



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

LUCIANO MACHADO CIRINO

**ANÁLISE CRÍTICA DE FORMAS DE ONDA DE CORRENTE E
MÉTODOS DE CONTROLE NO PROCESSO MIG/MAG PULSADO
CC/CA**

FLORIANÓPOLIS

2020

Luciano Machado Cirino

**ANÁLISE CRÍTICA DE FORMAS DE ONDA DE CORRENTE E
MÉTODOS DE CONTROLE NO PROCESSO MIG/MAG PULSADO
CC/CA**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e
Silva

Coorientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra

Florianópolis, SC

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cirino, Luciano Machado
Análise crítica de formas de onda de corrente e métodos
de controle no processo MIG/MAG Pulsado CC/CA / Luciano
Machado Cirino ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e
Silva, coorientador, Jair Carlos Dutra, 2020.
194 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem. 3. MIG/MAG Pulsado.
4. MIG/MAG Pulsado CA. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves
e. II. Dutra, Jair Carlos. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Luciano Machado Cirino
**Análise crítica de formas de onda de corrente e métodos de controle no processo
MIG/MAG Pulsado CC/CA**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Dr Eng.
Universidade Federal de Uberlândia

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

Raul Gohr Júnior, Dr Eng.
IMC – Engenharia de Soldagem

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

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Programa

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

Florianópolis, 07 de abril de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Neri e Teresinha e meu irmão Juliano pelo apoio nos momentos mais difíceis.

Ao orientador Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva, muito obrigado pela paciência.

Ao meu amigo Cleber Guedes, grande mestre.

Aos meus amigos de ensaios Alisson Fernandes da Rosa e Rodrigo Rodrigues Nogueira, pela ajuda e paciência.

Ao amigo Jônathas Alexandre Alves principalmente pelas conversas espetaculares sobre música.

Aos amigos Rafael Albino Bernardes e Kauê Correa Riffel.

Aos grandes mestres Alberto Bonamigo Viviani e Daniel Galeazzi.

Ao pessoal da eletrônica Fernando Costenaro, Felipe Kalil Mendonça e Rafael Jônatan Horn.

Ao Marcelo Pompermaier Okuyama pelas filmagens de alta velocidade de altíssima qualidade e pela montagem das figuras com macrografias.

Ao Cléber Marques pela ajuda constante com a parte de termografia.

A todos aqueles que de alguma forma ajudaram na construção deste trabalho.

RESUMO

Dentre os diversos processos de soldagem a arco, o processo MIG/MAG é aquele que tem sido alvo do maior número de melhorias e evoluções tecnológicas nas últimas décadas. As empresas fabricantes têm produzido novidades em profusão tamanha que, por muitas vezes, se torna difícil acompanhar e quase impossível avaliar suas reais funcionalidades. O processo MIG/MAG Pulsado, que surgiu originalmente nos anos 1960-70, impulsionado principalmente por avanços na eletrônica, pode ser considerado a primeira destas evoluções tecnológicas a surgir no mercado. Baseando-se no controle do sinal de corrente, provido pela fonte de soldagem, este processo permite soldagem com transferência metálica do tipo goticular (*spray*) em valores de corrente típicos de curto-circuito, conferindo ao processo características como reduzida geração de respingos e produção de cordões de solda com aparência superficial e características geométricas superiores. O MIG/MAG Pulsado logo se tornou uma boa alternativa para a soldagem de aços inoxidáveis e ligas de alumínio, materiais de menor soldabilidade quando comparados ao aço ao carbono. Em seguida, o desenvolvimento do processo MIG/MAG Pulsado CA que, ao incorporar uma fase de corrente negativa ao sinal de corrente, incorporou ao processo algumas características favoráveis como maior taxa de fusão e menor imposição de calor a peça de trabalho sem as instabilidades típicas da corrente negativa. Estas características tornaram o processo mais versátil possibilitando seu emprego em um número maior de aplicações. Embora seja razoavelmente bem estabelecido, o processo MIG/MAG Pulsado (CC ou CA) também têm tido sua parcela de melhorias ou evoluções com as fabricantes apresentando novas formas de onda de corrente, sistemas de controle de forma de arco dentre outras novidades. As publicações científicas acompanham e relatam as novidades, porém, com uma postura muitas vezes acrítica em relação as novidades, algumas vezes apenas reproduzindo as afirmações das fabricantes que sabidamente, podem muito bem serem apenas frases de efeito mercadológico. Diante deste cenário, este trabalho tem como motivação examinar algumas novidades relacionadas ao processo MIG/MAG Pulsado CC/CA que foram lançadas no mercado recentemente. Questões típicas como as vantagens do processo, a condição de “uma gota por pulso” (UGPP), fase de destacamento de gota metálica, novas formas de onda de corrente, capacidade de preenchimento de junta (*gap bridge ability*), imposição de calor a junta, maior taxa de fusão, pulso negativo dentre outras, são vistas de um ponto de vista crítico e inovador. Para tanto, todos os ensaios foram apoiados por algum método de monitoramento visual (filmagem normal, de alta velocidade e termográfica) além dos métodos já comuns de coleta de dados elétricos (corrente, tensão) e mecânicos (velocidade de alimentação de arame). Essa abordagem gerou resultados que demonstram um certo distanciamento entre o que se tem na prática e o que é afirmado pelas empresas fabricantes e, em alguns casos, reproduzidos por publicações científicas. Por outro lado, alguns resultados corroboram o que é afirmado em publicações, porém nem sempre a causa da eficiência do processo diante de uma determinada aplicação é aquela atribuída pela fabricante ou publicação científica. Longe da presunção de ser uma espécie de “portador da verdade”, este trabalho traz uma gama razoável de resultados sobre o MIG/MAG Pulsado que, espera-se, alimente discussões entre os profissionais da soldagem e colabore para um melhor entendimento deste processo.

Palavras-chave: MIG/MAG Pulsado, MIG/MAG Pulsado CA, forma de onda de corrente, alumínio, aço inoxidável, *gap bridge ability*

ABSTRACT

Among the various arc welding processes, the GMAW is the one that has been the target of the greatest number of technological improvements and evolutions in recent decades. The manufacturing companies have produced new improvements in such profusion that, many times, it is difficult to follow and almost impossible to evaluate its real functionalities. The GMAW-P process, which originally appeared in the 1960s-70s, driven mainly by advances in electronics, can be considered the first of these technological developments to appear on the market. Based on the control of the current signal, provided by the welding source, this process allows welding with spray metallic transfer type at typical short-circuit current values, giving the process characteristics such as reduced spatter generation and production of weld beads with superficial appearance and superior geometric characteristics. GMAW-P process soon became a good alternative for the welding of stainless steels and aluminum alloys, materials of less weldability when compared to carbon steel. Then, the development of the AC-GMAW process, which, by incorporating a negative current phase into the current signal, incorporated into the process some favorable characteristics such as higher melting rate and lower heat input on the workpiece without the typical instabilities of the negative current. These characteristics made the process more versatile, allowing its use in a greater number of applications. Although it is reasonably well established, the GMAW process (Pulsed or AC) has also had its share of improvements or evolutions with manufacturers presenting new current waveforms, arc shape control systems, among other novelties. Scientific publications follow and report the news, however, with an often uncritical stance in relation to the improvements, sometimes only reproducing the statements of the manufacturers, which are known to be just phrases of market effect. In view of this scenario, this work is motivated to examine some news related to the GMAW (Pulse and AC) process that were recently launched on the market. Typical issues such as the advantages of the process, the “one drop per pulse” (ODPP) condition, drop detachment phase, new current waveforms, gap bridge ability, heat input on joint, higher fusion rate, negative pulse among others, are seen from a critical and innovative point of view. To this end, all tests were supported by some method of visual monitoring (normal, high-speed and thermographic footage) in addition to the already common methods of collecting electrical (current, voltage) and mechanical (wire feed speed) data. This approach generated results that demonstrate a certain distance between what is in practice and what is stated by the manufacturing companies and, in some cases, reproduced by scientific publications. On the other hand, some results corroborate what is stated in publications, but not always the cause of the process efficiency or for a given application is that attributed by the manufacturer or scientific publication. Far from the presumption of being a kind of “truth bearer”, this work brings a reasonable range of results on the Pulsed MIG / MAG that, hopefully, will feed discussions between welding professionals and collaborate for a better understanding of this process.

Keywords: GMAW-P, AC-GMAW, current waveform aluminum, stainless steel, gap bridge ability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forma de onda de corrente do tipo retangular. Parâmetros: I_p (corrente de pulso), I_b (corrente de base), t_p (tempo de pulso), t_b (tempo de base), I_m (corrente média) e T (período).	25
Figura 2 (a) Oscilograma de corrente em modo curto-circuito; (b) Oscilograma de tensão em modo curto-circuito; (c) Oscilograma de corrente em modo pulsado; (d) Oscilograma de tensão em modo pulsado.....	30
Figura 3 - Correspondentes aos oscilogramas da Figura 2: (a) Aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo curto-circuito; b) macrografia correspondente a (a); c) aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo pulsado; d) macrografia correspondente a (c).	31
Figura 4 - Cordões sobre chapa de alumínio: (a) MIG/MAG Pulsado - Potência: 2232 W; (b) MIG/MAG Convencional/Curto-circuito - Potência: 1450 W.....	32
Figura 5 - Forma de onda avançada para MIG/MAG Pulsado.....	33
Figura 6 -Anúncio da Lincoln apresentando o sistema <i>Wave Control</i>	34
Figura 7 - (a) Interface da fonte Power Wave 455M/STT com o valor de Wave control regulado para +10. (b) Interface da fonte OTC DW-300 com valor de Arc Control regulado para -10.	35
Figura 8 - Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT <i>Advanced</i> . Arame de alumínio ER4043, Ø1,2 mm. Fase positiva e negativa em diferentes períodos caracterizam um processo de polaridade variável.....	36
Figura 9 - A1) Área de atuação da mancha anódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade negativa; A2) Área de atuação da mancha catódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade positiva.	39
Figura 10 - Resultados de Yarmuch e Patchett: à medida que aumentou o tempo de atuação da polaridade positiva (percentual de eletrodo positivo) aumentou também a penetração.....	40
Figura 11 - Relação entre percentual de eletrodo positivo (%) e penetração de solda (mm)..	41
Figura 12 - Macrografias das secções transversais correspondentes todas as séries de ensaios realizados com variação de %EP ou percentual de eletrodo positivo.	41
Figura 13 - Fenômeno da escala do arco na polaridade negativa e formação de pontos de emissão de elétrons na extensão do eletrodo.	44

Figura 14 - (a) Forma de onda para básica para MIG/MAG Pulsado CA. (b) Forma de onda avançada para MIG/MAG Pulsado CA que incorpora um pulso de corrente na fase negativa.	45
Figura 15 - Soldagem MIG/MAG Pulsado CA de junta sobreposta formada por chapas de aço ao carbono.	45
Figura 16 - Áreas para o cálculo do EN Ratio.	48
Figura 17 - Forma de onda do sinérgico da fonte OTC DW-300 para o MIG/MAG Pulsado CA do aço inoxidável.	49
Figura 18 - Câmera de alta velocidade modelo Y3 da empresa IDT.	51
Figura 19 - Sensor CCD (<i>charged coupled device</i>) montado em uma placa de circuitos.	52
Figura 20 - Imagem de um F1 intencionalmente fotografado com tempo de exposição alto (1/60 segundos \cong 16,7 ms).....	55
Figura 21 - Esquema básico de uma câmera consistindo de uma lente (objetiva), de um diafragma ajustável (que limita a entrada de luz que chega ao obturador), um obturador que pode abrir e fechar rapidamente e um filme ou sensor fotossensível para captura da imagem.	56
Figura 22 - Regulagem do tempo de exposição (1/125 s) em uma câmera digital portátil.	57
Figura 23 - (a) Imagem do arco voltaico no processo TIG sem o uso de iluminação LASER; (b) imagem da poça de fusão durante uma soldagem TIG com o uso de iluminação LASER.	59
Figura 24 - Sistema de Aquisição Portátil (SAP).	60
Figura 25 - Oscilogramas de tensão e corrente para o processo MIG/MAG Pulsado aplicado ao alumínio. Os picos de tensão indicados pelas setas são indicativos do destacamento de gota.	61
Figura 26 - No caso do alumínio, a gota destacada no período de pulso deforma a gota metálica na forma aproximada de uma elipse (a) prejudicando a aparência do cordão de solda em (b).	62
Figura 27 - Movimento de avanço e recuo do arame para o MIG/MAG.....	63
Figura 28 - Análise do avanço e recuo no CMT com filmagem de alta velocidade.	64
Figura 29 - Câmera de alta velocidade Y4-S2 da empresa IDT.	64
Figura 30 - Velocidade da luz no vácuo e em um meio material. Alteração na velocidade c e no comprimento de onda λ segundo um mesmo índice de proporcionalidade n (índice de refração).	67
Figura 31 - Espectro eletromagnético (para radiação viajando através do vácuo).	68

Figura 32 - Princípio de funcionamento básico de uma câmera termográfica. A caneca de café emite radiação e ao incidir sobre a lente da câmera é focalizada no detector (sensor). Este cria um sinal elétrico convertido em imagem.....	70
Figura 33 - Câmera termográfica modelo SC7200 F/3 da fabricante FLIR.....	71
Figura 34 - Xícara azul com impressões em azul e dourado; imagem normal e térmica	72
Figura 35 - O problema da reflexão.....	73
Figura 36 - Dois exemplos diferentes de compensação de parâmetros do objeto para a mesma imagem. (a) emissividade em 0,70 e temperatura ambiente em 50,0°C. (b) emissividade em 0,10 e temperatura ambiente em 21,5°C.....	74
Figura 37 - Imagens térmicas obtidas de uma tocha Infocus e uma tocha TIG convencional logo após terem sido empregadas na soldagem de um cordão de 27 cm, a mesma velocidade e com corrente de soldagem de 520 A.	75
Figura 38 - Imagem térmica obtida com câmera embaixo de uma chapa de aço carbono enquanto estava sendo submetida a soldagem TIG de quatro maneiras diferentes: (a) processo autógeno; (b) processo com alimentação contínua; (c) processo com alimentação dinâmica e frequência de 1 Hz; (d) processo com alimentação dinâmica e frequência de 2 Hz.	76
Figura 39 - Identificação de um “ponto frio” em uma imagem termográfica na soldagem de um passe de raiz.....	77
Figura 40 – (a) Fonte de soldagem Lincoln <i>Power Wave</i> 455M com sistema <i>Wave control</i> . (b) Fonte de soldagem OTC DW-300 com sistema <i>Arc Control</i>	80
Figura 41 - Formas de onda de corrente da Lincoln e da OTC. Os sistemas de controle de arco estavam desabilitados (posição <i>OFF</i> ou “0”)......	81
Figura 42 - Oscilogramas de corrente para os valores de <i>Wave Control</i> -10; 0; +10.....	83
Figura 43 - Comprimento de arco no sistema <i>Wave Control</i> da Lincoln. Valores de <i>Wave Control</i> -10; 0; +10.....	83
Figura 44 - Macrografias dos cordões de solda realizados com o sistema <i>Wave Control</i> . Valores de <i>Wave Control</i> -10; 0; +10.....	84
Figura 45 - Os resultados das medições das características geométricas dos cordões de solda realizados com a fonte da Lincoln.....	85
Figura 46 - Oscilogramas de corrente para os valores de <i>Arc Control</i> -10, 0, +10.....	85
Figura 47 - Comprimento de arco no sistema <i>Arc Control</i> da OTC. Valores de <i>Arc Control</i> -10, 0, +10.....	86
Figura 48 - Macrografias dos cordões realizados com o sistema <i>Arc Control</i> da OTC.....	86

Figura 49 - Os resultados das medições das características geométricas dos cordões de solda realizados com a fonte da OTC.....	87
Figura 50 - Fontes de soldagem empregadas nos ensaios.....	88
Figura 51 - Formas de onda das fontes empregadas	91
Figura 52 - Transferência metálica no sistema sinérgico da Fronius CMT <i>Advanced</i> 4000R que produz o destacamento de uma gota por pulso. O destacamento da gota ocorre no início da fase de destacamento.	92
Figura 53 - Transferência metálica no sistema sinérgico <i>Lincoln Crisp</i> , que produz o destacamento de uma gota principal e de gotas secundários por pulso. O destacamento ocorre no final da fase de pulso.....	92
Figura 54 - Transferência metálica no sistema sinérgico da fonte OTC DW-300 que produz o destacamento de uma gota principal pulso seguido de gotas secundárias. A gota se destaca no início da da base.....	93
Figura 55 - Transferência metálica no sistema sinérgico <i>Lincoln Soft</i> que produz o destacamento de uma gota por pulso. A gota completa seu destacamento nos instantes finais do <i>tail-out</i> . ..	94
Figura 56 - Transferência metálica da parametrização da fonte Digitec 600. Com a parametrização programada na fonte, a gota metálica só é destacada depois da ocorrência de mais de um pulso.....	95
Figura 57 - Aparência superficial dos cordões de solda.	96
Figura 58 - Imagens realizadas com a câmera HEMA para monitoração do comprimento de arco.....	97
Figura 59 - Amostras macrográficas correspondentes a cada fonte de soldagem testada.	98
Figura 60 - Resultados das medições de largura, altura do reforço, penetração de solda, diluição e ângulo de molhamento para as macrografias da Figura 59.	99
Figura 61 - Comparação entre a penetração de solda e corrente média, potência e frequência de pulso.	100
Figura 62 - Comparação entre a ângulo de molhamento e corrente média, potência e comprimento de arco.....	101
Figura 63 - Soldagem de juntas sobrepostas com processo MIG Pulsado CC/CA.	102
Figura 64 – (a) Ângulo da tocha de soldagem e das juntas sobrepostas para todos os ensaios. (b) Fotografia da tocha de soldagem acoplada ao robô antropomórfico e posicionada para soldagem.	104
Figura 65 - Fonte IMC Digiplus A7.....	105
Figura 66 - Localização da câmera termográfica em relação a bancada de ensaios.	106

