, R. P.; SCOTTI, A.; NORRISH, J.; CUIURI, D. Investigation on Welding Arc Interruptions in the Presence of Magnetic Fields: Arc Length, Torch Angle and Current Pulsing Frequency Influence. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 41, p. 133-139, 2013.

REIS, R. P.; SOUZA, D.; SCOTTI, A. Models to Describe Plasma Jet, Arc Trajectory and Arc Blow Formation in Arc Welding. **Welding in the World**, v. 55, p. 24-32, 2011.

REIS, R. P., **Assessment of Low Current Tandem MIG/MAG Processes with Waveform Control and with Aid of Laser Beam**, 2009.

RICHARDSON, I. M. **Introduction to Arc Physics**. M.Sc. course hand-out, Cranfield Institute of Technology, SIMS, 1989.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG melhor entendimento, melhor desempenho**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008. 284 p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. **Journal Of Materials Processing Technology**, p.1406-1413, 2012.

SMITH, C. **How the welder shortage affects the infrastructure, THE FABRICATOR**. Disponível em <<http://www.thefabricator.com/article/testingmeasuring/how-the-welder-shortage-affects-the-infrastructure>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

SUNDARESAN, S.; RAM, G. D. J. Use of magnetic arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in α - β titanium alloys. **Science And Technology Of Welding And Joining**, v. 4, n. 3, p.151-160, 1999.

TEXAS INSTRUMENTS. **Data Sheet L293, L293D – QUADRUPLE HALF-H DRIVERS**. Dallas, 2014.

UEYAMA et al. Occurrence of arc interference and interruption in tandem pulsed GMAW – study of arc stability in tandem pulsed GMAW (Report 1), **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, 23 (4), p. 515-525, 2005.

UEYAMA T.; OHNAWA, T; TANAKA M.; NAKATA, K. Occurrence of arc interaction in tandem pulsed gas metal arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 6, p. 523-529, 2007.

VILARINHO, L. O. **Engenharia de soldagem: Soldagem TIG**. 2013. 40 p. Notas de Aula.

VILARINHO, L. O. Modos Fundamentais de Transferência Metálica: Naturais e Controlados. **Revista da Soldagem**. 2007.

APÊNDICE I

Oscilogramas resultantes da soldagem TIG

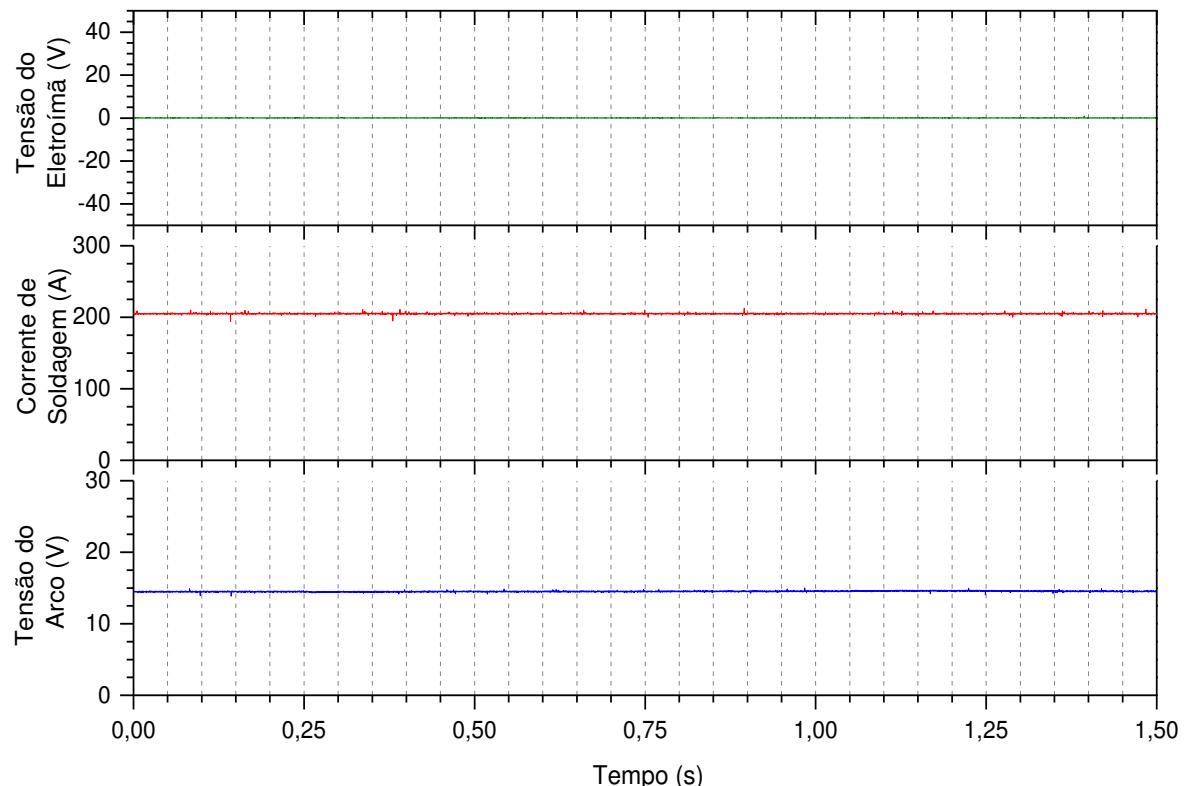


Figura 1.1. Oscilograma referente ao ensaio 1 - processo TIG com corrente constante e sem oscilação magnética

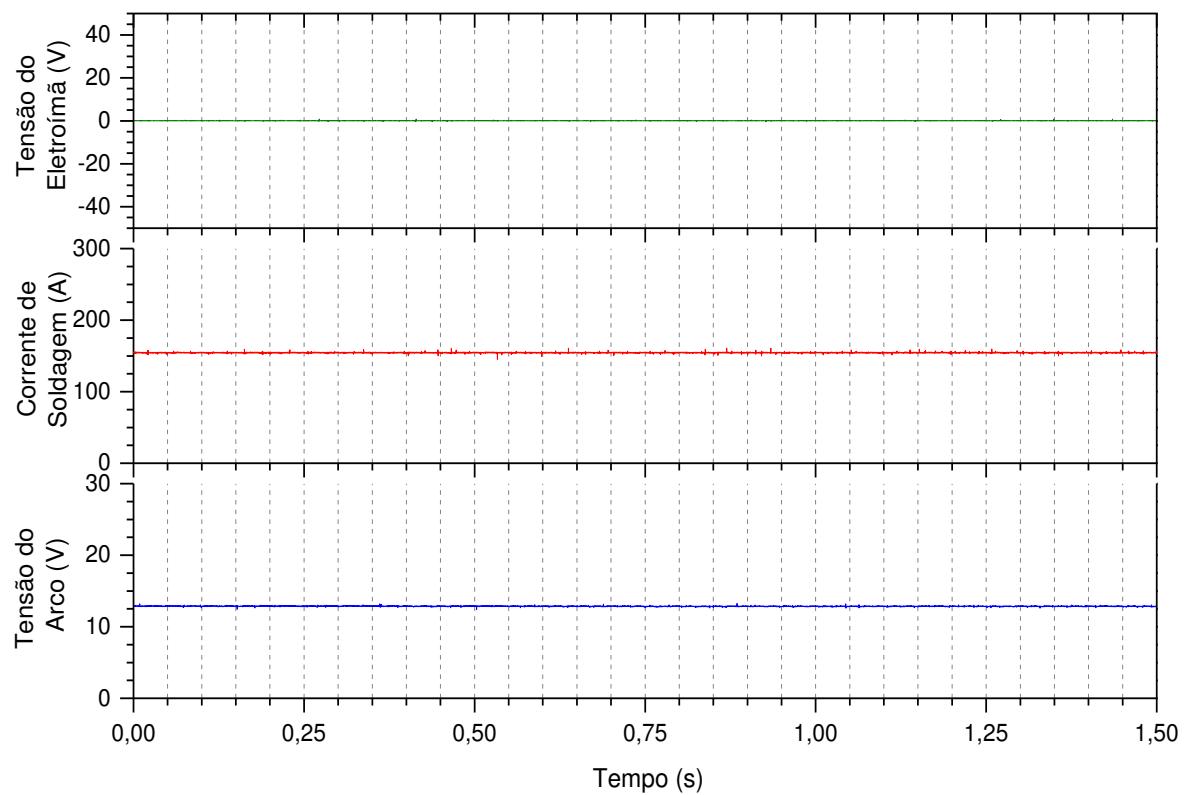


Figura 1.2. Oscilograma referente ao ensaio 2 - processo TIG com corrente constante e sem oscilação magnética

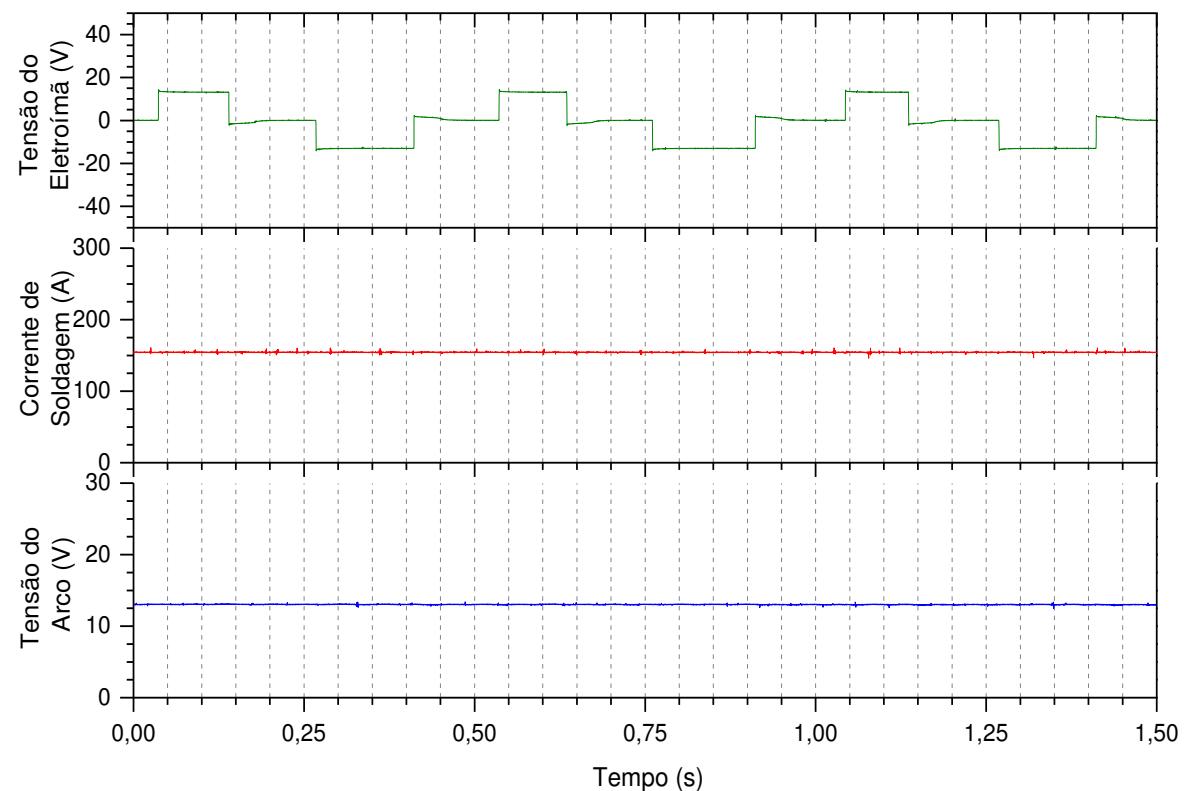


Figura 1.3. Oscilograma referente ao ensaio 4 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética

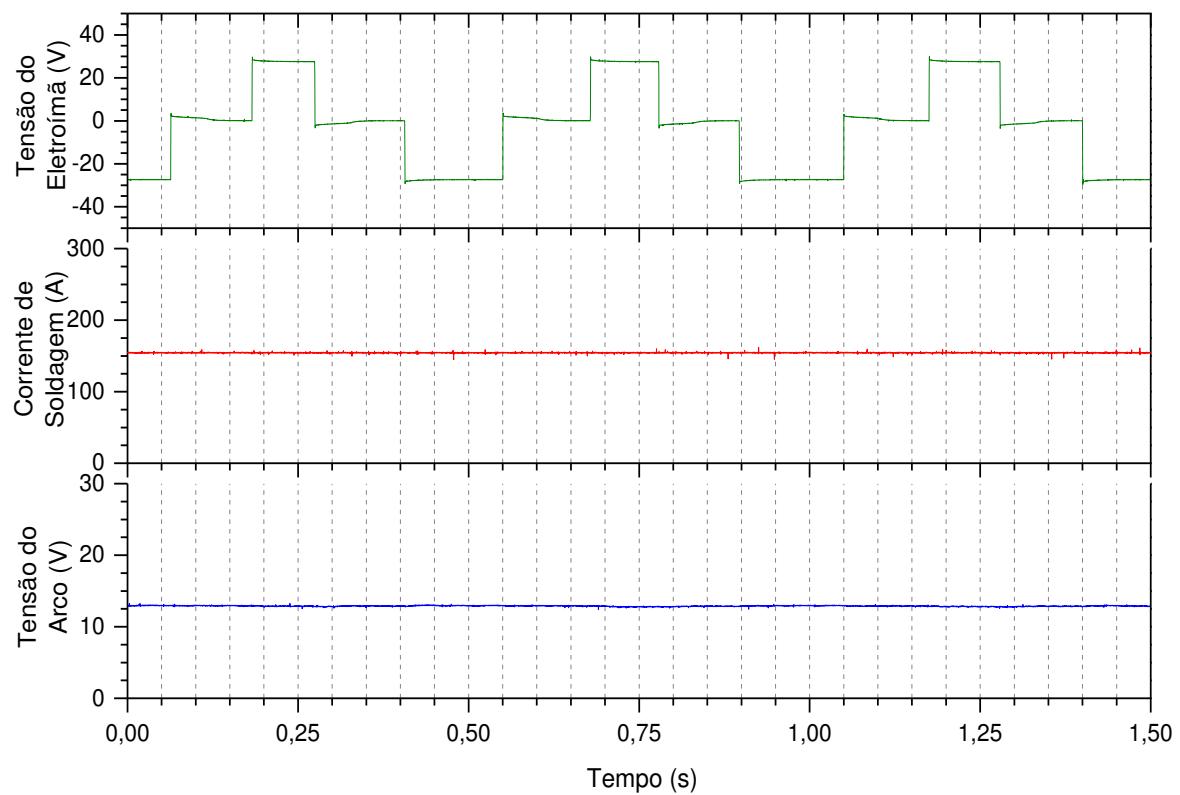


Figura 1.4. Oscilograma referente ao ensaio 5 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética

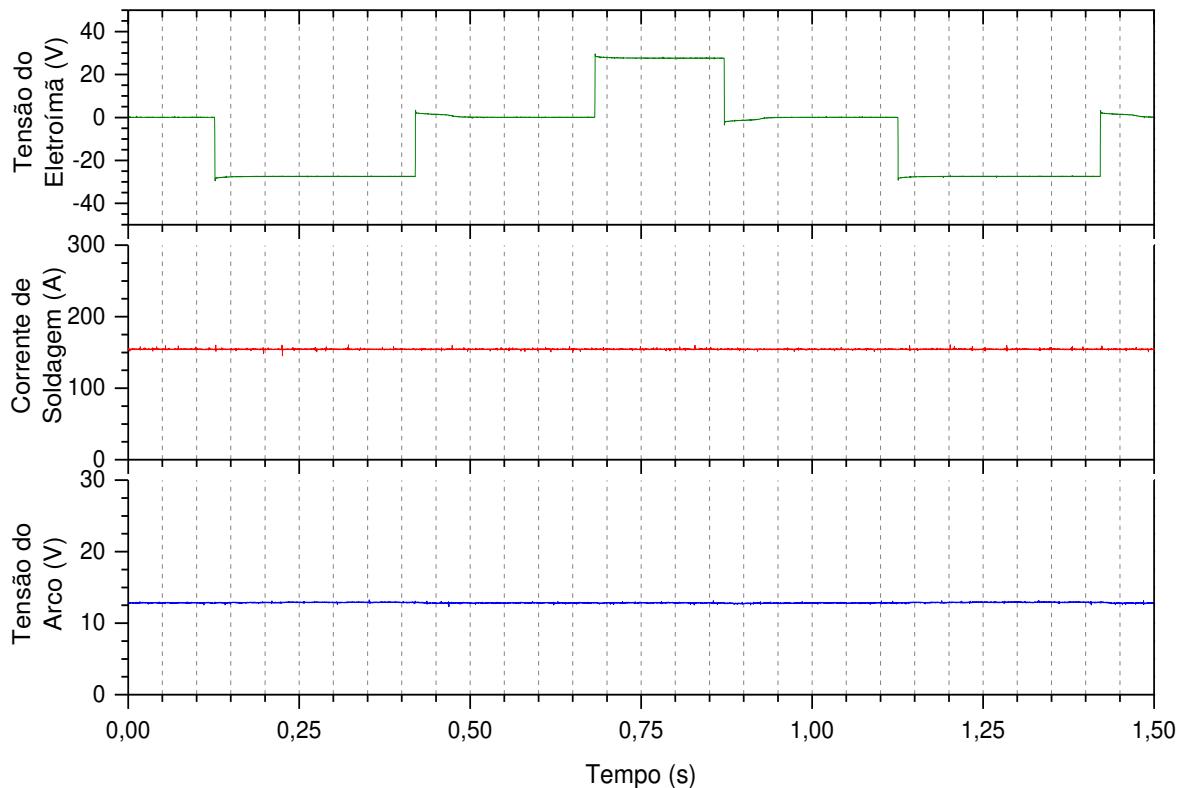


Figura 1.5. Oscilograma referente ao ensaio 6 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética

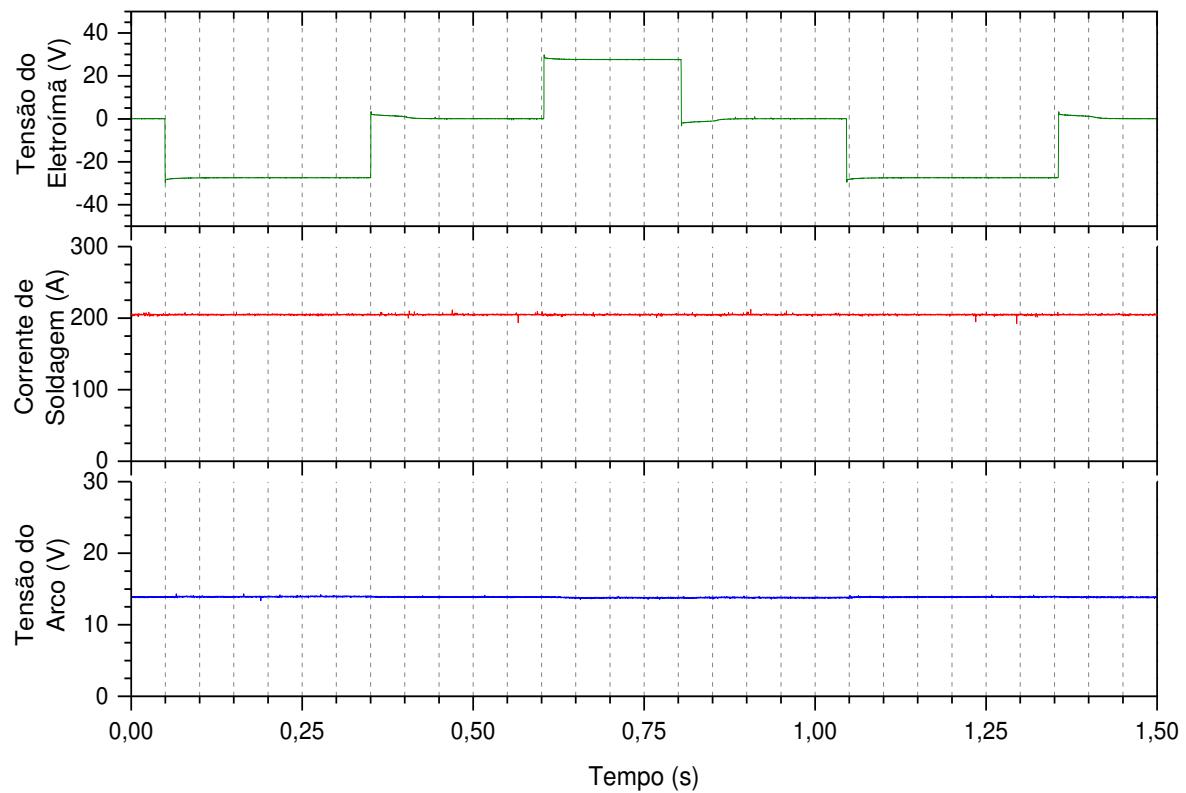


Figura 1.6. Oscilograma referente ao ensaio 7 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética

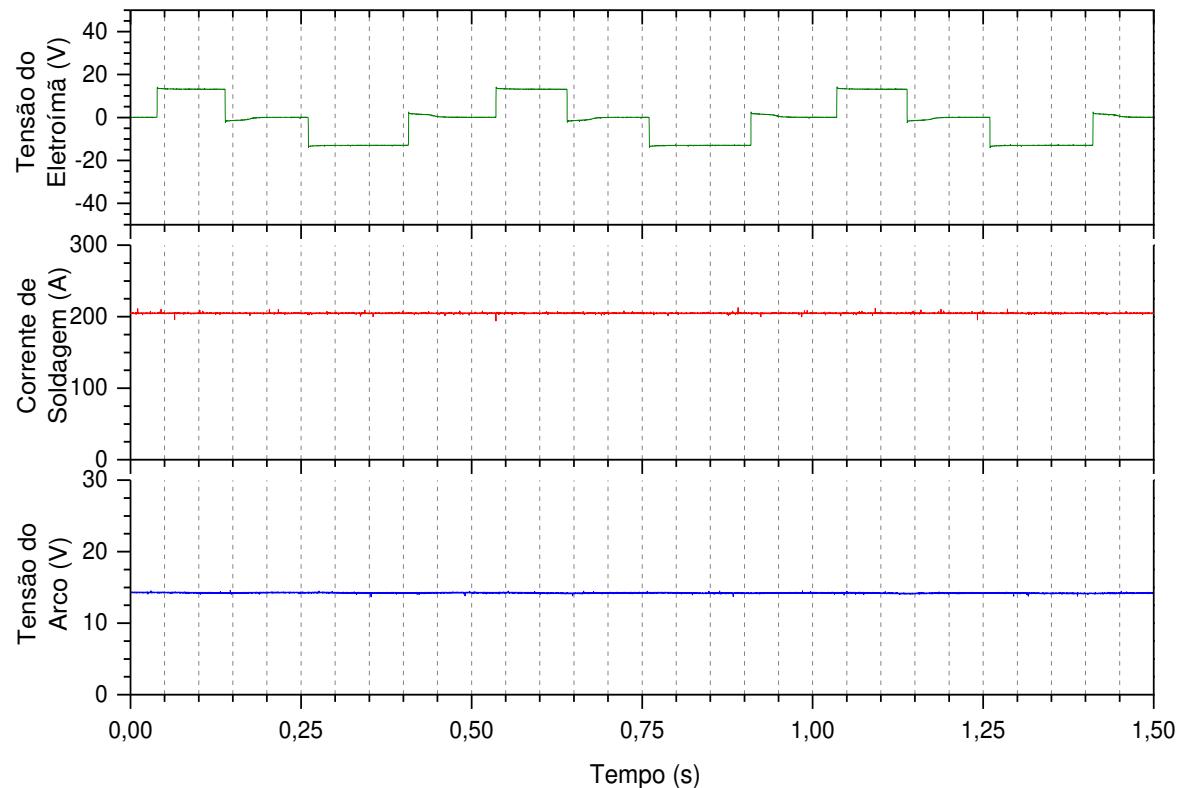


Figura 1.7. Oscilograma referente ao ensaio 9 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética

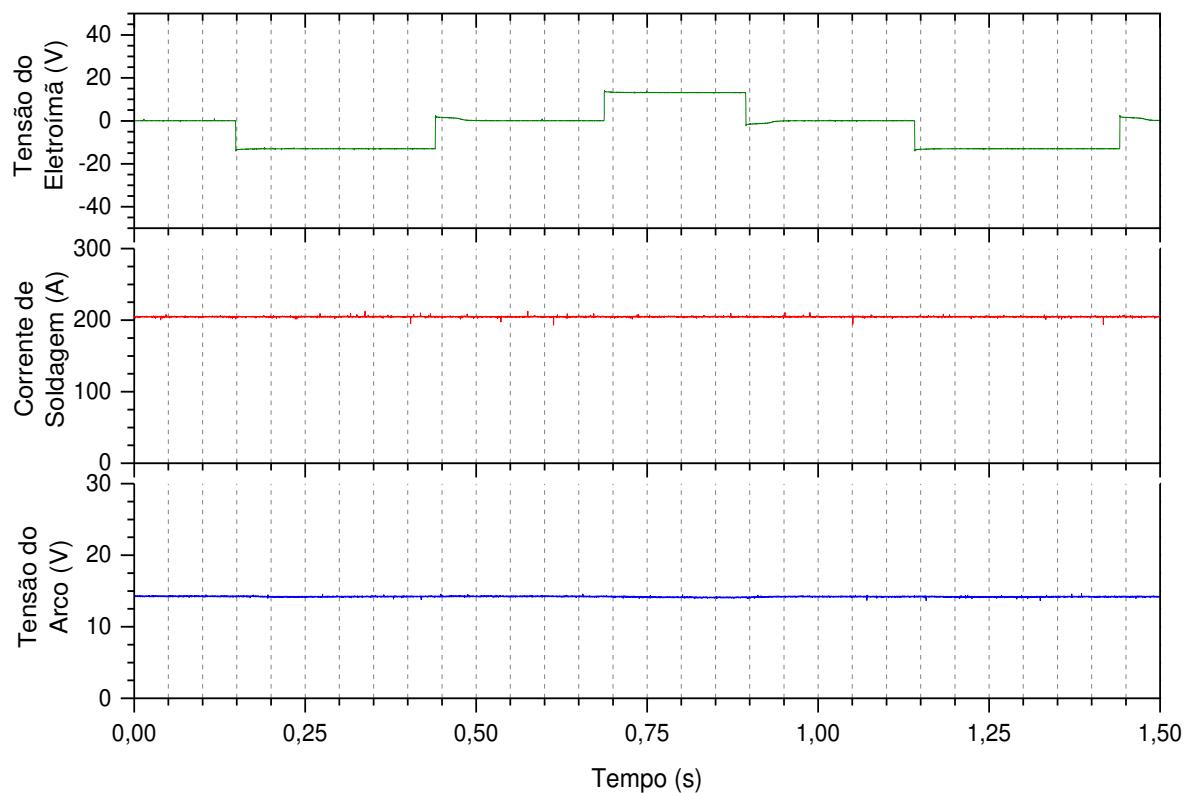


Figura 1.8. Oscilograma referente ao ensaio 10 - processo TIG com corrente constante e com oscilação magnética

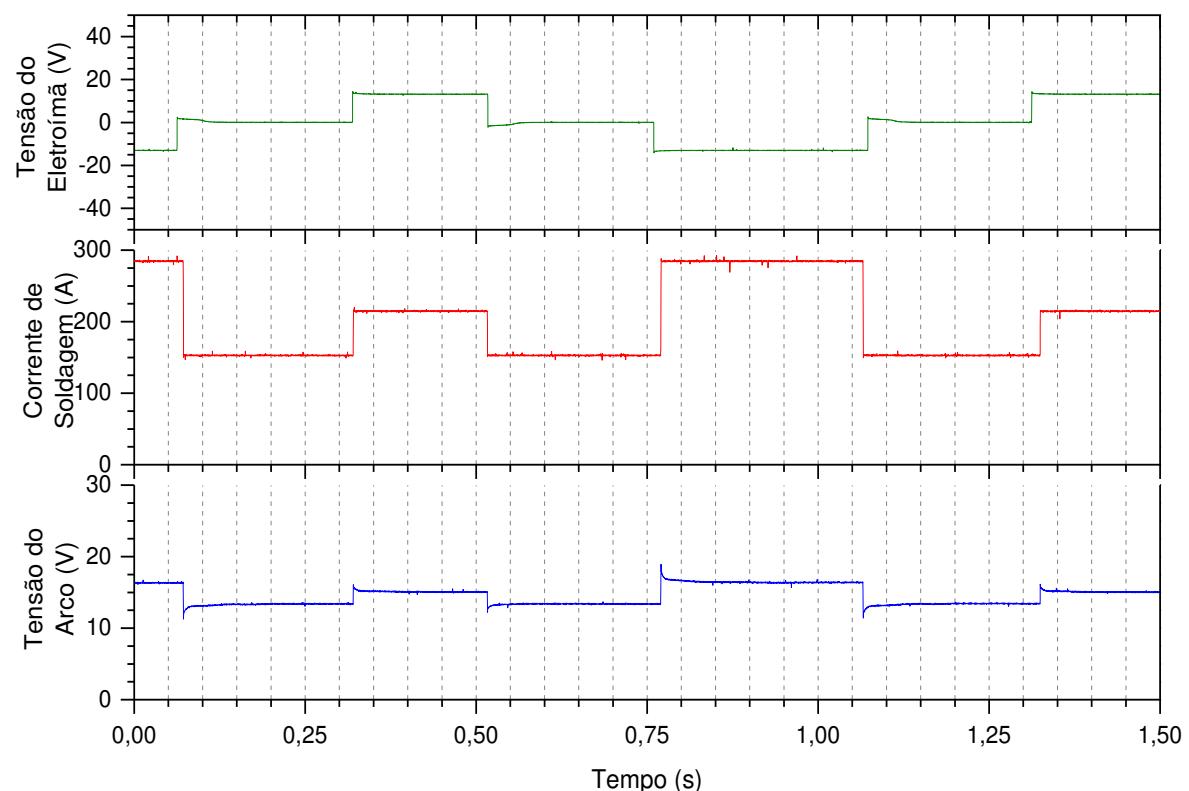


Figura 1.9. Oscilograma referente ao ensaio 11 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem

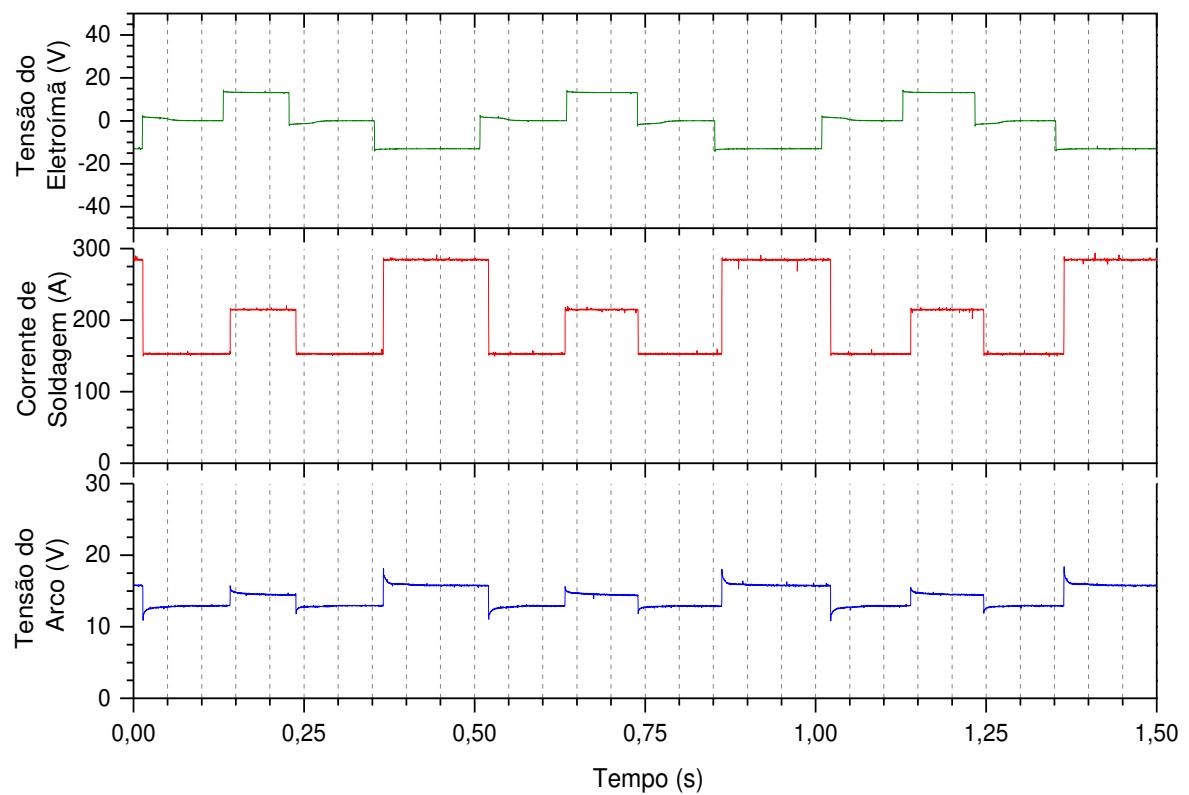


Figura 1.10. Oscilograma referente ao ensaio 12 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem

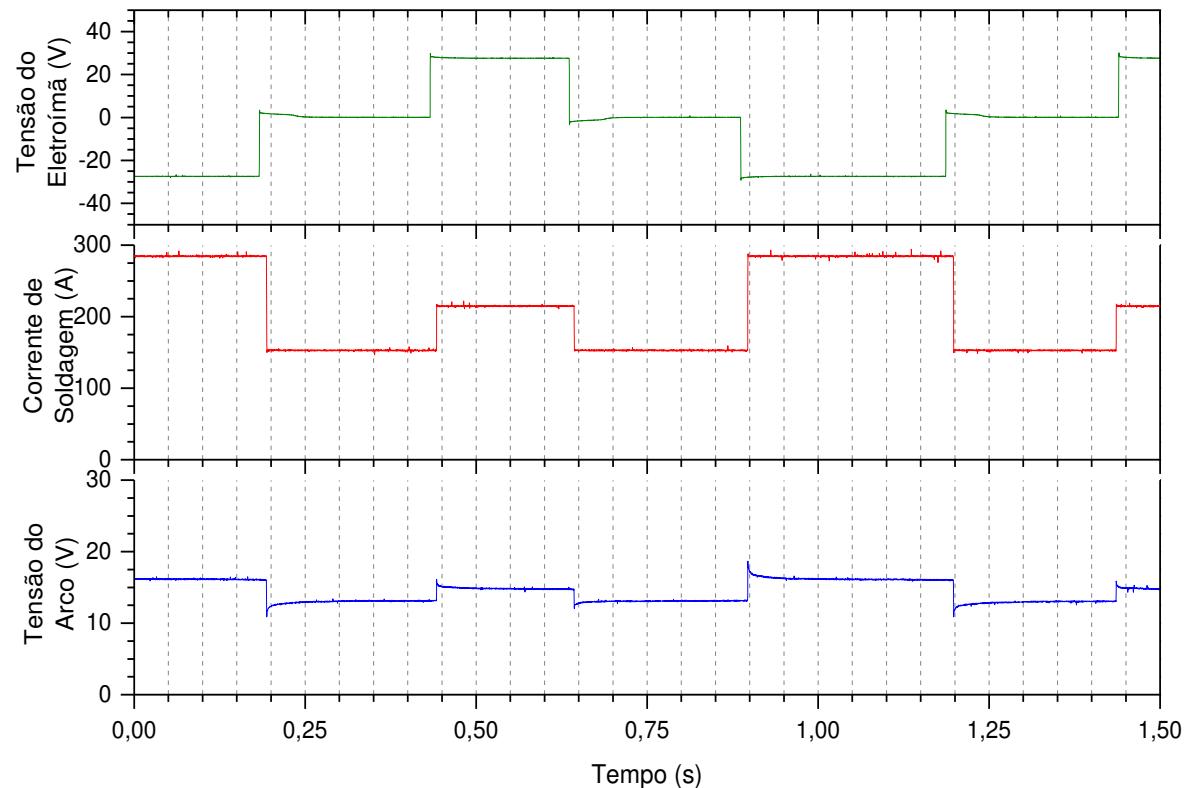


Figura 1.11. Oscilograma referente ao ensaio 14 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem

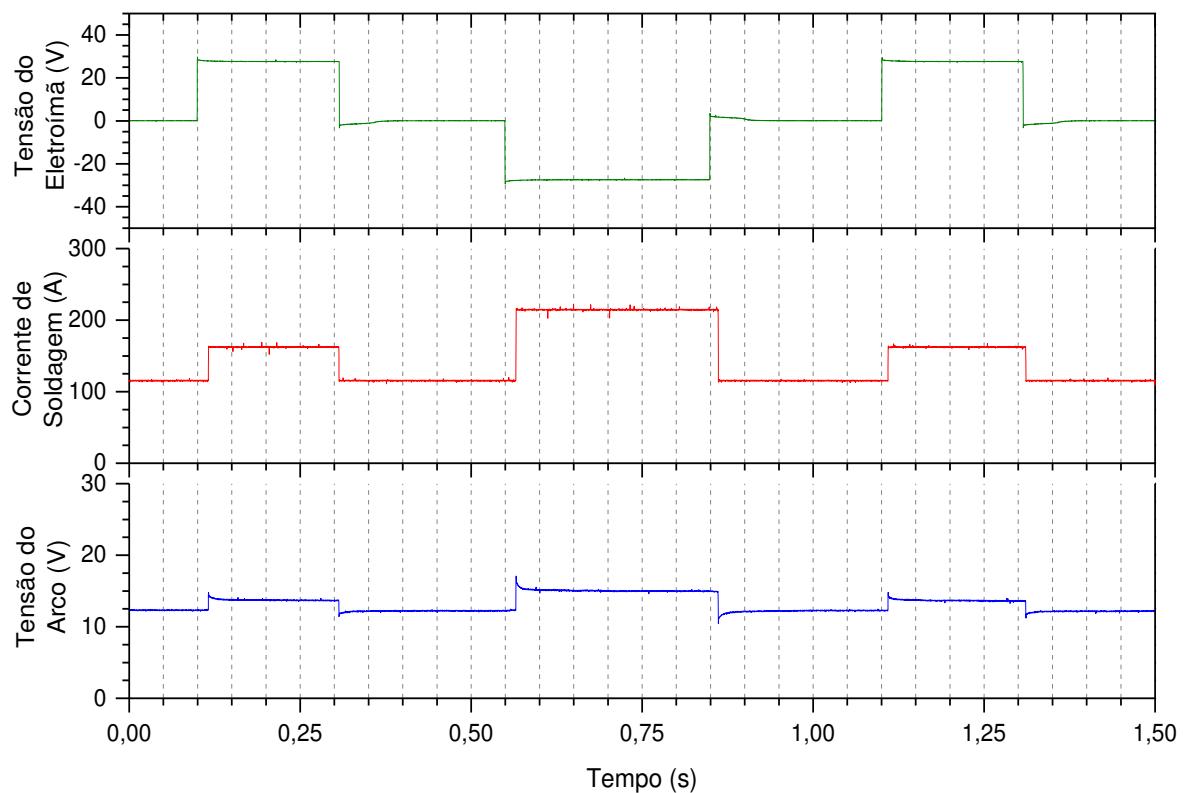


Figura 1.12. Oscilograma referente ao ensaio 15 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem

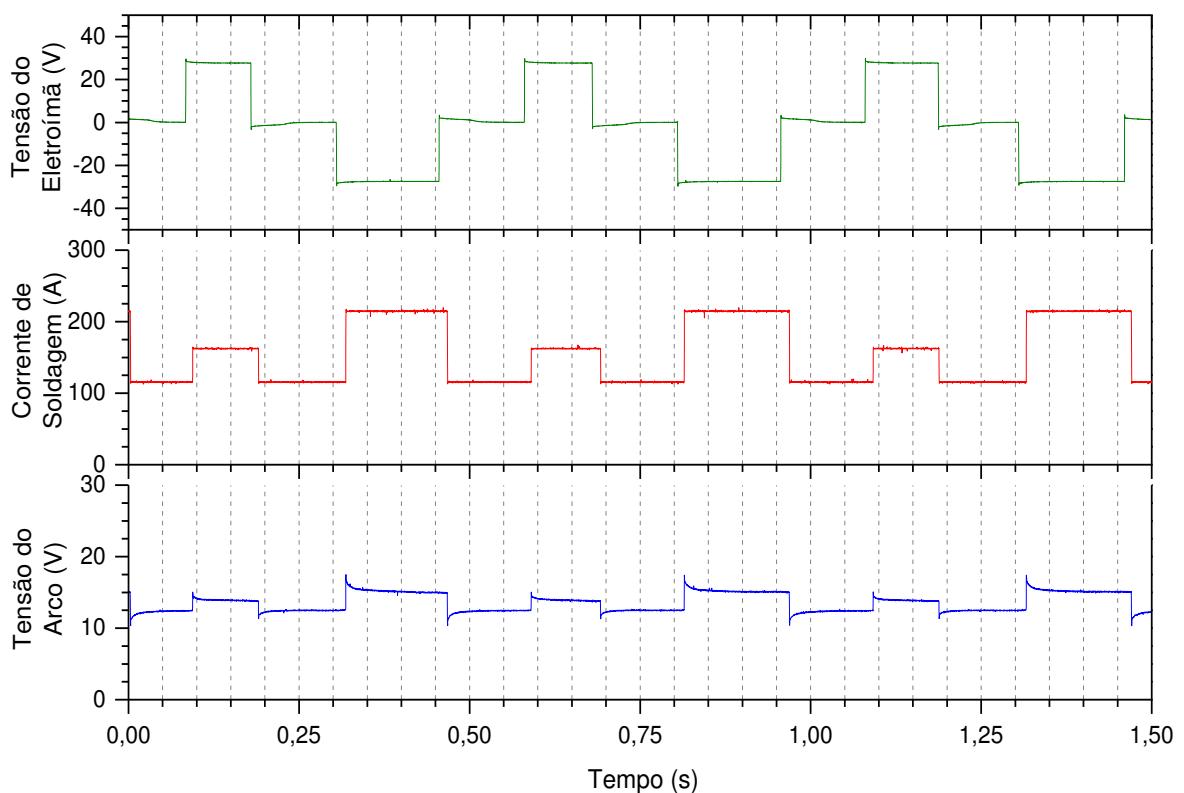


Figura 1.13. Oscilograma referente ao ensaio 16 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem

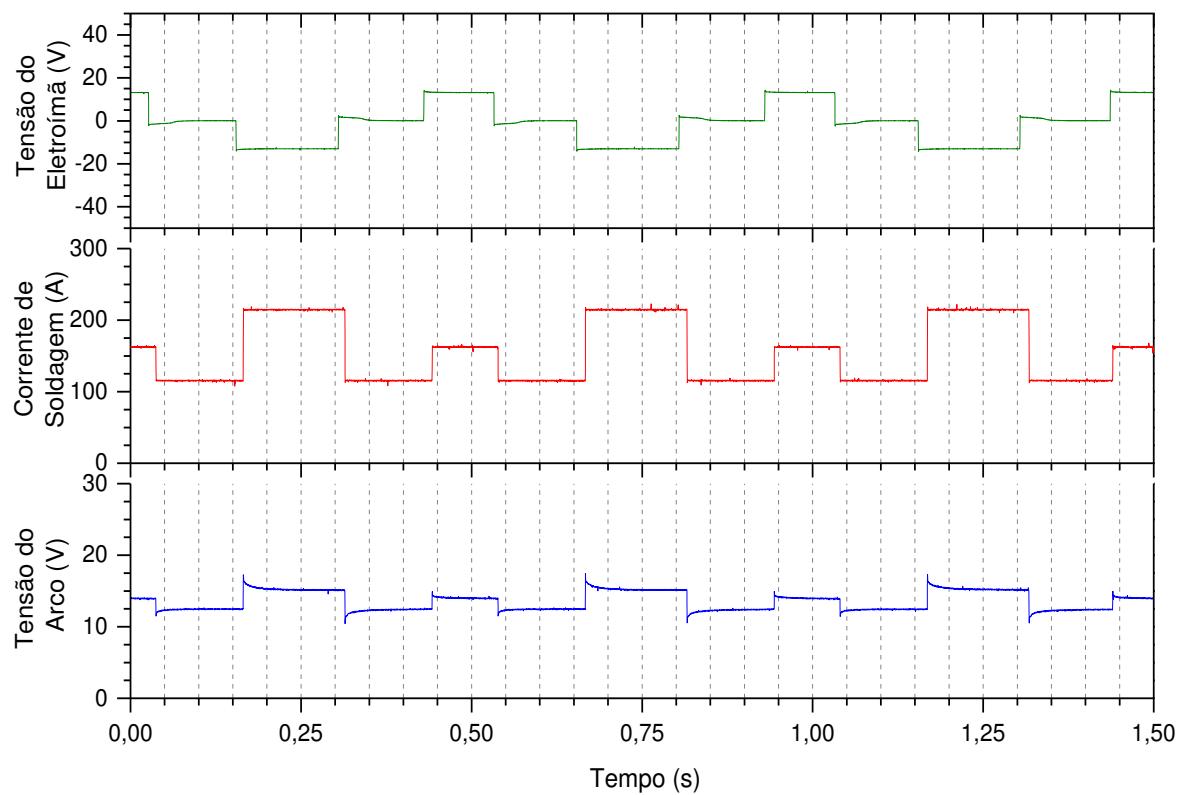


Figura 1.14. Oscilograma referente ao ensaio 17 - processo TIG com sincronização entre oscilação magnética e corrente de soldagem

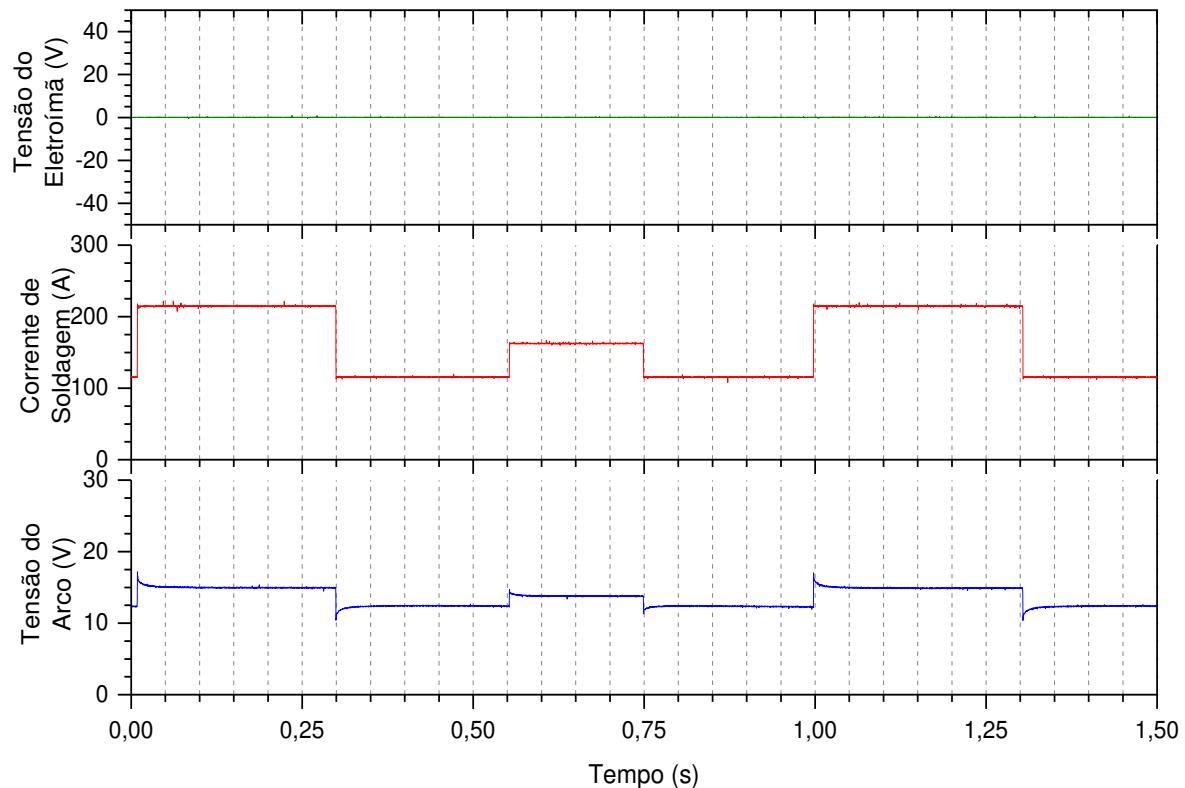


Figura 1.15. Oscilograma referente ao ensaio 19 - processo TIG com modo de soldagem “pulsado” e sem oscilação magnética

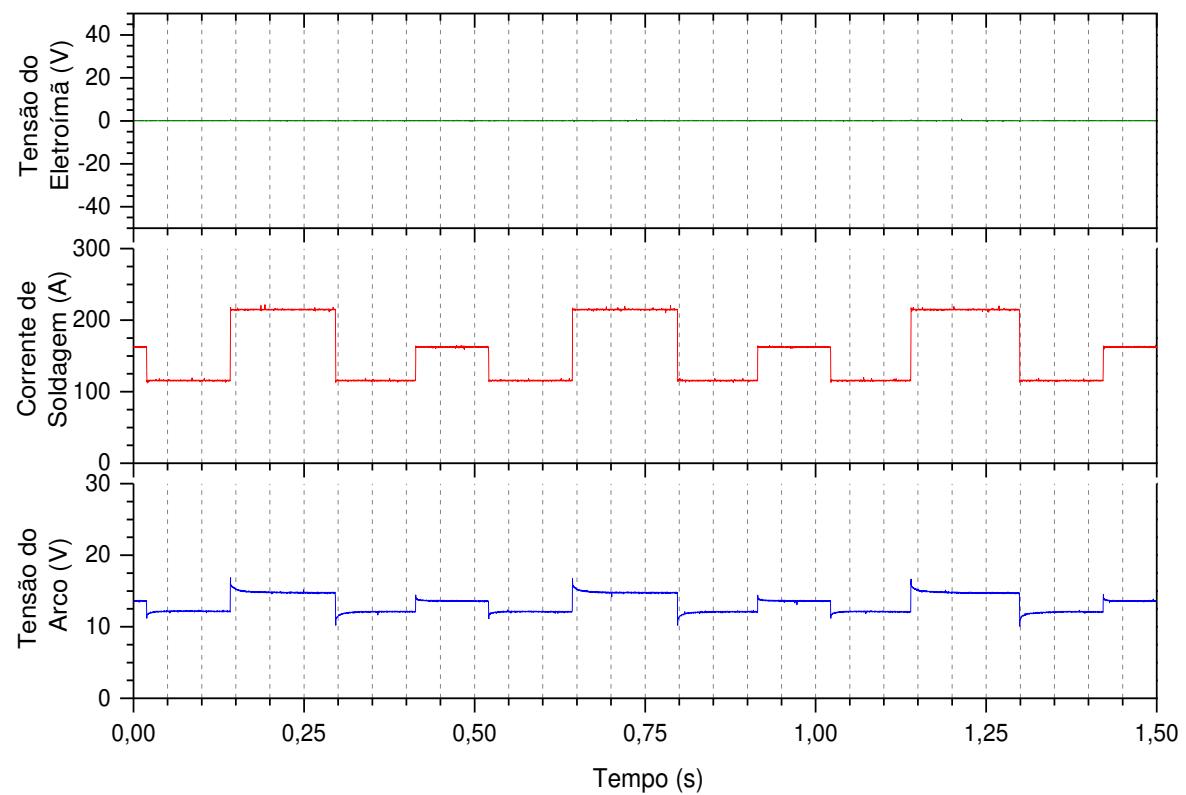


Figura 1.16. Oscilograma referente ao ensaio 20 - processo TIG com modo de soldagem “pulsado” e sem oscilação magnética

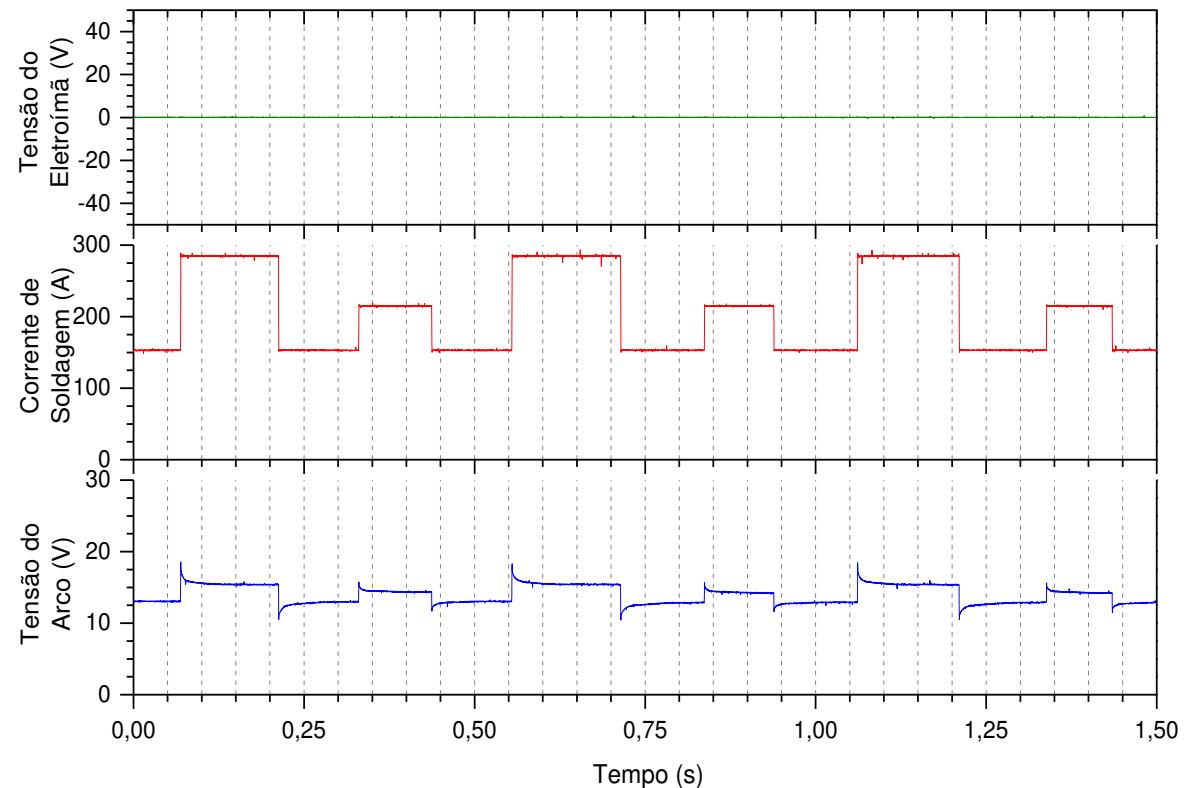


Figura 1.17. Oscilograma referente ao ensaio 21 - processo TIG com modo de soldagem “pulsado” e sem oscilação magnética