Figura 67 - Imagem obtida a partir de filmagem termográfica. Soldagem em junta sobreposta com MIG/MAG Pulsado CA.....	107
Figura 68 - Imagem obtida a partir de filmagem termográfica. Soldagem sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA.....	112
Figura 69 - Imagem capturada com câmera de alta velocidade durante soldagem sobre chapa.	112
Figura 70 - Forma de onda de corrente da fonte IMC Digiplus A7 e os respectivos parâmetros de processo.	113
Figura 71 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG Pulsado CC, fonte IMC Digiplus A7. Ensaio realizado com <i>gap,s</i> de 0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2 mm.....	114
Figura 72 - Macrografias para MIG Pulsado CC (IMC Digiplus A7).	115
Figura 73 - Gráfico com os resultados de penetração para os ensaios com MIG Pulsado CC.	115
Figura 74 - Versos das chapas para corpos de prova referentes aos <i>gap's</i> de 0, 1 e 2 mm. MIG/MAG Pulsado CC.....	116
Figura 75 - Imagens das filmagens de alta velocidade (MIG Pulsado CC / IMC DigiplusA7).	117
Figura 76 - Falhas no preenchimento da junta; <i>gap</i> = 2 mm (MIG Pulsado CC / IMC Digiplus A7).....	117
Figura 77 - Forma de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA (IMC).	118
Figura 78 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG Pulsado CA, fonte IMC Digiplus A7. Ensaio realizado com <i>gap,s</i> de 0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2 mm.....	119
Figura 79 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (IMC Digiplus A7).....	120
Figura 80 - Gráfico com os resultados de penetração para os ensaios com MIG Pulsado CA.	120
Figura 81 - Comparação entre os versos dos corpos de prova soldados com MIG Pulsado CC e MIG Pulsado CA.	121
Figura 82 – Falhas no preenchimento da junta em corpos de prova com <i>gap</i> = 2 mm.....	122
Figura 83 - Imagens das filmagens de alta velocidade (MIG Pulsado CA / IMC Digiplus A7).	123
Figura 84 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/OTC DW-300).....	124
Figura 85 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) para diferentes EN Ratios.	126

Figura 86 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm). Juntas soldadas com diferentes EN Ratios.....	127
Figura 87 - Gráfico com os resultados de penetração para os ensaios com a OTC DW-300 (junta sobreposta, $gap = 1,5$ mm).....	127
Figura 88 - Versos das chapas para corpos de prova referentes aos EN Ratios de 0%, 30% e 50%. MIG Pulsado CA (OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm).	128
Figura 89 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm).....	128
Figura 90 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/ OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm).....	129
Figura 91 - Resfriamento das soldagens sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (3,8 m/min).	131
Figura 92 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Chapas soldadas com diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (3,8 m/min).	131
Figura 93 - Gráfico com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame constante).....	133
Figura 94 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/ OTC DW-300 e ensaio sobre chapa).	134
Figura 95 - Resfriamento das soldagens sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variável.	136
Figura 96 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Chapas soldadas com diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variando conforme a EN Ratio.	136
Figura 97 - Gráficos com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame variando conforme o EN Ratio).	137
Figura 98 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/ OTC DW-300, ensaio sobre chapa e velocidade de arame variando conforme o EN Ratio).	139
Figura 99 - Variação do diâmetro da gota e volume em função do aumento do EN Ratio para velocidade de alimentação de arame constante e variável.....	141
Figura 100 - Comparação entre os diâmetros de gota medidos e dos diâmetros calculados (teórico) para (a) Série 1 e (b) Série 2 de experimentos.	142

Figura 101 - (a) Imagem termográfica gerada por filmagem com a câmera termográfica localizada acima do corpo de prova. (b) Imagem termográfica gerada por filmagem com a câmera termográfica localizada abaixo do corpo de prova.	146
Figura 102 - Disposição da câmera termográfica em relação ao corpo de prova.....	146
Figura 103 - Disposição da câmera de alta velocidade.	147
Figura 104 - Forma de onda e transferência metálica para o processo MIG/MAG Pulsado CA (Fonte de soldagem OTC-DW 300).	150
Figura 105 - Forma de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) com velocidade de alimentação constante (6,0 m/min)..	151
Figura 106 - Forma de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) com velocidade de alimentação de arame variando conforme a EN Ratio.	152
Figura 107 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Diferentes EN Ratios mas com velocidade de alimentação constante (6,0 m/min).	153
Figura 108 - Gráfico com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame constante).	154
Figura 109 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Com velocidade de alimentação de arame variando com a EN Ratio.....	155
Figura 110 - Gráfico com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame variável).	157
Figura 111 - Resfriamento das soldagens sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (OTC DW-300). Filmagem em cima da peça.	159
Figura 112 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (IMC) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (OTC DW-300). Filmagem no verso da peça.	161
Figura 113 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (IMC) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variável (OTC DW-300). Filmagem em cima da peça.	163
Figura 114 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (IMC) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variável.	164

Figura 115 - Macrografias referentes aos ensaios comparativos realizados com as fontes IMC (Digiplus A7) OTC (DW-300).....	167
Figura 116 - Resultados de (a) penetração de solda; (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento. Comparação “com pulso negativo” vs “sem pulso negativo”.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre sensores CCD e CMOS	53
Tabela 2 - Especificações técnicas básicas da câmera Y4-S2 da fabricante IDT.....	65
Tabela 3 - Valores de emissividade (ϵ) recomendados para alguns metais.....	69
Tabela 4 - Especificações técnicas básicas da câmera SC7200 F/3 da fabricante FLIR.....	71
Tabela 5 -Valores dos parâmetros para as formas de onda das fontes avaliadas. Sendo: t_p = tempo de pulso; t_d = tempo de destacamento, t_b = tempo de base; I_p = corrente de pulso; I_d = corrente de destacamento e; I_b = corrente de base.....	82
Tabela 6 - Comparação entre os sistemas Lincoln <i>Wave Control</i> e OTC <i>Arc Control</i>	87
Tabela 7 - Equipamentos e condições de soldagem.	90
Tabela 8 - Valores dos parâmetros para as formas de onda. Sendo: t_p = tempo de pulso; t_d = tempo de destacamento, t_b = tempo de base; I_p = corrente de pulso; I_d = corrente de destacamento e; I_b = corrente de base.	91
Tabela 9 - Resultados para tensão média (U_m), corrente média (I_m), velocidade de alimentação de arame (v_a), Potência (P), tensão eficaz (U_{ef}), corrente eficaz (I_{ef}) dentre outros calculados via SAP.....	96
Tabela 10 - Composição química do arame de alumínio ER 5183.	104
Tabela 11 - Parâmetros de pulsado utilizados para MIG Pulsado CC e CA.	106
Tabela 12 - Configurações da câmera termográfica reguladas no software de captura da própria câmera.....	107
Tabela 13 - Configurações da câmera de alta velocidade reguladas no software de captura da própria câmera e do LASER.....	108
Tabela 14 - Tabela com parâmetros de pulsado OTC com. Sendo que I_p = corrente de pulso; t_p = tempo de pulso; I_b = corrente de base; t_b = tempo de base; I_n = corrente negativa e; t_n = tempo de negativo.....	109
Tabela 15 - Tabela com parâmetros de pulsado OTC. Sendo que I_p = corrente de pulso; t_p = tempo de pulso; I_b = corrente de base; t_b = tempo de base; I_n = corrente negativa e; t_n = tempo de negativo. Soldagem sobre chapa.....	111
Tabela 16 - Valores Médios e Eficazes para MIG Pulsado CC. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).	114

Tabela 17 - Valores Médios e Eficazes para MIG Pulsado CA. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).....	118
Tabela 18 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).	125
Tabela 19 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) e velocidade de arame constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).....	130
Tabela 20 - Valores Médios e Eficazes para MIG Pulsado CA (OTC DW-300) e velocidade de arame variando conforme a EN Ratio. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).	135
Tabela 21 - Composição químico do arame ER 309LSi.....	144
Tabela 22 - Configurações da câmera termográfica reguladas no software de captura da própria câmera.	145
Tabela 23 - Tabela com parâmetros de pulsado OTC. Sendo que I_p = corrente de pulso; t_p = tempo de pulso; I_b = corrente de base; t_b = tempo de base; I_{nb} = corrente de base negativa; t_{nb} = tempo de base negativo; I_{np} = corrente de pulso negativo e; t_{np} = tempo de pulso negativo.	145
Tabela 24 - Configurações da câmera de alta velocidade reguladas no software de captura da própria câmera e do laser.	148
Tabela 25 - Parâmetros de pulsação empregados nos ensaios com a fonte Digiplus A7.	149
Tabela 26 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação constante e filmagem em cima da peça. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P).	158
Tabela 27 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P). Filmagem no verso da peça.....	160
Tabela 28 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação variável conforme a EN Ratio. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P). Filmagem em cima da peça.....	162

Tabela 29 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação variável conforme a EN Ratio. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P). Filmagem no verso da peça.	163
Tabela 30 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA sem pulso negativo (IMC Digitplus A7). Velocidade de alimentação constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P).	165
Tabela 31 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA com pulso negativo (OTC DW-300). Velocidade de alimentação constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P).	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
AC-GMAW	<i>Alternating Current – Gas Metal Arc Welding</i>
AC-GTAW	<i>Alternating Current – Gas Tungsten Arc Welding</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>American Society for Materials</i>
AWS	<i>American Welding Socient</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CC-	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CC+	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
fps	<i>Frames per Second</i>
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding - Pulsed</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
ITC	<i>Infrared Training Center</i>
LASER	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
MDPP	<i>Multiple Droplet per Pulse</i>
MGPP	Múltiplas Gotas por Pulso
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i>
ODPP	<i>One Droplet Per Pulse</i>
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UGPP	Uma gota por pulso
VP	<i>Variable Polarity</i>
VP-GMAW	<i>Variable Polarity – Gas Metal Arc Welding</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	A IMPORTÂNCIA DOS INSTRUMENTOS DE MONITORAÇÃO E MEDIÇÃO	18
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivos específicos	21
2	ANTECEDENTES E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	PROCESSO MIG/MAG PULSADO CC	23
2.1.1	Questão do destacamento de gotas no processo MIG/MAG Pulsado	25
2.1.2	Benefícios do processo MIG/MAG Pulsado.....	28
2.1.3	Formas de onda de corrente.....	32
2.2.	PROCESSO MIG/MAG PULSADO CA	35
2.2.1	A Questão da polaridade nos processos CA	37
2.2.2	A EN Ratio no processo MIG/MAG Pulsado CA	47
3	SISTEMAS VISUAIS DE MONITORAÇÃO E COLETA DE DADOS.....	50
3.1	FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE.....	50
3.1.1	Células fotossensíveis – CCD e CMOS.....	52
3.1.2	Taxa de aquisição de imagens	53
3.1.3	Tempo de exposição e obturador	55
3.1.4	Tipos de luz e LASER.....	58
3.1.5	Aplicações de Filmagem em alta velocidade ao estudo de processos de soldagem a arco	59
3.1.6	Câmera de alta velocidade	64
3.2	FILMAGEM TERMOGRÁFICA.....	65
3.2.1	Definição	65
3.2.2	Radiação térmica	66
3.2.3	O espectro eletromagnético	66

3.2.4	Emissividade	69
3.2.5	A câmera termográfica	70
3.2.6	A imagem térmica.....	72
3.2.7	Temperatura aparente	73
3.2.9	Aplicação na análise de processos, inspeção e controle.....	74
4	MIG/MAG PULSADO CC – SISTEMAS DE CONTROLE DE ARCO.....	78
4.1	METODOLOGIA	78
4.2	CONTROLE DO FORMATO DO ARCO VOLTAICO – <i>ARC CONTROL E WAVE CONTROL</i>	80
5	MIG/MAG PULSADO CC - FORMAS DE ONDA AVANÇADAS E ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA	88
5.1	METODOLOGIA	88
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS FORMAS DE ONDA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA	90
5.3	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS CORDÕES DE SOLDA	95
6	SOLDAGEM DE CHAPAS DE ALUMÍNIO COM MIG/MAG PULSADO CC/CA	102
6.1	METODOLOGIA.....	103
6.1.1	Soldagem de juntas sobrepostas com diferentes espaçamentos	103
6.1.2	Soldagem de juntas sobrepostas com diferentes EN Ratios	108
6.1.3	Soldagem em chapas planas.....	110
6.2	ENSAIOS SOBRE JUNTAS SOBREPOSTAS.....	112
6.3	ENSAIOS SOBRE CHAPAS PLANAS	130
7	SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL COM MIG/MAG PULSADO CA	143
7.1	METODOLOGIA.....	143
7.2	FORMA DE ONDA DE CORRENTE E TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	149
7.3	ANÁLISE MACROGRÁFICA	152
7.4	ANÁLISE TERMOGRÁFICA	158
7.5	COMPARAÇÃO ENTRE SOLDAGENS COM FORMA DE ONDA SEM PULSO NO NEGATIVO E FORMA DE ONDA COM PULSO NEGATIVO	164

8	CONCLUSÕES.....	171
9	TRABALHOS FUTUROS	175
10	REFERÊNCIAS.....	176
	APÊNDICE 1.....	190

1 INTRODUÇÃO

Poucos discordam que a soldagem é o método de união mais empregado na indústria atualmente. Há muito os rebites foram, em grande, parte substituídos por soldagem na construção de estruturas metálicas, na construção naval, aeronáutica e automobilística. Essa evolução foi gradual no início do século XX, ou seja, aconteceu na medida em que os engenheiros e técnicos ganharam mais afinidade com o processo de soldagem por eletrodos revestidos. Ao mesmo tempo surgiram novos processos de soldagem a arco que superavam o eletrodo revestido em versatilidade e capacidade de produção. O processo TIG (GTAW), por exemplo, mostrou-se adequado para a soldagem de peças de alumínio em aviões americanos durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), enquanto o processo MIG/MAG (GMAW) passou a ser um processo amplamente empregado na indústria do pós-guerra especialmente para a soldagem de aços ao carbono.

Com o avanço da eletrônica nos anos 1960-70 surgiram os processos TIG e MIG/MAG com pulsação de corrente que apresentavam diversas vantagens como melhor aparência superficial dos cordões de solda, maior capacidade de produção, melhores características metalúrgicas, diminuição do número de respingos - este último sendo uma característica do processo MIG/MAG. Ou seja, as fontes de soldagem passaram a dispor de elementos que permitiam controle sobre a forma de onda de corrente de soldagem e, por conseguinte, sobre a transferência metálica estabelecendo um novo patamar de qualidade para a soldagem. O processo MIG/MAG tornou-se mais versátil permitindo a soldagem bem-sucedida de chapas finas de alumínio e aço inoxidável que, por suas características (alta condutividade térmica no caso do alumínio e alta tensão superficial no caso do aço inoxidável), têm menor soldabilidade em relação aos aços ao carbono. Nos últimos anos, os processos TIG e MIG/MAG experimentaram uma série de avanços notáveis no que diz respeito ao controle, não só da forma de onda de corrente, mas da alimentação de arame, no projeto de tochas, na monitoração do fluxo de gás de proteção sem falar da variedade formidável de modalidades de processo e técnicas encontradas no mercado, cada qual prometendo um avanço tecnológico capaz de resolver problemas enfrentados atualmente pela indústria como se contata em trabalhos como Kah; Suoranta; Martikanen (2012), Kaneko; Yamane; Oshima (2009) e Wilson (2007).

A utilização de gabaritos, robôs antropomórficos e dispositivos de movimentação de tocha também foram se tornando cada vez mais comuns na indústria à medida que ficavam mais acessíveis. Isso é comprovado especialmente quando se examina a indústria automobilística de hoje. Os sistemas de automação e mecanização em geral possuem ao menos dois componentes benéficos no tocante a soldagem: afastar o soldador da região de trabalho evitando que este fique exposto a radiação, fumos etc. (isto nem sempre é verdadeiro, já que muitos sistemas mecanizados exigem a presença do operador) e o aumento de produtividade. Quando se fala de produtividade em soldagem, tende-se a considerar apenas a velocidade com que o procedimento de soldagem é realizado. Isso é verdadeiro, porém, incompleto. De maneira mais ampla, se tem produtividade quando se produz no menor tempo possível, ao menor custo possível e com a maior qualidade possível dentro das especificações da norma ou projeto. Em outras palavras e de maneira sintética: “Não basta aumentar a quantidade produzida, é necessário que o produto tenha valor, que atenda às necessidades dos clientes” (CAMPOS, 2014). Em favor da automação, pode-se então afirmar que esta, quando implementada corretamente, deve criar um ambiente industrial propício ao aumento de produtividade.