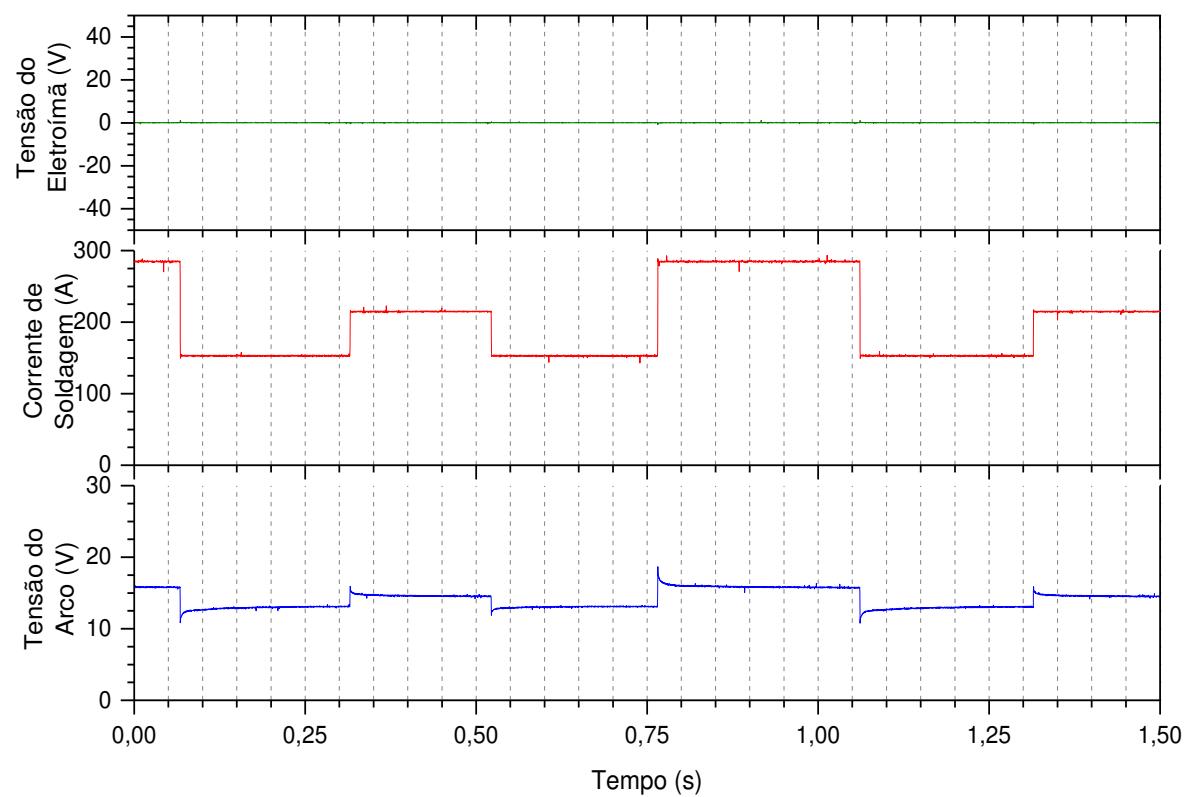
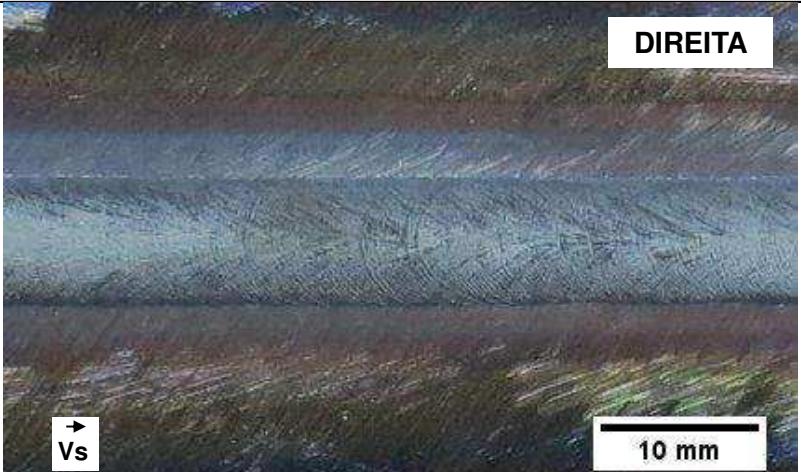
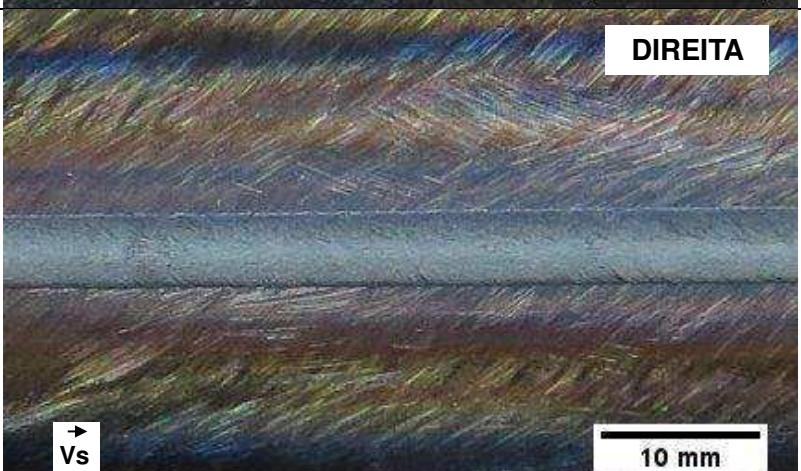
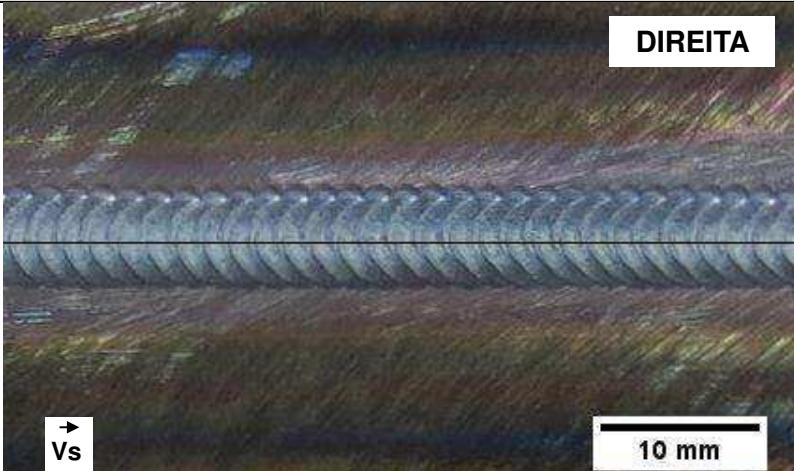
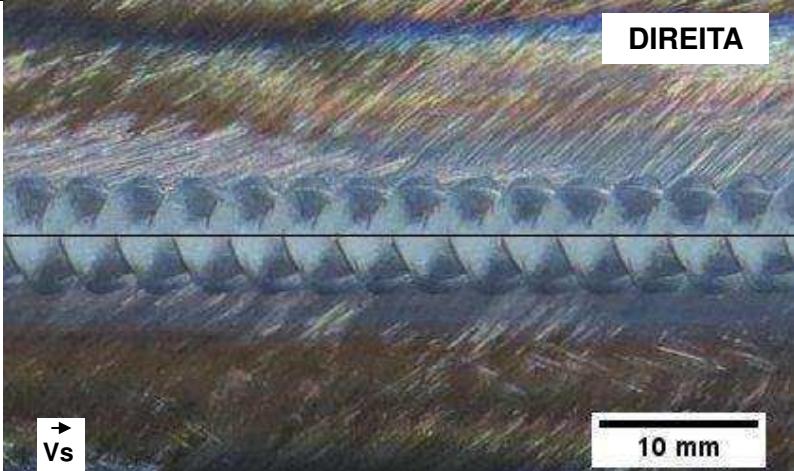
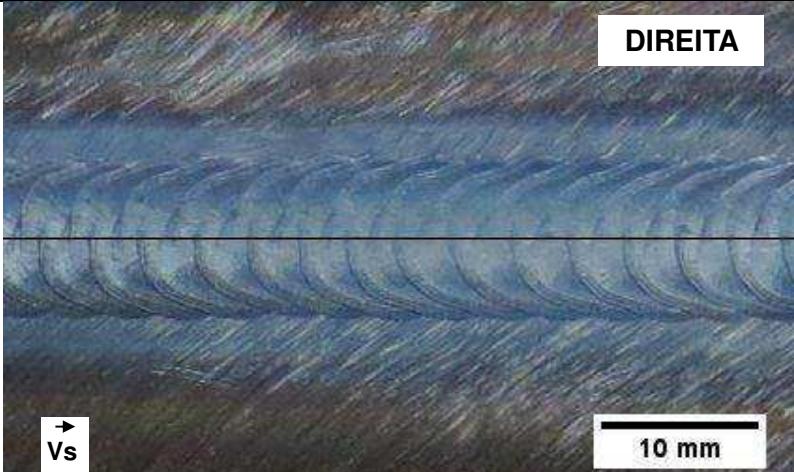