Sempre acompanhando os avanços nas áreas de eletrônica, automação e controle, os processos de soldagem passam por um novo ciclo de evolução com melhorias e adaptações que antes pareciam impraticáveis. A evolução dos processos acabou os dotando de comportamentos de alta dinâmica, maior complexidade e maior interação entre os parâmetros, controle da poça de fusão e da transferência metálica (por exemplo, *Cold Metal Transfer (CMT)*, *CMT Advanced*) além de extrapolar suas faixas de operação tradicionais (como *FocusTIG*, *RapidArc*). O próprio MIG/MAG Pulsado (GMAW-P) vem passando por modificações principalmente no que concerne a forma de onda de corrente e sistemas de controle. Fabricantes como OTC, Fronius e Lincoln têm apresentado formas de onda que incorporam características novas como a fase de destacamento, rampas de corrente durante o pulso, controle de frequência de pulso dentre outros a fim de tornar o processo mais estável, diminuir ruído sonoro ou melhor adequar um processo de soldagem a uma determinada aplicação. Além disso, há o processo MIG/MAG Pulsado CA (AC-GMAW) que incorpora uma fase de corrente negativa com a finalidade de aumentar a taxa de fusão e diminuir a penetração de solda, fator de importância em algumas situações como soldagem de chapas de baixa espessura ou soldagens de revestimento, por exemplo. Ao entrar em contato com estes novos sistemas propostos pelas fabricantes citadas, se constatou a necessidade de realizar um estudo mais aprofundado sobre alguns dos conceitos apresentados. Esse contato com as fontes de soldagem e suas abordagens em relação ao

processo MIG/MAG, levou à procura por informações trazidas tanto pelas próprias empresas fabricantes quanto por autores independentes. O que se constatou foi que a maioria dos artigos especializados reproduz, em maior ou menor grau, as informações difundidas pelas fabricantes. Isto não seria um problema não fosse a forma acrítica como os autores recebem e transmitem estas informações. Afirmações destes artigos são então reproduzidos em artigos subsequentes, numa espécie de “reação em cadeia”. Por conseguinte, há uma repetição de informações superficiais que regra geral não são realmente úteis para que engenheiros e técnicos possam tomar uma decisão consciente quanto ao melhor processo ou procedimento a ser aplicado em uma situação real.

Uma postura crítica diante de novidades tecnológicas relativas ao universo da soldagem (especialmente da soldagem a arco) e de publicações em geral não é uma atitude nova no LABSOLDA-UFSC. Outras dissertações, teses e publicações vêm trazendo informações ao longo dos anos, baseadas preponderantemente na experimentação prática, atitude que vem revelando que nem sempre a realidade condiz com o que é afirmado em publicações ou em informações difundidas por empresas fabricantes. Este foco na experimentação permitiu inclusive que novos processos fossem empregados de maneira inovadora, diferente da proposta inicial das fabricantes, além de impulsionar novos desenvolvimentos. Não obstante, de forma alguma se deixou de lado as informações contidas em publicações especializadas, nem de forma alguma se assume uma proposta de rejeitá-las. Seria muita presunção. A postura diante destas informações é diferenciada, pois não são aceitas de imediato sem a devida reflexão e análise.

Uma frase de um artigo de 2011, publicado pela equipe do LABSOLDA-UFSC, reflete muito bem a abordagem contida neste trabalho: “De fato, as explicações para grande parte dos resultados obtidos não refletem a realidade científica. As verdadeiras razões para que uma determinada tecnologia seja boa são mascaradas por frases de efeito mercadológico” (DUTRA; MARQUES; SILVA, 2012). Deste modo, o presente trabalho pretende se aprofundar melhor em conceitos e questões relacionadas ao processo MIG/MAG, mais especificamente as modalidades Pulsado CC e Pulsado CA. Questões estas tais como as vantagens do processo pulsado em relação ao processo convencional (MIG/MAG com controle de tensão), destacamento de gotas (“uma gota por pulso”, destacamento no pulso *vs* base), funcionamento das novas formas de onda de corrente, aplicação do MIG/MAG Pulsado CA ao aço e ao

alumínio, sistemas de controle de arco e a questão do chamado *gap bridge ability*¹ foram apresentadas, discutidas e postas sob observação por intermédio de ensaios. Os resultados obtidos mostram que muitas vezes há um certo distanciamento das informações obtidas a partir da prática e aquelas obtidas a partir de artigos científicos ou informativos das empresas fabricantes.

1.1 A IMPORTÂNCIA DOS INSTRUMENTOS DE MONITORAÇÃO E MEDIÇÃO

O Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLDA – UFSC) vem tentando não só acompanhar as novas tecnologias que se apresentam no mercado, mas compreendê-las e dominá-las. O estudo pormenorizado destas novas tecnologias permite ao LABSOLDA-UFSC determinar qual o melhor processo ou a melhor técnica de soldagem para uma dada aplicação sem depender somente das informações fornecidas por fabricantes que são, quase invariavelmente, vagos e deficientes em informações práticas. Para tanto, foi preciso desenvolver um aparato instrumental que movimentou muitos técnicos e engenheiros ao longo destes anos. Esse esforço começou com a tese de doutoramento do Prof. Jair Carlos Dutra (DUTRA, 1989) que desenvolveu a instrumentação básica para o monitoramento de soldagem, especialmente útil para determinar detalhes de processos de soldagem como o MIG/MAG Pulsado por exemplo. A acesso a informações produzidas por este sistema de monitoramento serviu de base científica e apoio para a fabricação das primeiras fontes de soldagem nacionais de alta tecnologia por intermédio de uma empresa gerada dentro do LABSOLDA-UFSC, a IMC Soldagem². Daí em diante, o sistema de monitoramento passou por melhorias que geraram o Sistema de Aquisição Portátil (SAP) (LABSOLDA, 2015). Este permite a monitoração e determinação das formas de ondas de corrente e tensão de soldagem, velocidade de arame e vazão de gás. Permite ainda a avaliação da estabilidade do processo por meio de histogramas, cálculo de potência, energia de soldagem dentre outros parâmetros de importância.

Conforme destacado anteriormente, o mercado tem sido bombardeado por uma enxurrada de novos processos e modalidades de processos, de modo que é cada vez mais difícil não só acompanhar os novos desenvolvimentos, mas principalmente, avaliar suas reais capacidades. O processo MIG/MAG, por exemplo, é objeto de uma grande variedade de desenvolvimentos, cada um deles prometendo algum tipo de solução definitiva para problemas

¹ Ver item 1.3 deste capítulo.

² <https://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/apresentacao>

enfrentados no cotidiano dos mais variados ramos da indústria. Estes desenvolvimentos têm expandido os limites do processo ao incorporarem novos conceitos e na ênfase de formas de controle sofisticadas. Daí a importância dos instrumentos de monitoração e medição no estudo de processos de soldagem e a necessidade de ampliação do arsenal deste tipo de equipamentos, empregados pelo LABSOLDA-UFSC. Novos equipamentos foram incorporados recentemente como uma câmera de alta velocidade e uma câmera termográfica. Estas já fazem parte do cotidiano da equipe integrante deste laboratório e têm sido fundamentais em alguns trabalhos relacionados a novas modalidades de processo. Por exemplo, para processos como o *Cold Metal Transfer* (CMT), TIP TIG ou mesmo MIG/MAG Pulsado CA é desejável e mesmo fundamental ir além da aquisição dos sinais de corrente e tensão de soldagem. A filmagem em alta velocidade do processo de soldagem permite uma análise detalhada do processo em funcionamento, seja do arco voltaico, seja da alimentação de arame ou qualquer outro fator de importância no contexto do processo. Em outra situação, pode ser conveniente determinar o fluxo de calor em uma chapa de aço submetida a ação do arco voltaico (PAES, 2017) ou até mesmo identificar uma descontinuidade em um cordão de solda (VENKATRAMAN et al., 2012). Neste caso, uma filmagem com a técnica de termografia pode ser eficiente.

Como estes sistemas de monitoração têm sido empregados no LABSOLDA-UFSC e foram extensivamente utilizados neste trabalho, se considerou conveniente a inclusão de um capítulo abordando conceitos básicos sobre filmagens de alta velocidade e termografia que foram úteis na realização deste trabalho e podem ser úteis na realização de trabalhos futuros. Deste modo, o capítulo três deste trabalho traz informações básicas sobre as técnicas e as especificações dos equipamentos além de alguns exemplos de aplicação destas tecnologias.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

A maneira como as informações são apresentadas neste trabalho não foge muito a convencional. Contudo, são necessários alguns esclarecimentos. O segundo capítulo denominado como “Antecedentes e Fundamentação Teórica” apresenta informações que buscam situar o leitor dentro das questões tratadas neste trabalho. Como não poderia deixar de ser, este capítulo estabelece o ponto de vista de outros pesquisadores com relação aos assuntos

a serem abordados e, algumas vezes, o ponto de vista do próprio autor. O terceiro capítulo denominado “Sistemas visuais de monitoração e coleta de dados” já foi tratado no item anterior.

A diferença em relação a estrutura convencional de dissertações e teses, está na ausência de um capítulo referente a metodologia empregada no trabalho. O processo MIG/MAG Pulsado foi tratado de forma bastante ampla e gerou quatro trabalhos que podem até mesmo serem analisados de forma independente, porém são colocados aqui dentro de um único contexto: a ênfase nos aspectos práticos do processo e a comparação de suas reais capacidades e com as capacidades que são comumente difundidas pelas fabricantes e literaturas. Cada um destes trabalhos tem objetivos específicos diferentes e, por conseguinte, as metodologias são distintas. Estes trabalhos então foram apresentados na forma de capítulos (4,5,6 e 7) e em cada um destes capítulos há uma pequena introdução reafirmando os objetivos, seguido de metodologia com a descrição de como os experimentos foram conduzidos e por fim, a descrição dos resultados e discussões. Esta estratégia foi considerada mais adequada para facilitar o entendimento do leitor, já que este é imediatamente colocado a par do assunto do capítulo sem que haja a necessidade de voltar a capítulos anteriores para conferir tabelas ou dados importantes para o entendimento de um determinado ensaio.

Os demais capítulos apresentam as conclusões (8) e as sugestões para trabalhos futuros (9). Por último, tem-se a lista de referências dos textos lidos para a realização deste trabalho, totalizando dez capítulos.

1.3 OBJETIVOS

Primeiramente, a fim de evitar interpretações errôneas, deve se deixar claro que este trabalho não se trata de uma avaliação de desempenho de fontes de soldagem, tampouco levantamento de parâmetros ou procedimentos de soldagem. Infere-se a partir disto que nenhum resultado desfavorável deve ser considerado como uma crítica a um fabricante ou a um determinado modelo de fonte de soldagem e sim à conceitos concernentes ao processo MIG/MAG Pulsado. Se resultados satisfatórios ou não foram obtidos com uma determinada fonte, não significa peremptoriamente que uma determinada fonte seja melhor ou pior que outra. Desnecessário dizer (ou pelo menos deveria ser) que os resultados devem ser analisados no âmbito das condições de ensaio empregadas neste trabalho. Aplicadas outras condições ou tendo com objetivo a determinação de melhores procedimentos de soldagem, evidentemente

será possível chegar a resultados diferentes, sejam melhores ou piores. Com isto esclarecido, segue-se então com a descrição do que este trabalho realmente se trata.

Este trabalho consiste na avaliação fenomenológica de diversos conceitos concernentes às tecnologias de pulsação e alternância de polaridade no processo MIG/MAG (formas de onda em corrente contínua e alternada, condições para destacamento de gotas metálicas, preenchimento de juntas ou *gap bridge ability*, controle de comprimento de arco etc.). Estes, entre outros conceitos, têm sido analisados de maneira bastante superficial e até contraproducente especialmente em artigos mais recentes da literatura científica. Há ainda pretensas vantagens, nem sempre realistas, alardeadas por empresas fabricantes, que são reproduzidas por artigos científicos sem maiores críticas ou análises, ou sem o aprofundamento devido. Em alguns casos, até mesmo as teorias mais difundidas tanto no âmbito acadêmico quanto empresarial são contestáveis ou de aplicação prática limitada. Para esta avaliação foram empregados desde a coleta de dados elétricos via sistema de aquisição, quanto dados gráficos e vídeos gerados por filmagens termográficas e de alta velocidade em alta resolução.

Aborda também o emprego deste processo em três materiais diferente, amplamente utilizados na indústria metalomecânica: aço ao carbono, alumínio e aço inoxidável. Esta abrangência foi considerada necessária justamente para sanar a problemática descrita, que impacta negativamente a aplicabilidade industrial e a própria investigação científica da tecnologia.

Em suma, este trabalho visou lançar alguma luz sobre alguns assuntos referentes ao processo MIG/MAG que, talvez por alguma falha ou falta de interesse, não foram analisados de maneira mais profunda.

1.3.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são como segue:

1. Verificar a funcionalidade dos sistemas de controle para o processo MIG/MAG Pulsado (presentes em duas fontes de fabricantes de renome internacional) que têm como objetivo controlar o formato do arco, o tornando mais concentrado (*stiff*) ou menos concentrado (*soft*) conforme a regulação empregada na fonte de soldagem;

2. Analisar as novas formas de onda de corrente pulsada presentes em três fontes de soldagem de fabricação estrangeira quanto a suas características funcionais, estratégias para o destacamento de gota metálica, funcionalidade das fases de destacamento além dos resultados de soldagem verificados mediante análise das macrografias dos cordões de solda. Esta análise é completada com uma comparação dos resultados obtidos com uma fonte de fabricação nacional na qual é possível programar os parâmetros de pulsação e que emprega uma forma de onda bastante próxima a retangular.
3. Avaliar o desempenho do processo MIG Pulsado CA aplicado na soldagem de juntas sobrepostas formadas por chapas finas de alumínio (1 mm) quando há um espaçamento ou *gap* entre a chapa superior e inferior. A informação difundida na literatura é de que a corrente negativa confere ao processo MIG Pulsado uma capacidade de preenchimento de juntas (ou *gap bridge ability*) maior em relação ao que se teria com o processo pulsado CC. As explicações comumente difundidas na literatura sobre a causa da suposta *gap bridge ability* também são analisadas assim como questões referentes a transferência metálica e a transferência de calor do arco para a peça durante a soldagem;
4. Analisar o sistema sinérgico pulsado CA dedicado a soldagem do aço inoxidável e presente em uma fonte fabricada pela empresa de maior renome neste processo. A forma de onda desta fonte apresenta um pulso na polaridade negativa com o objetivo de incrementar a taxa de fusão, melhorar a estabilidade do processo e controlar a penetração de solda, conforme a literatura corrente. Neste caso são analisados fatores como transferência metálica, transferência de calor a peça, geometria do cordão de solda mediante análise de macrografias além de comparações entre duas fontes:

Cabe ressaltar que em todos os ensaios realizados para alcançar estes objetivos, foram empregados, em maior ou menor grau, a coleta de dados elétricos (corrente, tensão, forma de onda), mecânicos (velocidade de alimentação de arame) e filmagem de alta velocidade e filmagem termográfica.

2 ANTECEDENTES E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo, possui um contexto de natureza teórica, normalmente necessário para um melhor entendimento dos resultados obtidos nos ensaios realizados e descritos mais adiante. Inclui também informações de ordem mais prática, tais como informações de resultados obtidos por autores de outras instituições/laboratórios e de ensaios realizados no próprio Laboratório de Soldagem da UFSC. O primeiro item começa com uma revisão a respeito do processo MIG/MAG Pulsado CC (corrente contínua) onde se destacam as informações sobre a origem do processo, sobre o conceito de pulsação de corrente, parâmetro de pulsação, questões referentes a destacamento de gota metálica, benefícios da pulsação de corrente, formas de onda avançadas dentre outros assuntos que serão discutidos ao longo do trabalho. O segundo item trata especificamente do processo MIG/MAG Pulsado CA (corrente alternada) começando com uma explicação sobre a emissão de elétrons por efeito de campo seguido dos parâmetros de pulsação, as funcionalidades da corrente pulsada CA e seus formatos de onda para alumínio e aço carbono.

2.1 PROCESSO MIG/MAG PULSADO CC

O processo de soldagem MIG/MAG, dentre os processos de soldagem a arco, é aquele que mais se notabiliza por gerar novas expectativas. Este processo de soldagem tem sido alvo de um grande número de melhorias e inovações, relatadas em pesquisas e debatidas em publicações, congressos e artigos especializados. Tal é a constância que surgem, que se tornou difícil para um pesquisador acompanhar pesquisas que tratam destas novidades e ainda mais difícil determinar suas reais funcionalidades. Esta expectativa em torno deste processo se tornou cada vez mais comum a partir de 1960-1970. Nestas décadas, ao mesmo tempo que a indústria demonstrava significativos avanços na área técnica, maiores exigências por qualidade e, conseqüentemente, na capacidade de produção, os processos MIG/MAG e TIG convencionais se mostraram aquém das exigências impostas por aquele cenário. Cenário este que, conforme relatado por Street (1990), envolvia a soldagem de materiais especiais, soldagem de juntas

complexas e de alta responsabilidade (construção de centrais nucleares, por exemplo) além de outras exigências, como a soldagem de materiais dissimilares, por exemplo.