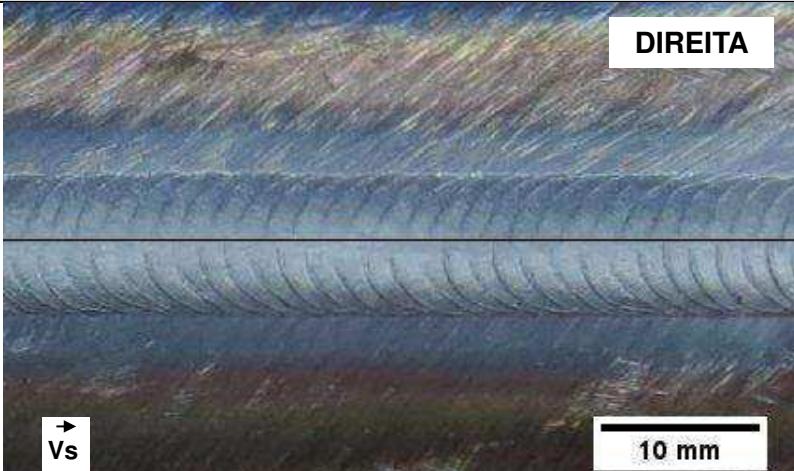
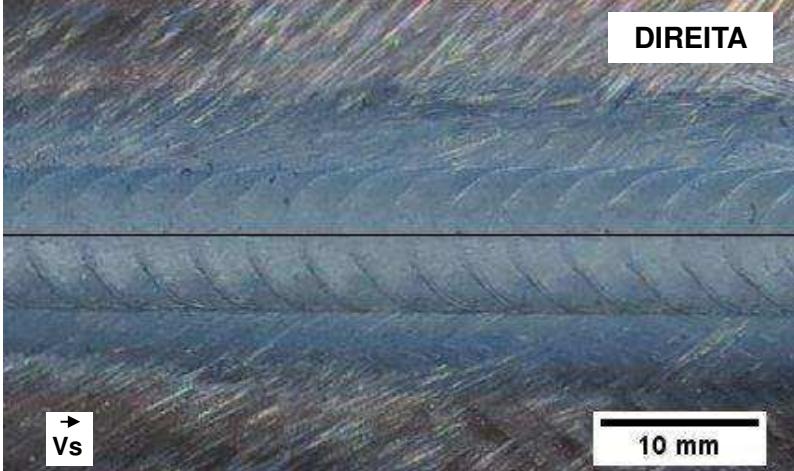
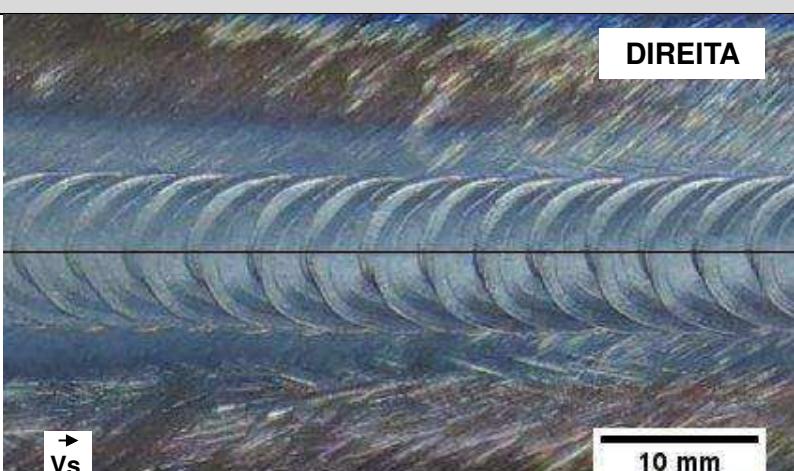
Figura 1.18. Oscilograma referente ao ensaio 22 - processo TIG com modo de soldagem “pulsado” e sem oscilação magnética

APÊNDICE II

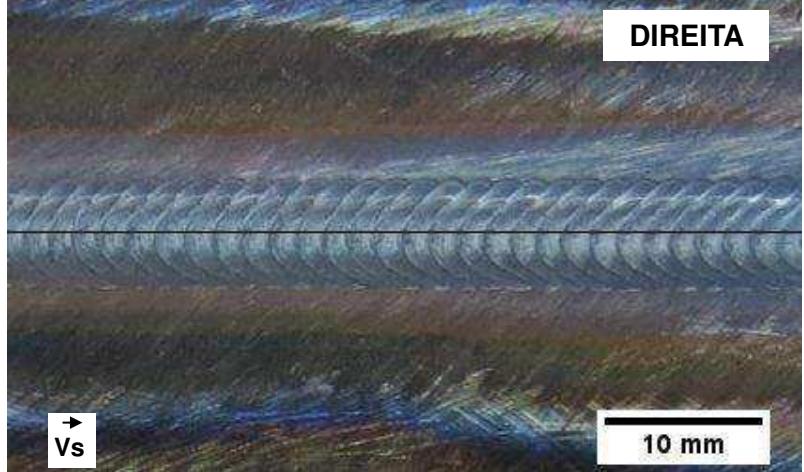
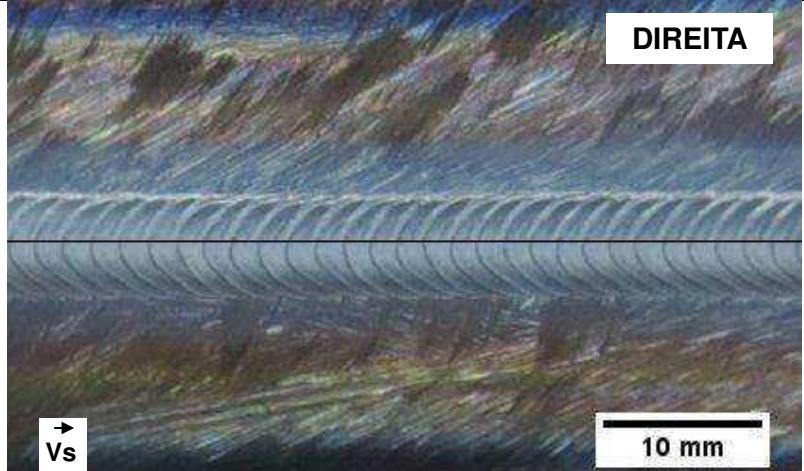
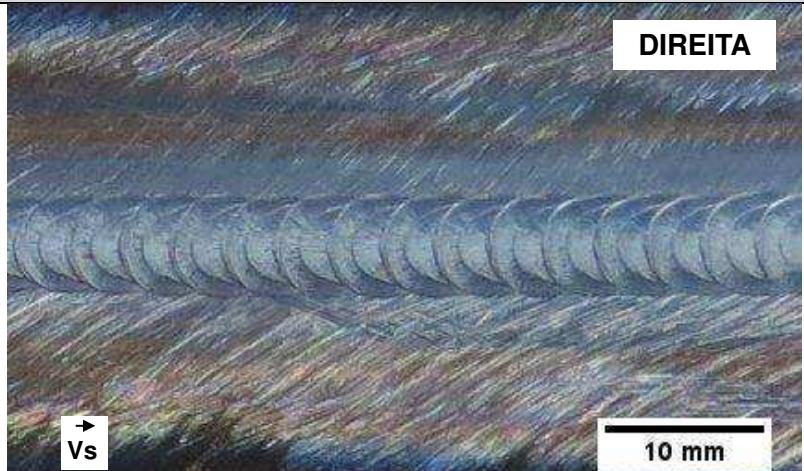
Imagens dos cordões da soldagem TIG

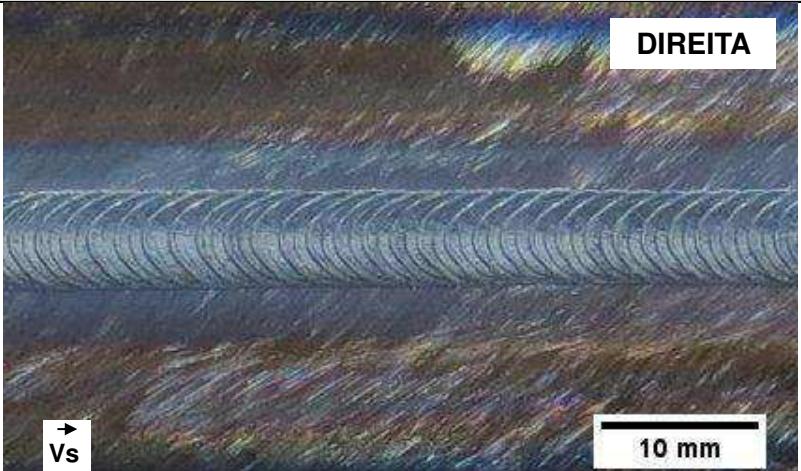
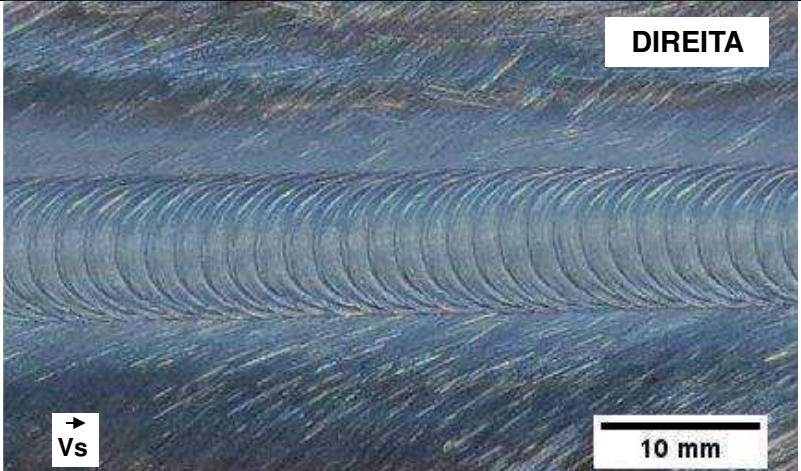
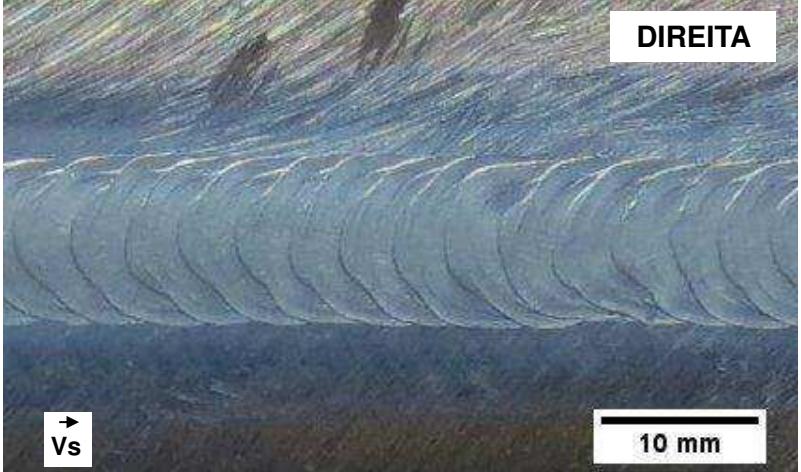
Ensaio	Imagen
CONFIGURAÇÃO COM CORRENTE CONSTANTE E SEM OSCILAÇÃO DO ARCO	
1 $I = 200 \text{ A}$	 <p>DIREITA</p> <p>→ Vs</p> <p>10 mm</p>
2 $I = 150 \text{ A}$	 <p>DIREITA</p> <p>→ Vs</p> <p>10 mm</p>
CONFIGURAÇÃO COM CORRENTE CONSTANTE E COM OSCILAÇÃO MAGNÉTICA	
4 $I = 150 \text{ A}$ $U_e = 15 \text{ V}$ $F = 2 \text{ Hz}$	 <p>DIREITA</p> <p>→ Vs</p> <p>10 mm</p>

Ensaio	Imagen
5 I = 150 A Ue = 30 V F = 2 Hz	
6 I = 150 A Ue = 30 V F = 1 Hz	
7 I = 200 A Ue = 30 V F = 1 Hz	