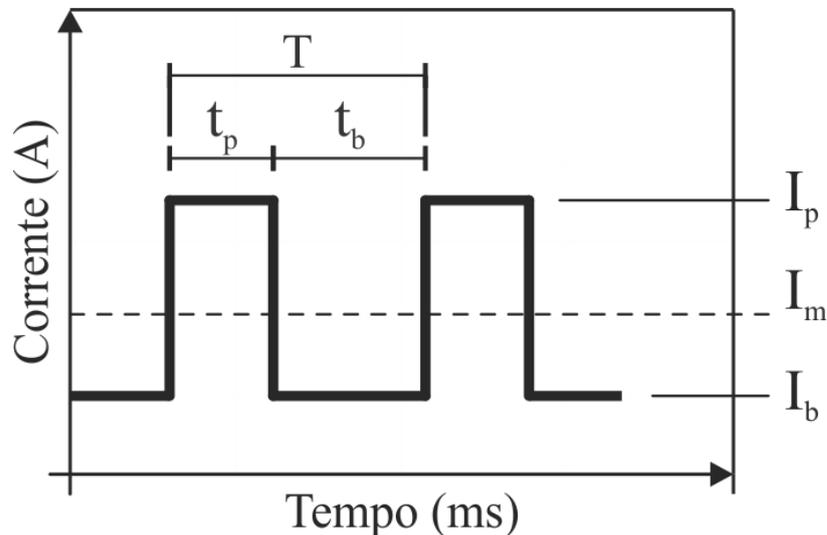
Na esteira de avanços em outras áreas da ciência/engenharia (eletrônica de potência e controle, informática etc.), surgiram inovações na área de soldagem como uma forma de sobrepujar ou ao menos mitigar as dificuldades impostas pelo cenário industrial da época. Desde então, o processo MIG/MAG tem sido alvo de uma quantidade razoável de inovações. A mais comum destas é a modalidade MIG/MAG Pulsado que é o alvo principal de estudo neste trabalho. Portanto, este capítulo é dedicado a relatar e discutir as principais características do processo e algumas inovações recentes, principalmente no que concerne a forma de onda de corrente.

Conforme já destacado, a evolução da eletrônica tornou possível o desenvolvimento de diversas variações ou modalidades do processo MIG/MAG nas últimas décadas. O exemplo mais simples e, provavelmente o mais difundido é o MIG/MAG Pulsado, que consiste basicamente na imposição de um sinal de corrente que alterna entre um patamar de corrente inferior (I_b ou corrente de base) e um patamar superior (I_p ou corrente de pulso). A Figura 1 apresenta uma forma de onda retangular onde T é o período ($t_b + t_p$) e I_m é a corrente média dada, neste caso, pela Equação 1. Alega-se comumente que os parâmetros de base (I_b e t_b) não possuem influência no destacamento, mas podem sim ter efeito no diâmetro final da gota metálica (VILARINHO; SCOTTI, 2000). Ao atuar em conjunto, o par I_p e t_p , além de prover energia suficiente para garantir a formação da gota metálica, deve promover também o destacamento da gota metálica.

$$I_m = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (1)$$

O objetivo principal desta abordagem é possibilitar a soldagem de materiais com uma transferência metálica goticular (*spray*) em níveis de corrente abaixo da corrente de transição, situação impossível quando se trata da modalidade MIG/MAG convencional (controle de tensão) (ESSERS; GOMPEL, 1984). Acerca dos benefícios ao processo pulsado e outras vantagens de ordem bastante prática, estes serão discutidos mais detalhadamente adiante neste capítulo. Primeiramente, se faz necessário um maior detalhamento em aspectos concernentes aos parâmetros de processo.

Figura 1 - Forma de onda de corrente do tipo retangular. Parâmetros: I_p (corrente de pulso), I_b (corrente de base), t_p (tempo de pulso), t_b (tempo de base), I_m (corrente média) e T (período).



2.1.1 Questão do destacamento de gotas no processo MIG/MAG Pulsado

Embora o objetivo não seja tratar sobre determinação de parâmetros para o processo MIG/MAG Pulsado, dois exemplos de pesquisas que focam neste tema podem ser citados como o trabalho de Vilarinho e Scotti (2000) e Palani e Murugan (2005). Estes trazem informações bastante completas no tocante a este assunto. Todavia, alguns aspectos devem ser levados em conta neste sentido. Provavelmente um dos pesquisadores pioneiros no que concerne a determinação dos parâmetros do processo pulsado, Amin (1981) propõe a observação de dois critérios básicos:

- (1) “[...] a corrente média, determinada pela combinação dos quatro parâmetros de pulso, deve ser aquela em que a taxa de fusão iguala a velocidade de alimentação de arame para manter um comprimento de arco constante”; (2) “Para uma dada velocidade de alimentação de arame (ou corrente média), a amplitude e a duração do pulso combinadas devem ser ajustadas de modo que pelo menos uma gota seja destacada por pulso. ”

Em artigo posterior, Amin (1983) introduziu o chamado parâmetro de destacamento (*detachment parameter*) dado pela Equação (2). Obedecendo esta última, os parâmetros I_p e t_p

terão valores suficientes que quando combinados, devem gerar energia suficiente para que ocorra o destacamento de pelo menos uma gota metálica por pulso. O coeficiente K é o parâmetro de destacamento e n é o expoente que pode assumir diferentes valores³ conforme a composição química e diâmetro do arame (RAJASEKARAN et al., 1998) (PRAVEEN; KANG; YARLAGADDA, 2006).

$$I_p^n t_p \geq K \quad (2)$$

Quando na Equação (2) o sinal de “maior e igual” é substituído por “igual”, significa na prática que se considera o destacamento de apenas uma gota por pulso, condição conhecida como ODPP (*one droplet per pulse*) ou, em português UGPP (uma gota por pulso). Muitos pesquisadores têm levado em conta a condição UGPP como forma de assegurar maior estabilidade ao processo (STREET, 1990) (SUBRAMANIAN et al., 1999) (KIM; EAGAR, 1993).

Matsuda et al. (1984) consideraram a condição UGPP como fundamental para a estabilidade de arco e redução da incidência de respingos na soldagem MIG/MAG Pulsado de aços ao carbono sob proteção gasosa com mistura de argônio e dióxido de carbono ou dióxido de carbono puro. Os autores alegam que a produção de mais de uma gota por pulso leva a curtos-circuitos e, por conseguinte a produção de respingos.

Rajasekaran et al. (1998) realizaram uma série de experimentos para determinar os parâmetros de pulsação (I_p , I_b , t_p , t_b) mais adequados para arames de alumínio ER 5356 a fim de minimizar a geração de respingos, extinção de arco, falha no destacamento de gota além de irregularidades no cordão de solda. É dado certo enfoque a variação de comprimento de arco em função do número de gotas destacadas. Cada uma das situações, uma, duas ou três gotas por pulso, foi analisada por intermédio da variação dos valores de tensão e em todos os casos obteve-se estabilidade razoável conforme os parâmetros de pulso empregados. Contudo, o destacamento de uma gota durante a base combinado com a corrente de pulso mais alta empregada (240 A) e o um tempo de pulso mais curto empregado (3 ms) foi considerado a situação de maior estabilidade no que concerne o comprimento de arco. A corrente de pulso empregada talvez fosse alta para os padrões da época, mas como será visto no decorrer deste

³ Por exemplo, Amin (1983) determinou 2,3 como valor deste expoente para arames de aço carbono (Ø1,2 mm, não especificado) e alumínio (Ø1,6 mm, não especificado). Rajasekaran et al. (1998) emprega $n = 1,7$ para arames de alumínio ER 5356 e Ø1,2 mm. Marques (2014) chegou ao valor de 1,83 para um arame de alumínio de especificação ER4043 e Ø1,2 mm.

trabalho, a empresa japonesa OTC *Daihen Japanese Company* (OTC, 2020) tem empregado valores de pulso da ordem de 350 A e 1,2 ms como tempo de pulso para arames de Al-Mg. Quanto a irregularidades superficiais, os pesquisadores alegam que o destacamento de uma gota durante o pulso produz cordões de solda mais uniformes e de melhor aparência.

Praveen, Kang e Prasad (2006) conduziram uma série ensaios com arame de alumínio ER 4047 com diferentes parâmetros para o processo pulsado. A maior parte destes experimentos tiveram como resultado a geração excessiva de curtos-circuitos ou levaram a produção de múltiplas gotas por pulso ou MGPP (ou em inglês, MDPP – *multiple drops per pulse*). As demais produziram transferência do tipo UGPP. Os pesquisadores reafirmam a melhor adequação da condição UGPP e descartam a transferência de múltiplas gotas em função da produção excessiva de respingos.

Esta maneira de pensar o processo MIG/MAG Pulsado foi contraposta em trabalhos como Gosh, Agarval e Kulkarni (2009) e Jaeschke (2009) que consideram que o destacamento de mais de uma gota por pulso pode ser benéfico no que diz respeito a capacidade de produção do processo sem maiores prejuízos a estabilidade. Gosh, Agarval e Kulkarni (2009) não oferecem maiores informações a respeito da condição MGPP, apenas comentam superficialmente a questão da produtividade. Já Jaeschke (2009) é mais específico e descreve que a condição MGPP é caracterizada pela formação de uma gota principal com diâmetro igual ou pouco maior ao diâmetro do arame. Subsequentemente ao destacamento da gota principal, pode ocorrer o destacamento de uma gota secundária ou mesmo um trem de gotas secundárias de menor diâmetro.

Questiona-se se a estratégia de MGPP é adequada tanto para aço quanto para alumínio. Considerando que a proteção gasosa pode não ser totalmente eficiente⁴, estima-se que para o caso do alumínio, a formação de múltiplas gotas possa ser prejudicial, pois ao aumentar o número de gotas destacadas por pulso, também se aumenta o risco de a gota na forma líquida absorver elementos prejudiciais presentes no ar atmosférico (H₂, O₂, N₂). Para o caso do hidrogênio por exemplo, sua solubilidade aumenta quase vinte vezes⁵ quando o alumínio passa

⁴ Na prática de soldagem podem ocorrer falhas na proteção gasosa por diversos motivos como: vazão de gás insuficiente, perda de carga, vazamentos, contaminantes, umidade na tubulação ou no gás, dispersão do gás em função de correntes de ar além de turbulência na região do arco voltaico.

⁵ Em 660°C a solubilidade do H₂ no alumínio aumenta de 0,036 cm³/1000 g para 0,7 cm³/1000 g. Em torno de 2000°C a solubilidade passa a ser 50 cm³/1000 g. Faz-se a ressalva de que a absorção de gases é um mecanismo

do estado sólido para o líquido (TUTTLE,1991). Quinn (2002) observa que o alumínio é consideravelmente mais sensível a instabilidades (mudanças de corrente, irregularidade na alimentação de arame, mudanças de comprimento de arco) que os aços em geral. Ele atribui esta maior sensibilidade as propriedades do alumínio tais como: maior condutividade térmica, menor ponto de fusão e menor resistência elétrica em relação ao aço. Tendo em vista essas informações, é compreensível que fabricantes como a OTC prefiram uma abordagem mais conservadora com relação a soldagem MIG Pulsado do alumínio, como se constata mais adiante neste trabalho.

Outra questão, conveniente tanto ao aço quanto ao alumínio, é que o uso de MGPP pode aumentar a incidência de respingos em soldagens fora de posição. Independentemente destas questões, os resultados apresentados mais adiante demonstram que as empresas fabricantes consideram a abordagem MGPP para o aço ao carbono, mas a dispensam no caso do alumínio.

2.1.2 Benefícios do processo MIG/MAG Pulsado

Conforme já abordado anteriormente, o uso de corrente pulsada para o MIG/MAG traz benefícios no contexto de algumas aplicações. Provavelmente, uma das poucas desvantagens reside no custo do equipamento. A pulsação controlada de corrente provê maior versatilidade ao processo superando desta forma as limitações impostas pelas fontes MIG/MAG convencionais, mais notadamente no que concerne os modos básicos de transferência metálica (curto-circuito, globular e goticular/*spray*). Dentre os benefícios mais citados constam a possibilidade de soldagem fora de posição, maior penetração assim como a obtenção de um cordão de solda com aparência superficial e características geométricas mais adequadas. Do ponto de vista prático, não se pode desprezar a diminuição considerável de respingos, consequência da eliminação de curtos-circuitos na soldagem com MIG/MAG Pulsado. Não obstante, dificilmente esse fator será fundamental para a escolha do processo pulsado em detrimento do processo convencional. Outros fatores podem ser mais cruciais neste caso como se verá mais adiante.

A estratégia do MIG/MAG Pulsado pode ainda ser descrita de uma forma bastante sintética:

“[...] a concepção de corrente pulsada para o controle da transferência metálica não é nada mais do que uma metodologia de antecipação de picos de corrente

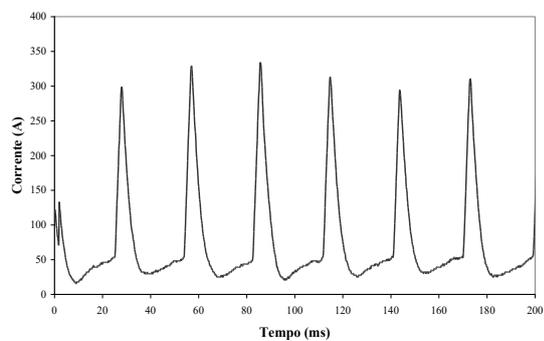
razoavelmente complexo, com diversos fatores envolvidos como se constata no capítulo 3 do livro “*Welding Metallurgy*” escrito por Kou (2003).

para transferir as gotas metálicas antes que estas curto-circuitem na peça” (DUTRA; OLLÉ; KIRST, 1992).

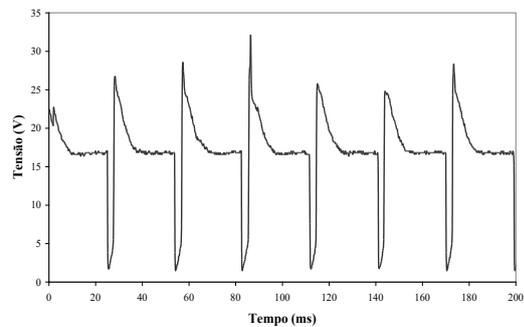
A Figura 2 representa bem a citação anterior retratando oscilogramas de corrente e tensão para soldagens realizadas em uma chapa de aço carbono de 3 mm de espessura com o processo operando em curto-circuito (a) e com corrente pulsada (b). A corrente média para ambas foi praticamente a mesma (as condições de soldagem são mostradas na própria figura). O gás de proteção foi diferente para cada situação (Ar + 25% CO₂ para curto-circuito e Ar + 8% CO₂ para corrente pulsada). O motivo para tal está em extrair o melhor desempenho possível para cada modalidade do processo MIG/MAG, empregando o gás de proteção considerado mais adequado para cada situação. O oscilograma de corrente (a) (processo operando em modo curto-circuito) é característico de boa estabilidade de transferência metálica, denotada pela regularidade no intervalo entre um pico de corrente e outro. Na soldagem em modo pulsado, o intervalo entre cada pulso de corrente é controlado de forma a ser praticamente o mesmo, “substituindo” os picos de corrente e produzindo transferência metálica goticular com mínima geração de respingos.

A aparência e o perfil dos cordões de solda produzidos são distintos conforme demonstra a Figura 3. O cordão produzido com corrente pulsada (c e d) é mais uniforme, apresenta maior molhabilidade, é mais largo e mais profundo do que o produzido em curto-circuito. Isto pode ser explicado pelas diferenças entre o tipo de transferência metálica que o processo MIG/MAG produz quando opera em curto-circuito ou em corrente pulsada. No processo em curto-circuito, o arco se extingue a cada contato com a poça de fusão e, conseqüentemente, menos calor é transferido para o metal de base. O processo pulsado permite que o arco se mantenha aberto e transferindo calor para a poça de fusão durante toda a operação de soldagem e assim, produzindo uma poça de fusão mais fluída. Sob outro ponto de vista, como no processo pulsado os sinais de corrente e tensão estão sempre em consonância (ver Figura 2), para uma mesma corrente de soldagem e mesma velocidade de alimentação de arame, a potência de arco será sempre maior no processo pulsado (2295 W) do que em curto-circuito (1461 W). Da mesma forma, a tensão também será maior no processo pulsado (22,9 V) do que em curto-circuito (16,9 V).

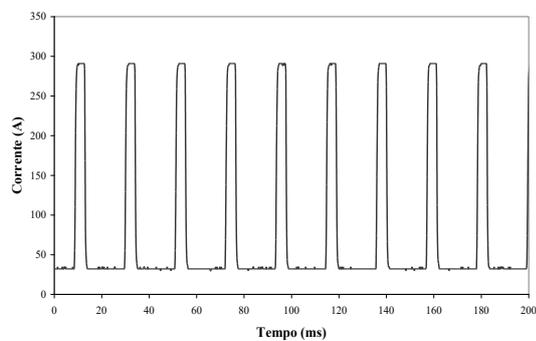
Figura 2 (a) Oscilograma de corrente em modo curto-circuito; (b) Oscilograma de tensão em modo curto-circuito; (c) Oscilograma de corrente em modo pulsado; (d) Oscilograma de tensão em modo pulsado.



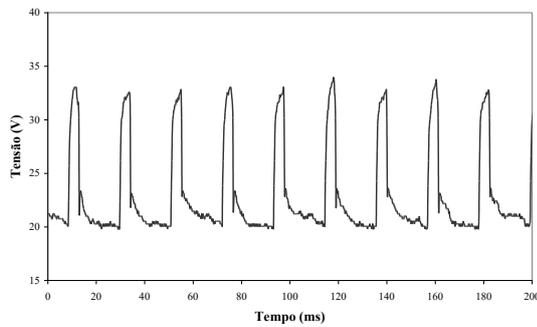
(a)



(b)



(c)



(d)

CURTO-CIRCUITO

Tensão Média: 16,9 V

Corrente Média: 85 A

Potência: 1461 W

Velocidade de Alimentação de Arame: 33,3 mm/s (2,0 m/min)

Gás de Proteção: Ar + 25%CO₂

Arame: ER 70S-6, 1,2 mm

Velocidade de Soldagem: 3,33 mm/s (20 cm/min)

PULSADO

Tensão Média: 22,9 V

Corrente Média: 83 A

Potência: 2295 W

Velocidade de Alimentação de Arame: 33,3 mm/s (2,0 m/min)

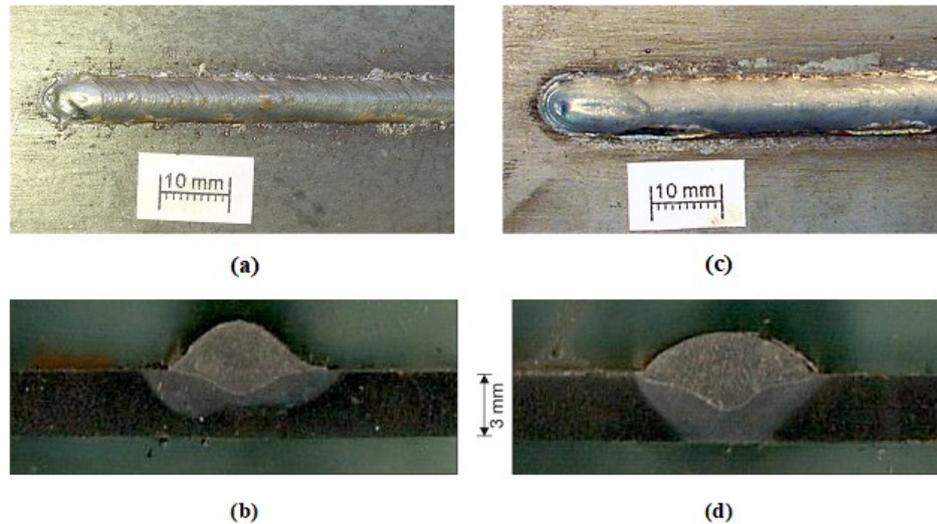
Gás de Proteção: Ar + 8%CO₂

Arame: ER 70S-6, 1,2 mm

Velocidade de Soldagem: 3,33 mm/s (20 cm/min)

Fonte: Cirino (2009).

Figura 3 - Correspondentes aos oscilogramas da Figura 2: (a) Aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo curto-circuito; b) macrografia correspondente a (a); c) aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo pulsado; d) macrografia correspondente a (c).



Fonte: Cirino (2009)

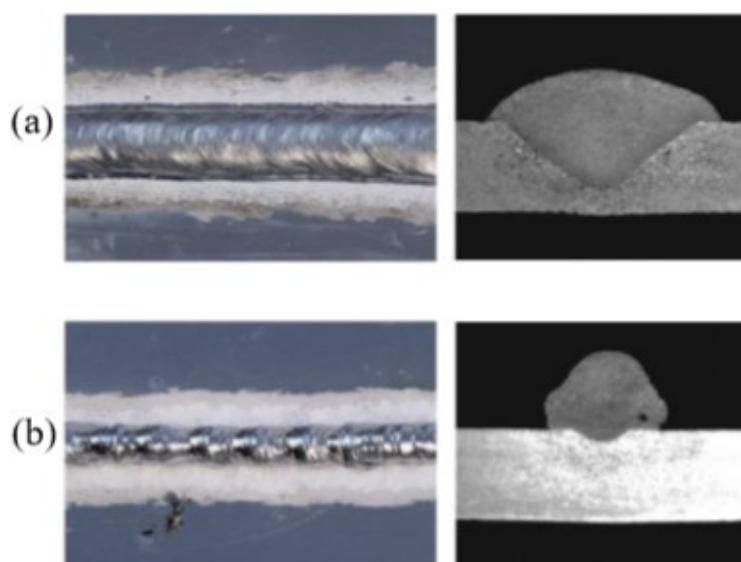
Embora as vantagens sejam evidentes no caso do aço ao carbono, o emprego de MIG/MAG Pulsado não chega a ser crítico para o sucesso de uma operação de soldagem. Muitas dificuldades podem ser contornadas de maneiras razoáveis e menos custosas do ponto de vista do equipamento, com resultados satisfatórios. Por outro lado, na soldagem MIG de ligas de alumínio, mais especificamente chapas finas (1 mm – 3 mm, aproximadamente), a aplicação do processo pulsado se apresenta como solução mais adequada (KAH; SUORANTA; MARTIKAINEN, 2012). O coeficiente de condutividade térmica do alumínio é consideravelmente maior que o do aço⁶ o que implica, na prática, que uma fonte de calor deve ser mais intensa na soldagem do alumínio (MATHERS, 2002). O que Mathers provavelmente quer dizer com isso, é que o calor desenvolvido na região de soldagem deve ser suficiente para

⁶ À temperatura de 100°C o aço SAE 1020 tem condutividade térmica $k = 51 \text{ W/mK}$ (ASM, 1993). Na mesma temperatura, o alumínio AISI 1050 tem $k = 231 \text{ W/mK}$, quatro vezes e meia mais condutivo termicamente (ASM, 1990).

compensar o calor que rapidamente se difunde através da peça de trabalho e é facilmente perdido para o ambiente.

Neste caso, em função do relatado no parágrafo anterior, o processo pulsado tem ampla vantagem sobre o processo convencional com transferência metálica em curto-circuito conforme demonstra a Figura 4. A soldagem com processo pulsado forneceu uma potência de 2332 W e gerou um depósito com maior molhabilidade, penetração e melhor aparência superficial. A potência no processo convencional foi consideravelmente menor (1450 W) de modo que a aparência, molhabilidade e penetração são simplesmente inaceitáveis (MARQUES, 2017).

Figura 4 - Cordões sobre chapa de alumínio: (a) MIG/MAG Pulsado - Potência: 2332 W; (b) MIG/MAG Convencional/Curto-circuito - Potência: 1450 W.



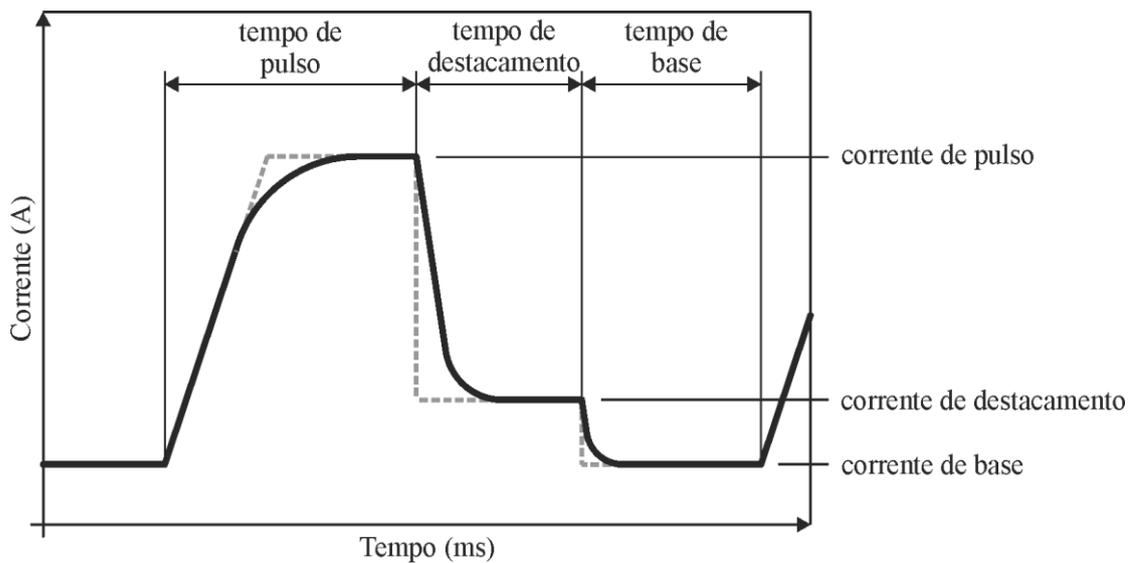
Adaptado de Marques (2017).

2.1.3 Formas de onda de corrente

Ainda que a forma de onda retangular retratada anteriormente na Figura 1 seja satisfatória dentro da abordagem do processo pulsado, fabricantes de fontes de soldagem têm apresentado formas de onda mais complexas que introduzem parâmetros complementares àqueles considerados básicos. Por exemplo, a forma de onda empregada no sistema sinérgico da fonte de soldagem Fronius CMT *Advanced* 4000R (FRONIUS, 2020), apresentada na Figura 5, difere-se da retangular principalmente pelas rampas de corrente (no início e no fim do pulso)

e por uma fase de destacamento de gota caracterizada por tempo de destacamento (t_d) e corrente de destacamento de gota (I_d) de valor inferior a I_p , mas superior a I_b .

Figura 5 - Forma de onda avançada para MIG/MAG Pulsado.



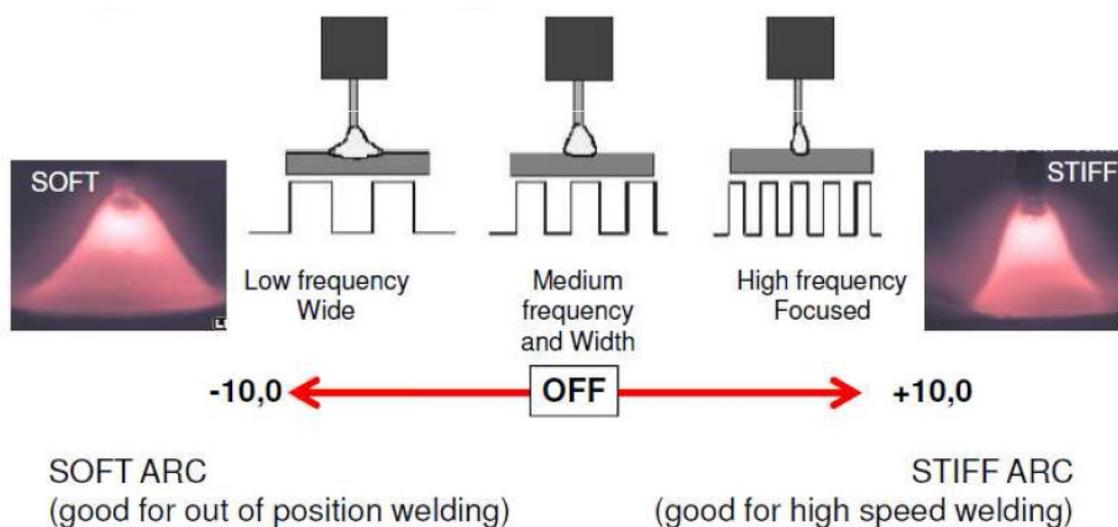
Adaptado de: Wu, Chen e Lu (2005).

No que diz respeito ao momento adequado para o destacamento de gota, Ueguri, Hara e Omura (1985) recomendam que o destacamento de gota não ocorra durante o pulso. Praveen, Kang e Yarlagadda (2006) reportam que o destacamento durante a base proporciona uma transferência metálica mais suave. Já Scotti e Ponomarev (2008) demonstram certa preocupação quanto ao destacamento na base, pois sempre há a possibilidade de a gota metálica não completar o destacamento devido à força eletromagnética não ser suficiente durante a base para superar a tensão superficial que atua retendo a gota. Deste modo, algumas formas de onda, tal como o da Fronius, passaram a incorporar uma fase adicional a fim de assegurar o destacamento da gota. Já as rampas de elevação/decaimento de corrente podem ser associadas à atenuação de ruído sonoro conforme afirma Harwig (2003) embora não se tenha constação em seu trabalho. O manual da Lincoln *Product and Procedure Selection* (LINCOLN, 2015) também atribui a rampa uma função de diminuição de ruído sonoro e traz mais detalhes quanto a rampa de decaimento de corrente chamada de *tail-out* em formas de onda avançadas, como segue:

“*Tail-out* está associado com o decaimento de corrente do pulso até a base. O aumento do tempo de tail-out aumenta a corrente média e aumenta marginalmente a penetração. O tempo de tail-out é aumentado para promover um aumento na fluidez da gota metálica. Isto resulta em maior molhabilidade, menor ruído e maior fluidez da poça de fusão” (LINCOLN, 2015).

Além de apresentarem formas de onda mais complexas, os sistemas sinérgicos das fabricantes Lincoln e OTC, trazem sistemas que se propõem a controlar certas características do arco volaico, mais especificamente sua forma. A ilustração da Figura 6 é proveniente de um anúncio da Lincoln (2015) e mostra que o sistema chamado de “*Wave Control*” atua na frequência de pulso para tornar o arco voltaico menos constricto (“*soft*”) ou mais constricto (“*stiff*”), cada qual mais adequado para uma determinada situação.

Figura 6 -Anúncio da Lincoln apresentando o sistema *Wave Control* .



Fonte: Lincoln (2015).

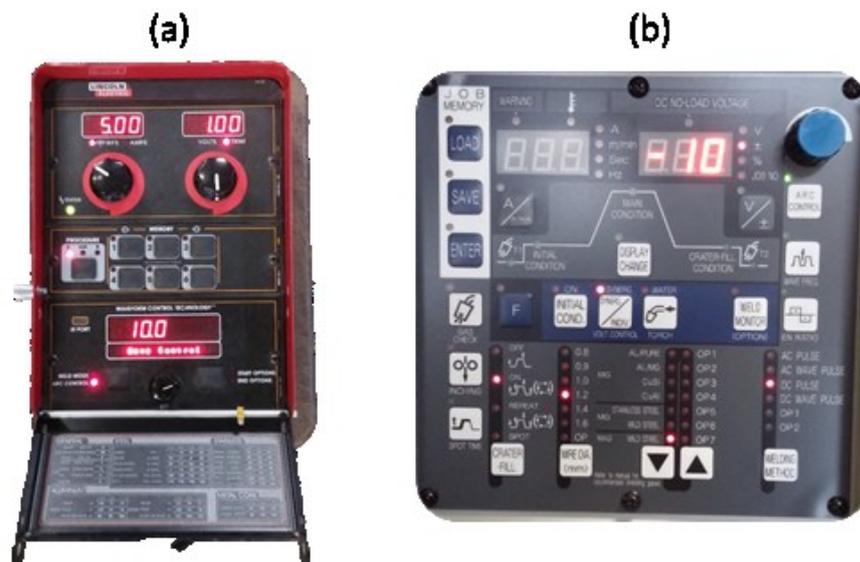
De acordo com o manual da fonte *Power Wave 455M/STT* (LINCOLN, 2013):

“...[Wave Control] ajusta o foco ou a forma do arco. Em valores maiores do que 0,0, há aumento da frequência de pulso enquanto diminui a corrente de base resultando em um arco constricto e rígido, adequado para a soldagem de chapas finas com altas velocidades de soldagem. Valores de Wave Control menores do que 0,0 promovem a diminuição da frequência de pulso, resultando em um arco suave, adequado para a soldagens fora-de-posição”.

Em suma, este sistema permite regulagem de 0 até ± 10 sendo que em -10 se tem a menor frequência de pulso (arco suave) e em +10 se tem maior frequência de pulso (arco rígido). A

Figura 7.a mostra a interface da fonte *Power Wave 455M/STT* com o valor de *Wave control* regulado para +10. A fonte de soldagem OTC DW-300 apresenta um sistema similar denominado *Arc Control* com o mesmo objetivo. A regulagem é semelhante, contudo, segundo o manual desta fonte (OTC, 2012), em -10 se tem um arco um arco rígido enquanto em +10 o arco é suave. A Figura 7.b mostra a interface da OTC DW-300 com o *Arc Control* regulado para -10.

Figura 7 - (a) Interface da fonte *Power Wave 455M/STT* com o valor de *Wave control* regulado para +10. (b) Interface da fonte OTC DW-300 com valor de *Arc Control* regulado para -10.