Ensaio	Imagen
9 I = 200 A Ue = 15 V F = 2 Hz	 DIREITA Vs 10 mm
10 I = 200 A Ue = 15 V F = 1 Hz	 DIREITA Vs 10 mm
CONFIGURAÇÃO COM SINCRONIZAÇÃO ENTRE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA E CORRENTE DE SOLDAGEM	
11 Im = 200 A Ue = 15 V F = 1 Hz	 DIREITA Vs 10 mm

Ensaio	Imagen
12 Im = 200 A Ue = 15 V F = 2 Hz	<p>DIREITA</p> <p>→ Vs</p> <p>10 mm</p>
14 Im = 200 A Ue = 30 V F = 1 Hz	<p>DIREITA</p> <p>→ Vs</p> <p>10 mm</p>
15 Im = 150 A Ue = 30 V F = 1 Hz	<p>DIREITA</p> <p>→ Vs</p> <p>10 mm</p>

Ensaio	Imagen
16 Im = 150 A Ue = 30 V F = 2 Hz	
17 Im = 150 A Ue = 15 V F = 2 Hz	
CONFIGURAÇÃO COM MODO DE SOLDAGEM "PULSADO" E SEM OSCILAÇÃO MAGNÉTICA	
19 Im = 150 A Fp = 1 Hz	

Ensaio	Imagen
20 Im = 150 A Fp = 2 Hz	 DIREITA Vs 10 mm
21 Im = 200 A Fp = 2 Hz	 DIREITA Vs 10 mm
22 Im = 200 A Fp = 1 Hz	 DIREITA Vs 10 mm

Onde: I = corrente de soldagem, Im = corrente média de soldagem, Ue = tensão do eletroímã; F = frequência de oscilação, Fp = frequência de pulsação

Figura 2.1. Aspecto superficial (foto superior) dos cordões de solda obtidos com o processo TIG (espessura da chapa de 3 mm) com linhas centrais correspondendo ao centro do arco sem deflexão (trajetória da ponta do eletrodo)

APÊNDICE III

Medidas relacionadas à largura dos cordões da soldagem TIG

Ensaio	Ld Início [mm]	Le Início [mm]	L Início [mm]	Ld Meio [mm]	Le Meio [mm]	L Meio [mm]	Ld Fim [mm]	Le Fim [mm]	L Fim [mm]	Ld Médio [mm]	Desvio [mm]	Le Médio [mm]	Desvio [mm]	L Médio [mm]	Desvio [mm]
1	-	-	8,57	-	-	8,03	-	-	8,20	-	-	-	-	8,20	0,20
2	-	-	5,51	-	-	4,54	-	-	4,88	-	-	-	-	4,88	0,35
3	3,75	2,20	5,95	3,59	2,36	5,95	3,51	2,72	6,23	3,59	0,09	2,36	0,20	5,95	0,12
4	3,07	2,91	5,98	2,63	2,45	5,08	2,68	2,64	5,32	2,68	0,19	2,64	0,16	5,32	0,35
5	3,80	2,92	6,73	3,39	2,92	6,32	2,53	2,96	5,50	3,39	0,47	2,92	0,02	6,32	0,46
6	4,02	3,13	7,15	3,70	3,66	7,36	3,78	3,72	7,50	3,78	0,12	3,66	0,25	7,36	0,13
7	5,10	4,92	10,02	4,92	4,96	9,88	5,22	5,33	10,55	5,10	0,10	4,96	0,17	10,02	0,26
8	4,41	4,44	8,85	4,29	4,48	8,77	4,13	4,60	8,73	4,29	0,10	4,48	0,06	8,77	0,04
9	4,73	4,91	9,65	5,03	4,44	9,47	4,97	4,38	9,35	4,97	0,12	4,44	0,22	9,47	0,11
10	4,77	4,77	9,53	5,00	4,26	9,26	5,00	4,71	9,71	5,00	0,10	4,71	0,21	9,53	0,16
11	5,25	5,33	10,57	5,33	4,88	10,21	4,85	5,33	10,18	5,25	0,19	5,33	0,20	10,21	0,17
12	4,90	4,67	9,57	4,84	4,84	9,68	4,72	5,02	9,74	4,84	0,07	4,84	0,12	9,68	0,07
13	5,27	4,56	9,82	4,58	4,20	8,78	4,85	4,69	9,55	4,85	0,25	4,56	0,19	9,55	0,40
14	5,28	5,43	10,71	5,58	4,99	10,57	5,46	5,52	10,98	5,46	0,11	5,43	0,22	10,71	0,15
15	3,37	4,67	8,03	3,43	4,43	7,85	3,23	4,92	8,15	3,37	0,07	4,67	0,17	8,03	0,11
16	3,24	3,43	6,67	3,47	3,35	6,83	3,49	3,91	7,40	3,47	0,11	3,43	0,23	6,83	0,29
17	3,08	3,63	6,71	3,08	3,64	6,72	3,27	3,47	6,75	3,08	0,09	3,63	0,07	6,72	0,02
18	3,24	4,28	7,52	3,08	3,99	7,07	3,12	4,03	7,15	3,12	0,06	4,03	0,12	7,15	0,18
19	-	-	6,59	-	-	6,32	-	-	6,04	-	-	-	-	6,32	0,18
20	-	-	6,40	-	-	6,51	-	-	6,35	-	-	-	-	6,40	0,06
21	-	-	9,07	-	-	9,30	-	-	9,54	-	-	-	-	9,30	0,16
22	-	-	9,88	-	-	10,67	-	-	10,35	-	-	-	-	10,35	0,28

Ld = largura direita; Le = largura esquerda; L = largura total.

Obs: Os testes preenchidos com um traço não tiveram oscilação magnética, portanto dispensando medições de largura esquerda e direita pela simetria esperada dos cordões.

APÊNDICE IV

Medidas relacionadas à geometria da zona fundida dos cordões da soldagem MIG/MAG

Ensaio	Reforço Superior	Área Depositada Superior	Área Fundida	Reforço na Raiz	Área Depositada na Raiz	Diluição	Penetração Máxima
1.1	2,704	21,178	25,059	0,676	3,429	50%	3
1.2	2,759	22,575	25,878	0,568	2,983	50%	3
Média	2,73	21,88	25,47	0,62	3,21	50%	3,00
Desvio	0,03	0,70	0,41	0,05	0,22	0%	0,00
2.1	2,169	15,533	25,703	1,338	7,594	53%	3
2.2	2,193	16,358	26,104	1,434	6,399	53%	3
Média	2,18	15,95	25,90	1,39	7,00	53%	3,00
Desvio	0,01	0,41	0,20	0,05	0,60	0%	0,00
3.1	2,366	16,015	23,683	0,927	4,536	54%	3
3.2	2,524	16,816	23,506	1,232	7,688	49%	3
Média	2,45	16,42	23,59	1,08	6,11	51%	3,00
Desvio	0,08	0,40	0,09	0,15	1,58	2%	0,00
4.1	2,587	14,733	6,406	-	-	30%	1,737
4.2	2,599	15,07	6,434	-	-	30%	1,397
Média	2,59	14,90	6,42	-	-	30%	1,57
Desvio	0,01	0,17	0,01	-	-	0%	0,17
5.1	2,384	11,889	5,3315	-	-	31%	1,107
5.2	2,197	11,901	5,8015	-	-	33%	1,232
Média	2,29	11,90	5,57	-	-	32%	1,17
Desvio	0,09	0,01	0,24	-	-	1%	0,06
6.1	2,439	14,999	7,353	-	-	33%	1,064
6.2	2,148	14,01	6,223	-	-	31%	0,949
Média	2,29	14,50	6,79	-	-	32%	1,01
Desvio	0,15	0,49	0,57	-	-	1%	0,06
7.1	2,303	12,755	7,329	-	-	36%	1,293
7.2	2,424	13,643	8,755	-	-	39%	1,424
Média	2,36	13,20	8,04	-	-	38%	1,36
Desvio	0,06	0,44	0,71	-	-	1%	0,07
9.1	2,143	8,278	2,845	-	-	26%	1,243
9.2	2,036	8,55	3,126	-	-	27%	1,007
Média	2,09	8,41	2,99	-	-	26%	1,13
Desvio	0,05	0,14	0,14	-	-	1%	0,12
10.1	2,46	13,338	11,059	-	-	45%	2,374
10.2	2,137	12,194	11,982	-	-	50%	2,719
Média	2,30	12,77	11,52	-	-	47%	2,55

Ensaio	Reforço Superior	Área Depositada Superior	Área Fundida	Reforço na Raiz	Área Depositada na Raiz	Diluição	Penetração Máxima
Desvio	0,16	0,57	0,46	-	-	2%	0,17
11.1	2,479	12,418	7,092	-	-	36%	2,139
11.2	2,333	12,083	8,528	-	-	41%	2,688
Média	2,41	12,25	7,81	-	-	39%	2,41
Desvio	0,07	0,17	0,72	-	-	3%	0,27
12.1	2,223	11,096	6,333	-	-	36%	1,800
12.2	2,332	12,822	6,8305	-	-	35%	1,309
Média	2,28	11,96	6,58	-	-	36%	1,55
Desvio	0,05	0,86	0,25	-	-	1%	0,25
13.1	2,287	12,153	9,934667	-	-	45%	2,233
13.2	2,26	11,187	8,898667	-	-	44%	2,139
Média	2,27	11,67	9,42	-	-	45%	2,19
Desvio	0,01	0,48	0,52	-	-	0%	0,05
14.1	2,352	10,6215	7,1635	-	-	40%	2,199
14.2	2,761	16,087	10,8095	-	-	40%	2,787
Média	2,56	13,35	8,99	-	-	40%	2,49
Desvio	0,20	2,73	1,82	-	-	0%	0,29
15.1	2,289	11,124	7,7855	-	-	41%	2,453
15.2	2,267	12,039	6,047	-	-	33%	1,867
Média	2,28	11,58	6,92	-	-	37%	2,16
Desvio	0,01	0,46	0,87	-	-	4%	0,29

Obs: Os valores do ensaio 8 não foram medidos/apresentados devido à irregularidade do “cordão”.

APÊNDICE V

Medidas relacionadas à largura dos cordões da soldagem MIG/MAG

Ensaio	Largura Início	Largura Meio	Largura Final	Largura Média	Desvio
1	12,26	9,96	10,86	10,86	0,82
2	12,14	12,14	11,99	12,14	0,07
3	10,36	10,60	10,36	10,36	0,11
4	6,67	8,04	7,62	7,62	0,52
5	8,41	8,73	7,62	8,41	0,42
6	7,94	10,08	9,37	9,37	0,79
7	8,35	8,82	8,82	8,82	0,21
8*	-	-	-	-	-
9	5,73	6,32	6,38	6,32	0,27
10	7,17	7,59	7,59	7,59	0,19
11	7,30	8,31	8,18	8,18	0,42
12	8,98	7,78	7,90	7,90	0,51
13	8,74	8,91	8,97	8,91	0,09
14	6,81	7,50	7,63	7,50	0,34
15	8,17	7,92	7,17	7,92	0,39

* Para o ensaio 8 os valores não foram medidos/apresentados devido à irregularidade do “cordão”.