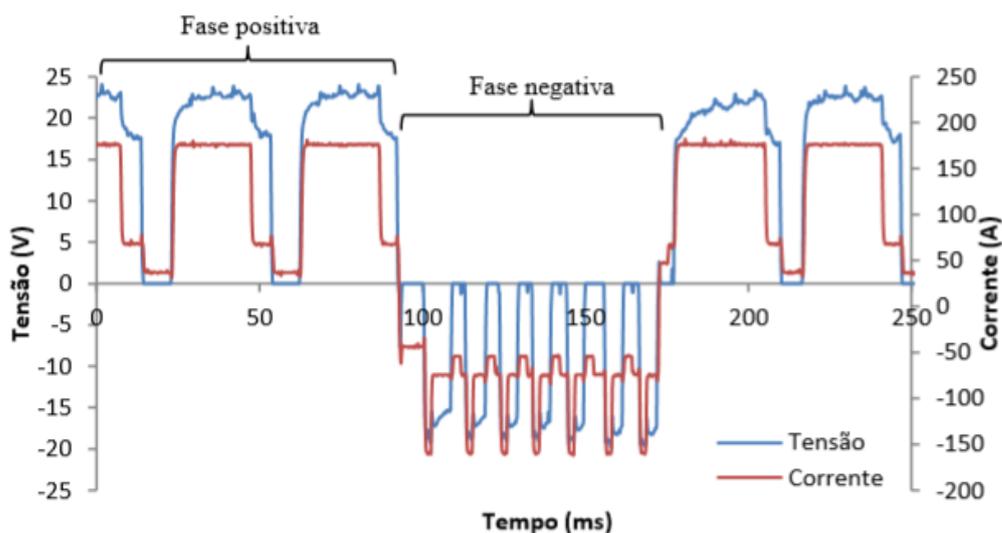
2.2. PROCESSO MIG/MAG PULSADO CA

Dentre as diversas modalidades do processo MIG/MAG encontra-se o processo VP-GMAW ou AC-MIG. Como não há um consenso quanto a denominação mais adequada, se sugere um conceito para determinar se um processo é VP (*variable polarity*) ou AC (*alternating current*): sugere-se que o termo AC ou CA em português, se refira a uma alternância de polaridade dentro de a cada período de transferência metálica seguindo aproximadamente o conceito original de corrente alternada, proveniente da geração e distribuição de eletricidade, onde se alterna a polaridade a cada período. Com corrente alternada ambos os efeitos (positivo

e negativo) estão no mesmo período de transferência metálica. Assim um cordão de solda realizado com um processo CA deverá ter características praticamente uniformes ao longo de todo seu comprimento.

Quando em polaridade variável, o processo de soldagem alterna polaridade em blocos de períodos de transferência (como por exemplo, o CMT *Advanced*), os efeitos obtidos são da alternância de dois valores médios, os quais, inclusive, podem ser modulados independentemente, se tem a polaridade variável. Em outras palavras, um período de transferência metálica é totalmente positivo, com característica e influência sobre o cordão de solda exclusivas da polaridade positiva. O período seguinte é totalmente negativo com características e influência sobre o cordão de solda exclusivas da polaridade negativa. Desta forma o cordão de solda pode ter características superficiais e geométricas diferentes ao longo do seu comprimento. A Figura 8 apresenta o funcionamento da forma de onda para o processo CMT *Advanced*. Na fase positiva se tem o processo MIG CMT normal em polaridade positiva com o eletrodo entrando em contato com a poça de fusão, sendo o destacamento de gota assistido por intermédio da retração do arame-eletrodo. O período seguinte, na fase de polaridade negativa, a transferência da gota se dá por voo livre ou transferência goticular. Esta abordagem de diferentes polaridades em períodos consecutivos caracteriza um processo de polaridade variável ou *variable polarity*.

Figura 8 - Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT *Advanced*. Arame de alumínio ER4043, Ø1,2 mm. Fase positiva e negativa em diferentes períodos caracterizam um processo de polaridade variável



Fonte: Marques (2017).

Tendo em vista este conceito, a denominação MIG/MAG Pulsado CA⁷ será empregado neste trabalho. Este processo visa aliar características desejáveis da modalidade MIG/MAG Pulsado (transferência metálica controlada) e do MIG/MAG convencional trabalhando em CC- (maior taxa de fusão e reduzido calor imposto à peça). Embora estas características sejam bem documentadas, algumas considerações se fazem necessárias.

2.2.1 A Questão da polaridade nos processos CA

O que será apresentado a seguir pode soar como uma digressão em um primeiro momento, todavia é importante para um entendimento mais profundo do processo MIG/MAG trabalhando com alternância de polaridade (CA) e seus efeitos sobre o comportamento do arco além das consequências na taxa de fusão e nas características geométricas no cordão de solda.

Para tanto, se faz necessário abordar inicialmente o processo TIG quando aplicado ao alumínio. Para a soldagem de ligas alumínio com processo TIG, a técnica mais adequada é o emprego de corrente alternada. No caso de alguns metais, como o alumínio, o emprego da condição CC-⁸ não trará bons resultados. O aspecto mais relevante, e que torna necessário o emprego de recursos diferenciados para a soldagem TIG do alumínio, é a camada microscópica de óxido do mesmo metal (Al_2O_3) que se forma sobre a superfície do metal e que, se danificada, rapidamente se reconstitui na maioria dos ambientes (ASM, 1990). Esta camada de óxidos garante ao alumínio boa resistência a corrosão, porém se constitui na principal dificuldade da soldagem a arco do alumínio e suas ligas.

A barreira de óxidos tem alto ponto de fusão, cerca de 2060° C (MATHERS, 2002), temperatura que a princípio não seria um problema, já que o arco atinge temperaturas muito superiores a esta, de modo que se poderia supor que esta barreira será facilmente fundida. Contudo, no processo TIG na condição CC-, isto não acontece, pois, a alta condutividade térmica do alumínio permite que o calor rapidamente se difunda através da peça a ser soldada fundindo-a, mas mantendo o óxido intacto. Os aços, tais como o as ligas de alumínio, formam

⁷ Quando aplicado ao alumínio, o processo será denominado MIG Pulsado CC ou CA.

⁸ A condição CC- é normalmente empregada e mais adequada para soldagem TIG de aços em geral.

camadas de óxidos sobre suas superfícies, todavia o ponto de fusão destas é próximo ao do substrato. Além disso, a difusividade térmica dos aços é menor, o que contribui para que a soldagem a arco dos mesmos não apresente problemas, ao menos a este respeito. Ressalta-se que este problema inexistente para a soldagem MIG do alumínio sendo que CC+ é a polaridade convencionalmente empregada sendo de maior estabilidade para este processo. A chave está no fenômeno conhecido como limpeza catódica que se estabelece quando o polo negativo (a partir do qual os elétrons são emitidos ou cátodo) está na peça (CC+). Diferentemente do eletrodo de tungstênio, o alumínio é um “cátodo frio” o que significa que a emissão de elétrons não ocorre pelo mecanismo termiônico⁹. Logo a emissão de elétrons a partir de um cátodo não-termiônico ocorre predominantemente por efeito de campo¹⁰.

O fenômeno conhecido como limpeza catódica, nada mais é do que a remoção de óxidos em tempo real durante a soldagem que acontece justamente em função do mecanismo de emissão por efeito de campo (SARRAFI; LIN; KOVACEVIC, 2009). Uma explicação razoável para a limpeza catódica baseia-se no fato de que, durante a polaridade positiva, ocorre a formação de múltiplas manchas catódicas microscópicas¹¹ (onde os fenômenos relacionados a emissão de elétrons ocorrem) sobre a região onde está ocorrendo a soldagem. Estas manchas catódicas, ou pontos catódicos, duram por um determinado tempo, ou seja, “nascem” e “morrem” com grande rapidez durante o tempo em que dura a fase de polaridade positiva (no caso do emprego de um processo trabalhando em CA). Durante seu curto tempo de vida, estas manchas catódicas seriam capazes de promover a remoção ou a fusão da camada de óxidos.

Tentando elucidar melhor esta questão, a Figura 9 mostra um modelo que faz a comparação entre as condições polaridade negativa e a positiva, onde é caracterizado que a área de contato entre o arco e a superfície da peça de trabalho é muito maior em A1 (mancha anódica)

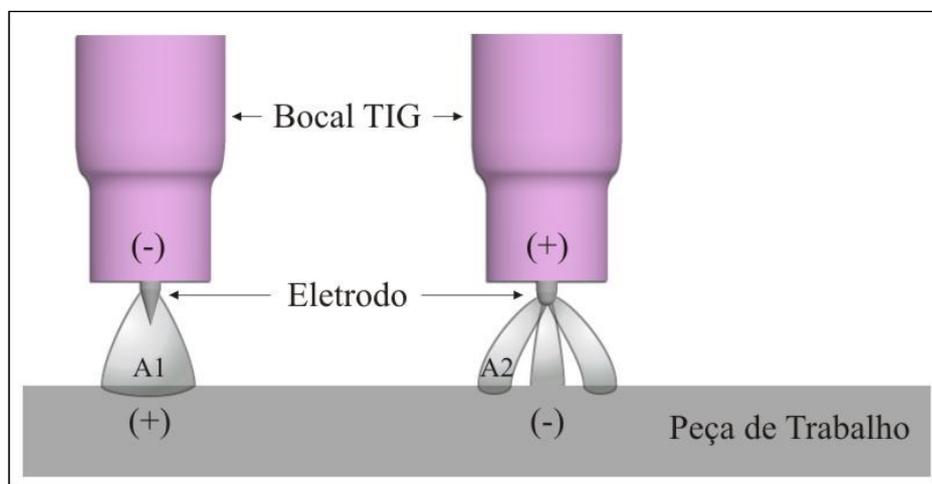
⁹ A emissão termiônica é um fenômeno comum em válvulas eletrônicas e tubos de raios catódicos e, basicamente, resulta do aquecimento do material a uma temperatura suficientemente alta para causar a ejeção de elétrons de sua superfície (MODENESI, 2003). Segundo Lancaster (1986), nos processos de soldagem, a emissão de elétrons por efeito termiônico ocorre para cátodos constituídos de materiais de alto ponto de ebulição (acima de 4000 K), tais como o tungstênio.

¹⁰ Alguns mecanismos foram propostos para explicar a emissão de elétrons a partir de cátodos formados por materiais como o alumínio como, por exemplo: efeito de campo, efeito conjunto de campo e termiônico, liberação de íons positivos em vapores formados no cátodo (MODENESI, 2003). No entanto, no contexto deste trabalho, a emissão de elétrons por efeito de campo será considerada como o mecanismo predominante durante as fases de corrente positivas para os processos em estudo.

¹¹ Alguns trabalhos se referem a este fenômeno como “mobilidade do ponto catódico” como fazem, por exemplo, Pahn et al. (2019). Contudo, o que se observa em filmagens de alta velocidade é a formação de mais de um ponto ou mancha catódica ao mesmo tempo.

do que em A2 (mancha catódica). Com isso, supõe-se que, para uma dada corrente de soldagem, tenha-se uma densidade de energia muito maior em A2. Esta densidade de energia é, provavelmente, insuficiente para que ocorra a emissão de elétrons por intermédio do mecanismo termiônico, mas concentra calor suficiente para que ocorra a fusão ou vaporização da camada de Al_2O_3 (CIRINO; DUTRA, 2009) (DUTRA; CIRINO; SILVA, 2010).

Figura 9 - A1) Área de atuação da mancha anódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade negativa; A2) Área de atuação da mancha catódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade positiva.



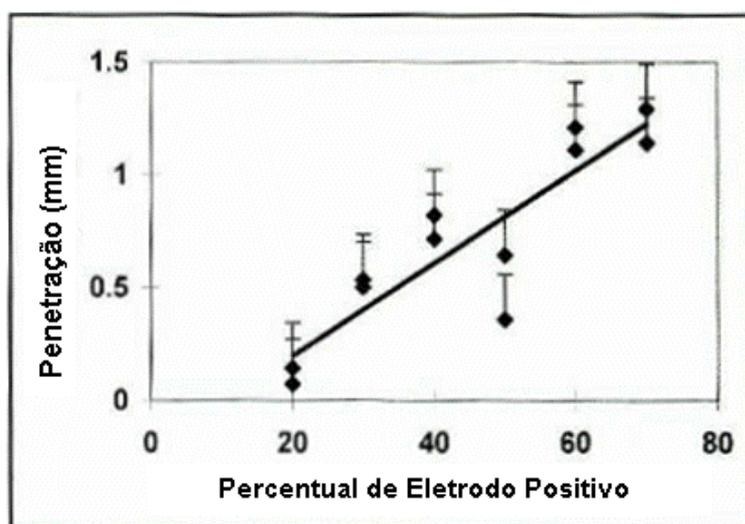
Fonte: Cirino (2009).

Teoricamente, a soldagem TIG do alumínio poderia ser efetuada com a utilização de corrente contínua e eletrodo ligado ao polo positivo (CC+). Embora existam procedimentos e técnicas que permitam o uso de CC+ no processo TIG em ampla faixa de corrente (ARCLINE PP, 2017) isto não é factível com o uso de equipamentos convencionais, devido à instabilidade de arco e a acentuada deterioração do eletrodo de tungstênio nesta condição. Por esta razão, emprega-se uma condição intermediária, ou seja, a utilização de corrente alternada (TIG CA ou AC-GTAW). Assume-se convencionalmente que durante a fase positiva se tem a limpeza catódica (emissão por efeito de campo) e na fase negativa, a fusão do metal de base (emissão termiônica). Isto está em concordância com o entendimento convencional sobre o processo TIG (ASM, 1993; AWS, 1991) que infere que o uso de CC- resulta em um balanço de energia favorável à fusão do metal de base (70% do calor gerado pelo arco é imposto ao metal de base). Em outras palavras, uma soldagem TIG em CC- resultaria em cordões de solda relativamente

estreitos e profundos. A situação seria exatamente a oposta quando na condição CC+, gerando cordões mais largos e menos profundos como resultado. Cabe salientar que a literatura convencional não especifica para quais tipos de material este comportamento ocorre, então se supõe que as informações são válidas para todos os materiais.

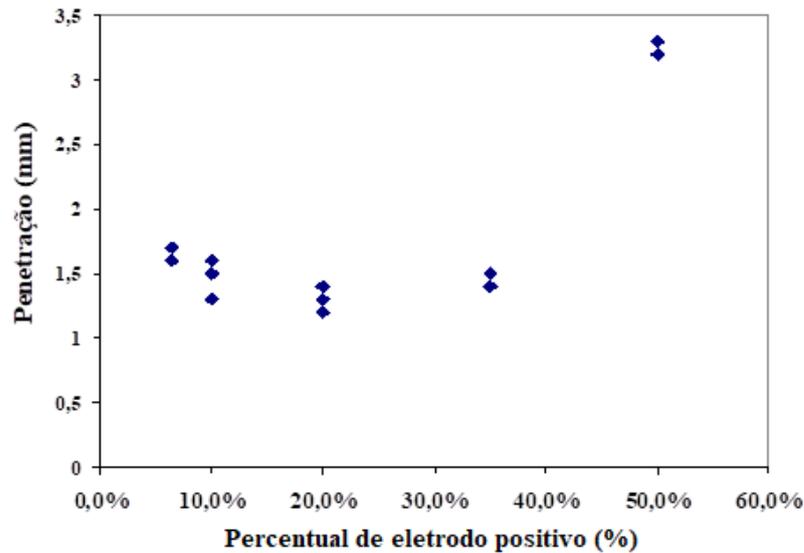
Seguindo essa linha de raciocínio, fabricantes, autores e pesquisadores são induzidos à suposição de que um maior tempo de atuação da polaridade negativa em relação à polaridade positiva produz cordões de solda com maior penetração e o aumento do tempo de atuação da polaridade positiva conduz a uma maior ação de remoção de óxido em detrimento da penetração de solda. Esta compreensão do processo TIG CA poderia ser considerada razoável não fossem os resultados apresentados por Yarmuch e Patchett (2007) que apontam em uma direção oposta. Estes últimos determinaram uma relação diretamente proporcional entre o tempo de atuação da polaridade positiva e a penetração de solda para uma liga de Al-Mg AISI 5083. À medida que o tempo de duração da fase positiva aumentou em relação ao período total do ciclo de corrente (ou porcentagem de eletrodo positivo), aumentaram largura e penetração de solda. A Figura 10 mostra alguns dos resultados encontrados por estes autores, no que diz respeito a penetração. Este resultado foi confirmado por Dutra, Cirino e Silva (2010) conforme ilustrado na Figura 11, embora o aumento de penetração ocorra somente na faixa 20-50% de percentual de eletrodo positivo. A Figura 12 apresenta as macrografias para os ensaios que geraram o gráfico da figura anterior.

Figura 10 - Resultados de Yarmuch e Patchett: à medida que aumentou o tempo de atuação da polaridade positiva (percentual de eletrodo positivo) aumentou também a penetração.



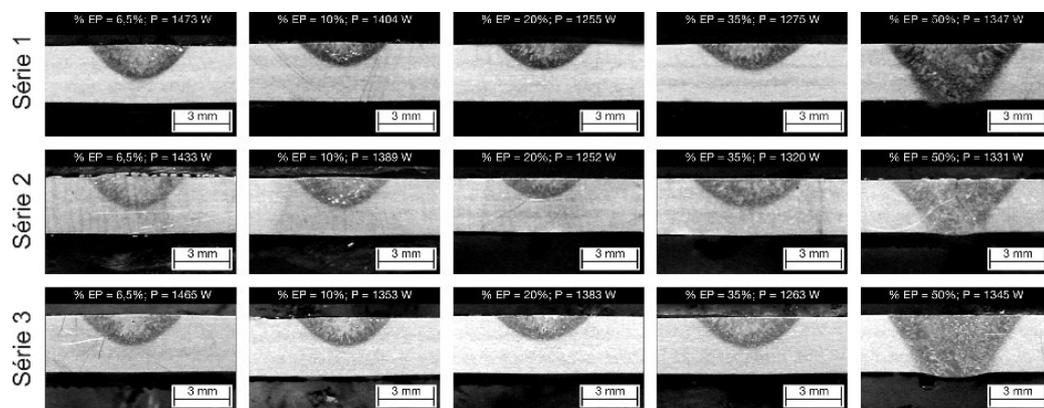
Adaptado de: Yarmuch e Patchett (2007).

Figura 11 - Relação entre percentual de eletrodo positivo (%) e penetração de solda (mm).



Adaptado de: Cirino (2009).

Figura 12 - Macrografias das seções transversais correspondentes todas as séries de ensaios realizados com variação de %EP ou percentual de eletrodo positivo.



Fonte: Cirino (2009).

A explicação para estes resultados reside no fato de que, ao contrário do que possa se supor a partir da literatura convencional, durante as fases positivas no processo TIG CA, a emissão por efeito de campo produz maior aquecimento do eletrodo (neste caso, o metal de base) aumentando sua capacidade de fusão quando de sua aplicação ao alumínio. Isto ocorre por dois motivos:

- (a) A emissão de elétrons a partir de um catodo frio exige um aumento de tensão em uma região microscópica conhecida como região de queda catódica localizada acima da poça de fusão o que aumenta o calor desenvolvido no metal de base (FUERSCHBACH, 1998).
- (b) Ao contrário do que acontece quando o mecanismo de emissão é termiônico, a emissão de campo não gera o chamado *cooling effect* (FUERSCHBACH, 1998) ou *freezing effect* (LESNEWICH, 1958). Este efeito corresponde a perda de energia sofrida pelo eletrodo em função da emissão de cada elétron¹².

Retornando ao processo MIG/MAG, as características da condição CC- (eletrodo ligado ao polo negativo da fonte de soldagem) neste processo também já foram explicadas como uma inversão no balanço de energia que é transferido ao eletrodo e a peça de trabalho (TALKINGTON, 1998). Mais detalhadamente, na polaridade CC-, 70% da energia gerada no arco voltaico seria transferida para o eletrodo e o restante à peça de trabalho; na condição CC+ seria justamente ao contrário¹³. Deixando de lado qualquer balanço de energia, a maior taxa de fusão na condição CC- é geralmente atribuída ao comportamento do arco voltaico que escala a extensão sólida do eletrodo como na Figura 13. Desta forma, o arco voltaico envolve grande parte do eletrodo o que provoca um pré-aquecimento responsável pela maior taxa de fusão em comparação com o mesmo processo em CC+ e nas mesmas condições. Nem sempre mencionado é o fato de que a escalada se dá devido ao arco voltaico buscar a camada de óxido presente na superfície da extensão do eletrodo que reconhecidamente facilita a emissão de elétrons e a manutenção do arco. A Figura 13 mostra também os pontos de emissão de elétrons na extensão do eletrodo, denotado pelos pontos de maior intensidade luminosa característicos de emissão por efeito de campo. Conforme defendido por Yarmuch e Patchett (2007), neste

¹² No processo TIG trabalhando em CC+, o eletrodo de tungstênio não mais emite elétrons. Isto significa que não há mais um efeito natural de resfriamento do eletrodo para cada elétron emitido (*cooling effect* ou *freezing effect*). Neste caso o eletrodo fica sem nenhuma proteção natural contra a energia do arco, daí o desgaste demasiado do eletrodo de tungstênio devido a fusão.

¹³ Os balanços de energia (70-30%, 30-70%), tanto para TIG como MIG/MAG e costumeiramente apresentados na literatura, são, muito provavelmente, estimativas sem maior confirmação científica. De fato, este balanço de energia não é muito fácil de obter devido ao grande número de fatores envolvidos. Fuerschbach (1998) realizou ensaios usando calorímetros para determinar o calor desenvolvido na peça de trabalho para diferentes porcentagens de corrente negativa com o intuito de lançar alguma luz sobre esta questão. Infelizmente, os resultados apresentados mostram dispersão razoável nos valores coletados e são, ao menos na opinião do autor do presente trabalho, inconclusivos.

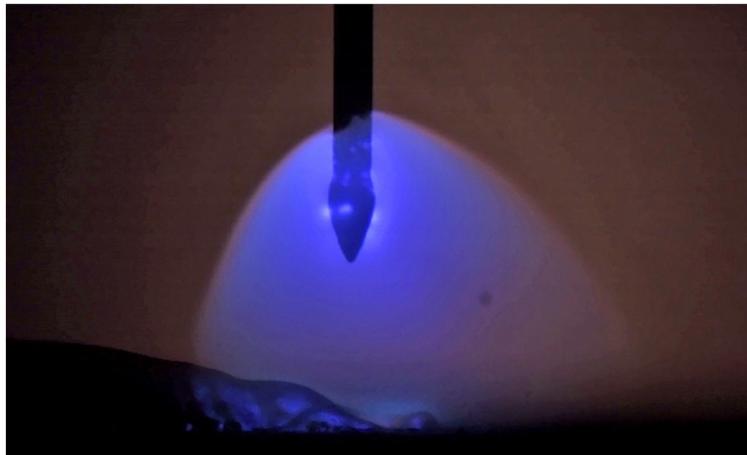
caso o tipo de emissão de elétrons predominante é por efeito de campo, fenômeno que produz maior energia no cátodo aumentando assim a taxa de fusão. Nas palavras dos autores:

“O efeito, mais claramente documentado, da emissão de elétrons a partir de um cátodo frio na geração de calor é a taxa de fusão no processo MIG/MAG, que é sempre maior na polaridade negativa.” (YARMUCH; PATCHETT, 2007)

A despeito de quaisquer interpretações, os fenômenos de emissão e de escalada do arco coexistem (SCOTTI; PONOMAREV, 2008) e contribuem cada qual a seu modo para a maior fusão do eletrodo em CC-.

A maior taxa de fusão pode ser desejável do ponto de vista da produtividade, no entanto, o processo MIG/MAG convencional na condição CC- é considerado bastante instável, sujeito a formação de respingos em excesso, repulsão de gota metálica, cordões de solda de baixa penetração, molhabilidade limitada e transferência metálica do tipo globular (KIM; CHUNG, 2016). Ainda que o trabalho de Souza, Rezende e Scotti (2009) demonstre que com o uso de uma mistura de gás adequada (98%Ar + 2%O₂) é possível obter uma transferência estável e com baixo nível de respingos para arames de aço, ainda assim, a baixa molhabilidade persistiu. Ademais, este trabalho se atem a dois valores de corrente média (150 A e 250 A) e constatam que a transferência metálica se manteve do tipo globular em 150 A. Tudo leva a crer que a condição CC- estável fica limitada a correntes médias altas, 250 A, por exemplo. Na prática, este fato inviabiliza seu emprego na soldagem de chapas de pequena espessura ou operações fora de posição.

Figura 13 - Fenômeno da escala do arco na polaridade negativa e formação de pontos de emissão de elétrons na extensão do eletrodo.



Fonte: Dutra et al. (2016).

Sendo assim, o processo MIG/MAG Pulsado CA baseia-se no controle da forma de onda de corrente com a finalidade de contornar estas limitações. Esta forma de onda incorpora uma fase negativa delimitada pelos parâmetros I_p (corrente de pulso negativa) e t_n (tempo de negativo) conforme apresentado na Figura 14.a. A fase negativa visa incrementar a taxa de fusão e reduzir o calor imposto a peça sem comprometer a estabilidade do processo já que o destacamento de gota se dá de maneira controlada durante a fase positiva do processo. Inicialmente o processo MIG/MAG Pulsado CA foi apresentado como uma solução para a soldagem de chapas finas, aproveitando da menor imposição de calor à peça, reduzindo o risco de perfurações e mordeduras, por exemplo. O trabalho de Tong et al. (2001) aposta na sua capacidade de preenchimento da raiz em juntas sobrepostas formadas por chapas de alumínio quando há uma irregularidade ou espaçamento (*gap*) entre as mesmas¹⁴. Esta capacidade de preenchimento de juntas foi denominada de *gap bridging ability* e, em conjunto com a menor imposição de calor a peça, definiu o processo MIG/MAG Pulsado CA como mais apropriado até então para este tipo de aplicação. Harwig (2003) explora a capacidade de *gap bridging ability*, porém para chapas de aço ao carbono (Figura 15).

¹⁴ Esta demanda surgiu inicialmente na indústria automobilística e está relacionada a diminuição de peso na carroceria de automotivos e o uso de alumínio como alternativa para alcançar este objetivo (UYEAMA ET AL., 2005).

Figura 14 - (a) Forma de onda para básica para MIG/MAG Pulsado CA. (b) Forma de onda avançada para MIG/MAG Pulsado CA que incorpora um pulso de corrente na fase negativa.

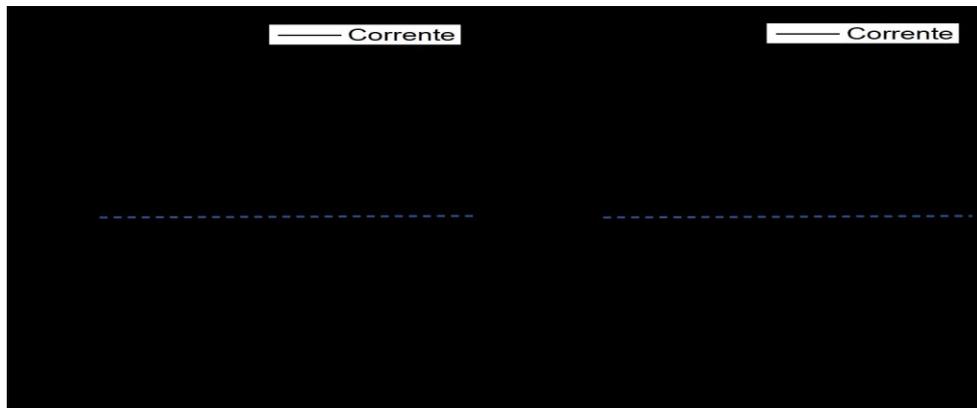
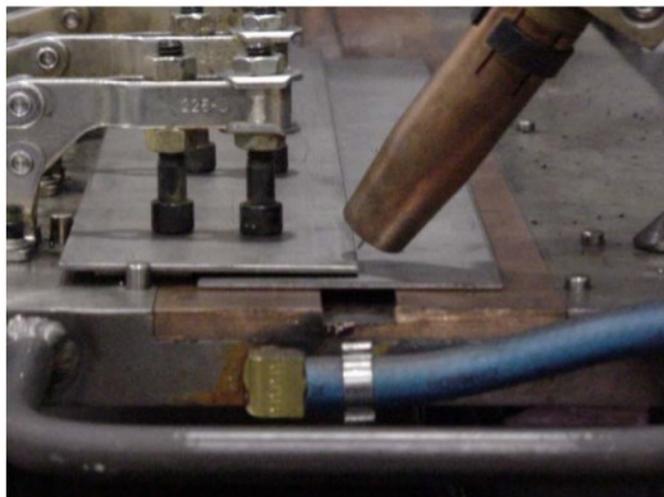


Figura 15 - Soldagem MIG/MAG Pulsado CA de junta sobreposta formada por chapas de aço ao carbono.



Fonte: Harwig (2003).

A Figura 14.b apresenta uma forma de onda de corrente mais complexa, proposto pela fabricante japonesa OTC que incorpora, além de uma fase negativa, um pulso negativo delimitado por I_{np} e t_{np} que segundo Arif e Chung (2014) tem como objetivo aumentar ainda mais a taxa de fusão. Entretanto, esta forma de onda avançado é empregado apenas para aços enquanto que uma forma com características idênticas à da Figura 14.a continua sendo empregada pela OTC para ligas de alumínio. Kim e Chung (2016) justificam necessidade de um pulso negativo para a soldagem de aços ao fato de que a aplicação do processo MIG/MAG

Pulsado CA a este material tende a gerar cordões de solda com penetração reduzida. Obviamente, isto soa contraditório. Se a maior preocupação é com a penetração de solda, o processo pulsado CA sequer deveria ser cogitado. No entanto, trabalhos mais recentes como o de Kim e Chung têm dado maior ênfase ao aumento de taxa de fusão do que a característica de menor imposição de calor da polaridade negativa. A idéia é aumento de produtividade, aplicando o Pulsado CA em chapas de maior espessura como fazem, por exemplo, Arif e Chung (2015).

Jaskulski (2009), vai além da questão da penetração de solda traz à tona a questão da estabilidade do processo em EN Ratios elevados¹⁵. Quando aplicado ao alumínio, o arco voltaico no processo CA é bastante estável, ou seja, o risco de extinção é bastante baixo. Outra questão observada por Jaskulski é de que não há real necessidade para o emprego de EN Ratios acima de 30% para o alumínio pois a partir deste ponto, os benefícios (sejam estes na taxa de fusão ou menor penetração) são desprezíveis. O mesmo não acontece para o aço, onde há proveito no emprego de maiores EN Ratios. Contudo, em EN Ratios elevados, há uma tendência a extinção de arco. Para solucionar este problema então, um pulso negativo foi incorporado a forma de onda para o processo MIG/MAG Pulsado CA. Esta forma de onda, dada pela Figura 14.b é empregada na fonte de soldagem OTC DW-300 (OTC, 2012) tanto para aço ao carbono quanto para aço inoxidável.

Outros autores buscaram demonstrar que o processo pulsado CA pode ter certa versatilidade como Joseph et al. (2003) e mais recentemente Park et al. (2009). Estes últimos apresentaram resultados positivos da aplicação do processo MIG Pulsado CA na soldagem dissimilar de aço galvanizado com ligas de alumínio. Outras pesquisas em aplicações que se distanciam razoavelmente da proposta inicial do processo são: Arif e Chung (2015) que consideram sua aplicação a chapas de maior espessura; Dutra, Silva e Marques (2015) que o emprega na soldagem de preenchimento de chanfros em chapas de alumínio naval AISI 5183 e; Dutra et al. (2016) no revestimento de chapas de aço (*cladding*) com liga de níquel.

¹⁵ O item seguinte (2.2.2) define mais detalhadamente a EN Ratio. Pode-se considerar sucintamente a EN Ratio como uma medida da polaridade negativa, que serve como referência para estimar a atuação da polaridade negativa e seus efeitos no resultado da soldagem. Uma EN Ratio muito alta significa que a polaridade negativa tem uma grande parcela de ação dentro processo de modo que a estabilidade do pode ser comprometida. Daí a inserção de um pulso negativo na forma de onda, sempre anterior a mudança de polaridade de negativo para positivo como forma de evitar extinção de arco.

2.2.2 A EN Ratio no processo MIG/MAG Pulsado CA

No que concerne a determinação de parâmetros (parametrização) do processo MIG/MAG Pulsado CA, é possível citar trabalhos como o de Vilarinho et al. (2009), Scotti e Monteiro (2012) e Dutra et al. (2015). Dentre algumas similaridades encontradas nestes trabalhos destacam-se:

1. Os trabalhos citados consideram uma forma de onda retangular;
2. Partem da premissa que, de modo a se obter um comprimento de arco constante, a taxa de fusão deve ser a mesma tanto na polaridade negativa quanto na positiva;
3. A determinação do tempo negativo (t_n) baseia-se na porcentagem de eletrodo negativo (%EN).

Embora os diagramas de sinal de corrente mostrem que na prática a forma de onda é apenas aproximadamente retangular (Figura 14.a), a simplificação citada no item 1 não compromete a eficiência das metodologias apresentadas. O item 2 é nada mais do que uma condição necessária para o bom funcionamento do processo. Definida pela Equação 3, a porcentagem de eletrodo negativo (%EN) merece uma maior atenção. Útil para a definição de parâmetros, a %EN pode deixar a desejar quando se deseja uma avaliação prévia dos efeitos da polaridade negativa no cordão de solda e na peça a ser soldada. Isto se deve ao fato de que a %EN leva em conta apenas os tempos não levando em conta os valores de corrente. Levar em consideração os valores de corrente não é uma ideia nova já que Tong et al. (2001) adotam esta abordagem ao definir o que se convencionou chamar de “EN Ratio” basicamente como a razão entre a área delimitada pela fase negativa (A_{en}) pela área total delimitada por todo o sinal de corrente em um ciclo ($A_{en} + A_{ep}$), conforme definido na Figura 16.

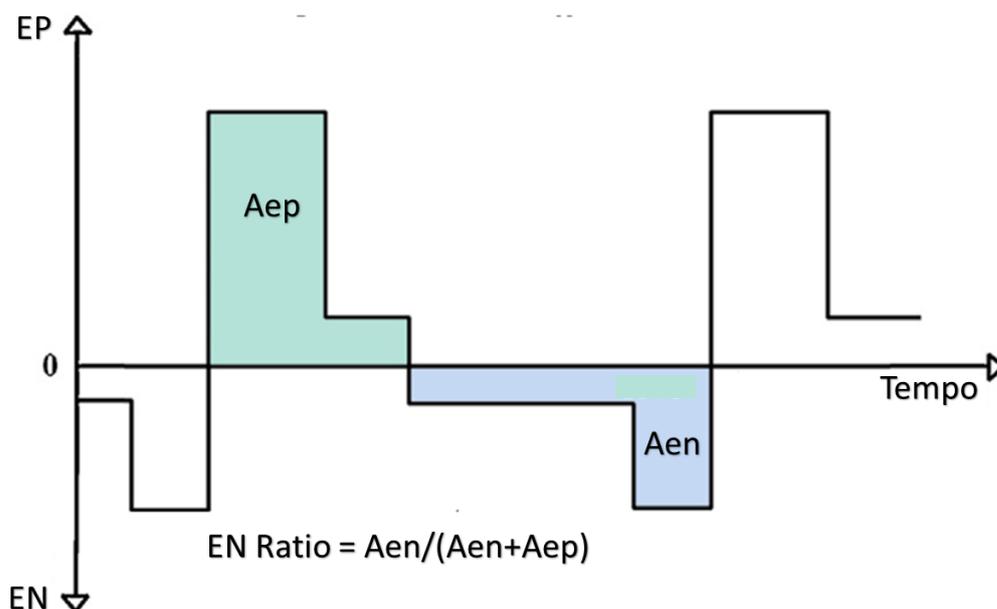
$$\%EN = \frac{t_n}{t_p + t_b + t_n} \quad (3)$$

De forma simplificada e considerando uma forma de onda retangular, a Equação 4 adaptada de Harwig (2003) pode ser empregada para estimar a *EN Ratio* para uma forma de

onda como a da Figura 16, onde I_{nb}^{16} e t_{nb} , são corrente e tempo de base negativa, enquanto I_{np} e t_{np} são corrente e tempo de pulso negativo, respectivamente.

$$EN\ Ratio = \frac{Intn}{Iptp + Ibtb + Inbntb + Inptnp} \quad (4)$$

Figura 16 - Áreas para o cálculo do EN Ratio.



Adaptado de: Kah; Suoranta e Martikainen (2012).

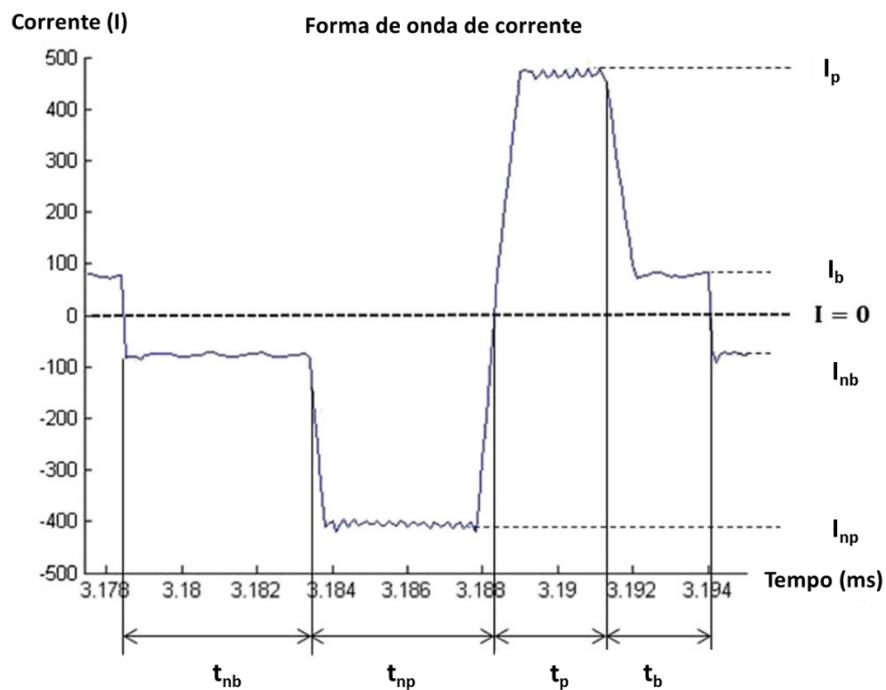
Em suma, a EN Ratio é um indicador do grau de ação da polaridade negativa no processo pulsado CA. Quanto maior a EN Ratio menor a imposição de calor a peça, menor a penetração de solda, maior a taxa de fusão do processom e (supostamente) maior a capacidade de preenchimento de juntas ou *gap bridge ability*.

A Figura 17 apresenta a forma de onda de corrente do sinérgico da fonte OTC DW-300 para o aço inoxidável, que foi empregada nos ensaios deste trabalho. Nos primeiros instantes se tem a corrente na polaridade negativa com a base negativa delimitada por I_{nb} e t_{nb} . O valor de I_{nb} neste caso não chega a -100 A. Em seguida ocorre o pulso negativo, delimitado por I_{np} e t_{np} , com o primeiro chegando a valores em torno de -400 A. Cabe a ressalva de que,

¹⁶ O valor de I_n é o valor absoluto para a Equação (4).

mesmo em uma corrente elevada, não ocorre transferência metálica durante o pulso negativo, fato confirmado durante os ensaios apresentados mais adiante neste trabalho. Em seguida, o processo muda para a polaridade positivo, já no pulso positivo, delimitado por I_p (mais de 450 A) e t_p onde se dá a transferência metálica. O ciclo termina com a base positiva delimitada por I_b e t_b , sendo o valor de I_b pouco abaixo de 100 A.

Figura 17 - Forma de onda do sinérgico da fonte OTC DW-300 para o MIG/MAG Pulsado CA do aço inoxidável.



Adaptado de Kim e Chung (2016).

3 SISTEMAS VISUAIS DE MONITORAÇÃO E COLETA DE DADOS

Conforme já discutido, processos de soldagem como TIG e MIG/MAG vêm sendo levados ao limite nos últimos anos. Sistemas de alimentação dinâmica, novas formas de onda, novos conceitos empregados para a transferência metálica dentro outras novidades que são introduzidas no mercado, trazem junto com elas elementos de maior complexidade que o pesquisador da área de processos de soldagem tem que aprender a lidar. De fato, nem sempre é possível pois muitos elementos não podem ser medidos meramente pela aquisição dos sinais de corrente e tensão. Neste caso, tecnologias como a filmagem de alta velocidade e termográfica podem ser empregadas de forma a auxiliar o pesquisador, desde que esteja disposto a usá-las e compreendê-las.

Por estes motivos e pelo fato deste trabalho ter empregado estas técnicas relativamente novas no contexto do LABSOLDA-UFSC, se considerou adequado um capítulo que tratasse destes assuntos. Além disso, os equipamentos utilizados serão especificados e, na medida do possível, serão apresentadas aplicações destas técnicas na pesquisa em processos de soldagem.

3.1 FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE

Este item apresenta fundamentos da filmagem em alta velocidade (ou videografia de alta velocidade). Embora tenham o nome de câmeras de alta velocidade, pois capturam muitas imagens por segundo, estas foram desenvolvidas para a gravação e reprodução de imagens em câmera lenta de eventos transitórios. Capturas instantâneas de detalhes invisíveis a olho nu - ou para câmeras comuns - como um parafuso se soltando em um acidente automobilístico, um projétil saindo do cano de uma arma ou o voo rápido de um pássaro podem ser detectados via filmagem de alta velocidade como a da Figura 18.

Figura 18 - Câmera de alta velocidade modelo Y3 da empresa IDT.



Fonte: IDT (2017).

Uma câmera comum captura imagens com frequência de 24 até 30 quadros por segundo (*frames per second* ou fps). Filmes também são reproduzidos nesta faixa, suficiente para criar a ilusão de movimento. Neste âmbito, a tecnologia vigente já tornou viável a filmagem e reprodução de filmes em 60 fps. Já as câmeras de alta velocidade – popularmente conhecidas como “supercâmeras” - permitem captar detalhes e movimentos indetectáveis pelo olho humano ou mesmo em filmagens com câmeras convencionais. Estas podem alcançar a frequências de captura na ordem de centenas de milhões de quadros por segundo ou *frames per second* (Gugelmin, 2010). Contudo, deve-se ter em conta que, na prática, uma grande taxa de filmagem pode obrigar a uma diminuição na resolução da filmagem, quando ao invés de adquirir maior quantidade de informações, se tem o inverso.

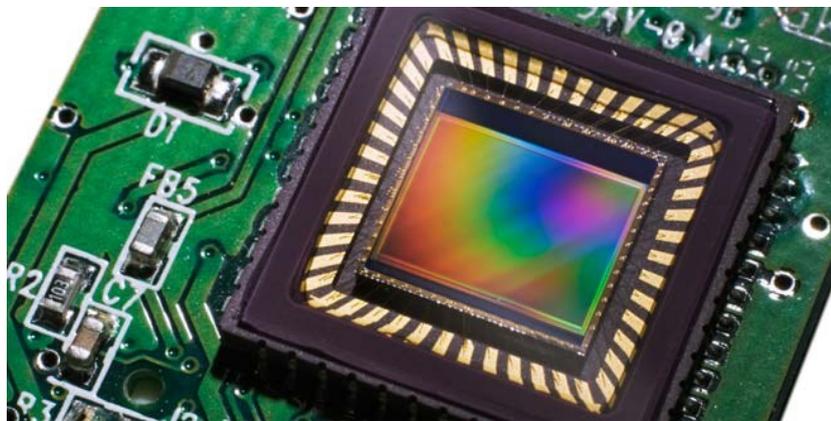
O conhecimento de certos conceitos básicos sobre filmagem, além dos parâmetros básicos a serem levados em conta foram fundamentais no âmbito deste trabalho. Inicia-se com duas partes fundamentais de uma câmera de alta velocidade: o sensor fotossensível, a importância do número de quadros por segundo e do tempo de exposição. É dada atenção para a iluminação que tem o LASER como um elemento importante para a filmagem em alta velocidade de processos de soldagem. Finalmente, são mostrados exemplos de aplicação de

filmagem de alta velocidade ao estudo dos processos de soldagem assim como a sua importância.

3.1.1 Células fotossensíveis – CCD e CMOS

Os sensores CCD (*charged coupled device*) e CMOS (*complementary metal-oxide semiconductors*) são um elemento central em câmeras digitais comuns ou de alta velocidade pois são responsáveis pela captação da imagem. Esses sensores substituíram os filmes para filmagem e fotografias, que atualmente sequer são encontrados no mercado¹⁷. Os sensores CCD são chips de silício semicondutores (Figura 19) que consistem de uma matriz de células fotossensíveis (*picture cells*) chamadas pixels¹⁸. Uma matriz é constituída de “M” colunas x “N” linhas de pixels (VERSLUIS, 2013). De certa forma, o CCD funciona como um capacitor, acumulando carga para descarregar quando solicitado. É um dispositivo que pode converter um sinal de luz (imagem) em um sinal analógico e, posteriormente, digital.

Figura 19 - Sensor CCD (*charged coupled device*) montado em uma placa de circuitos.



Fonte: Cidral (2011).

Conforme mencionado, a área de imagem de um CCD consiste de inúmeros pixels posicionados no plano focal da câmera. Os pixels convertem a intensidade da luz em carga elétrica que é armazenada no pixel. Ou seja, quando o CCD está exposto a luz, os fótons incidem

¹⁷ O desenvolvimento do sensor CCD rendeu o prêmio Nobel de Física para Willard S. Boyle e George E. Smith em 2009.

¹⁸ A palavra pixel vem de “**p**icture **e**lement”. Um “x” foi adicionado para unir as sílabas iniciais das duas palavras formando pixel.

sobre a fina camada de silício (8 μm) extraíndo elétrons de sua superfície. Os elétrons livres são então coletados no pixel sendo que quanto mais fótons acertam o CCD, mais elétrons são produzidos. Depois de encerrada a exposição, o conteúdo dos pixels passa por um amplificador e é então transferido para o circuito da câmera onde é digitalizado, sendo que a imagem digital é construída linha por linha. Em câmeras de alta velocidade, estes sensores tem uma arquitetura especial com saída (*output*) de até 5 Megapixels por milissegundo, o que corresponde a vários gigabits por segundo (VERSLUIS, 2013).

Já os sensores que usam a tecnologia do tipo CMOS captam imagens com menor clareza e qualidade, contudo são mais econômicos tanto no custo quanto no consumo de energia. Por este motivo são bastante usados em telefones celulares e computadores portáteis. O funcionamento é semelhante ao CCD, com a diferença que as células fotossensíveis neste último são passivas, ou seja, assim que são capturadas, as informações concernentes à imagem passam por um amplificador e são armazenadas em um dispositivo separado do sensor. No sensor CMOS, cada célula fotossensível é também um amplificador, logo o CMOS é capaz de realizar o processamento local básico dos dados, permitindo uma leitura mais rápida. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os dois sistemas.

Tabela 1 - Comparação entre sensores CCD e CMOS

Características	Sensor CCD	Sensor CMOS
Qualidade da imagem	Melhor, com menos ruído	Pior, mais ruidosa
Sensibilidade à luz	Mais sensível	Menos sensível
Consumo de energia	Elevado	Baixo
Custo do sensor	Mais caro	Mais acessível
Maturidade Tecnológico	Bem estabelecida	Em evolução
Resolução	Mais elevada	Mais limitada

Fonte: Albertazzi e Pinto (2017).

3.1.2 Taxa de aquisição de imagens

A taxa de aquisição de imagens ou *frame rate*, medido em fps:

“[...] vai determinar o menor tempo entre dois eventos que podem ser capturados. Embora um único quadro possa ser registrado em uma fração de milissegundos usando câmeras comuns, a taxa de aquisição de imagens limita o menor tempo entre dois quadros consecutivos a ser da ordem de 16 a 33 ms em alta resolução. Por exemplo, em uma taxa de aquisição de imagens de 60 fps tem-se $1/60 = 16,67$ ms entre eventos” (LUMENERA, 2017).

Um filme é o registro de uma sequência de imagens discretas. Se é uma filmagem com o objetivo de investigar um fenômeno que não pode ser captado por câmeras comuns, o número de quadros a serem registrados por segundo (fps) deve estar em acordo com a natureza do fenômeno, levando em conta as características deste, sob pena de a filmagem não registrar o objeto da análise. Em um fenômeno cíclico, por exemplo, uma das características a serem levadas em conta é sua frequência. O teorema de amostragem de Nyquist (OLSHAUSEN, 2000) que diz que a frequência de amostragem (f_a) ou o *frame rate* (taxa de aquisição de imagens), para aplicações em filmagem, deve ser maior ou igual a duas vezes a frequência do fenômeno (f), conforme a Equação (5):

$$f_a \geq 2f \quad (5)$$

Não obstante, Versluis (2013) recomenda o uso de um *frame rate* 5 a 10 vezes maior que a frequência do fenômeno cíclico e apresenta a Equação (6) para uma estimativa, levando em consideração mais características:

$$f_a = \frac{N \cdot u}{l} \quad (6)$$

Onde N é o número de amostras (de 5 a 10 conforme supramencionado), u é a velocidade típica de um fenômeno e l uma escala de comprimento, normalmente o “campo de visão”. Por exemplo, um conta gotas a uma altura de 20 cm, forma gotas que caem a uma velocidade u de 2 m/s, estimada por meio da Equação (7) - que nada mais é do que o resultado do equilíbrio entre as energias potencial e cinética de uma gota. Aplicando a Equação (6) e considerando um campo de visão de 20 mm e $N = 10$, tem-se um *frame rate* de 1000 fps.

$$u = \sqrt{2gh} \quad (7)$$

Embora nem sempre as características do fenômeno a ser estudado sejam facilmente dedutíveis, se faz necessário que o operador tenha algum conhecimento prévio a respeito do fenômeno que deseja registrar. A Equação (5) e a Equação (6) servem como um guia para facilitar uma primeira regulagem, além de ajudar a compreender um importante princípio da filmagem em alta velocidade.

3.1.3 Tempo de exposição e obturador

Outro parâmetro de importância é o tempo de exposição (*exposure time, shutter time*). O tempo de exposição indica quanto tempo o filme ou o sensor fotossensível (CCD ou CMOS) estará exposto a luz que circunda o objeto ou ambiente que se quer fotografar ou filmar. A escolha acertada do tempo de exposição leva a captura de uma imagem nítida e definida de, e.g., uma aeronave em movimento ou um automóvel em alta velocidade. Nestes últimos, um tempo de exposição curto será mais adequado para criar o chamado efeito de paralisação (*freezing*). Por exemplo, para obter o efeito de *freezing* na fotografia de uma aeronave voando a aproximadamente 480 km/h, Ang (2016) recomenda um tempo de exposição de 1/640 segundos ($\cong 1,56$ ms) em câmeras comuns. Por outro lado, a escolha intencional (ou não) de um tempo de exposição muito longo pode levar a formação de um efeito de *blur* (borrão) na imagem capturada (HALLIDAY, RESNICK; WALKER, 2010). Quando realizado intencionalmente, o efeito cria uma imagem que passa a ideia de movimento ou alta velocidade como na fotografia da Figura 20.

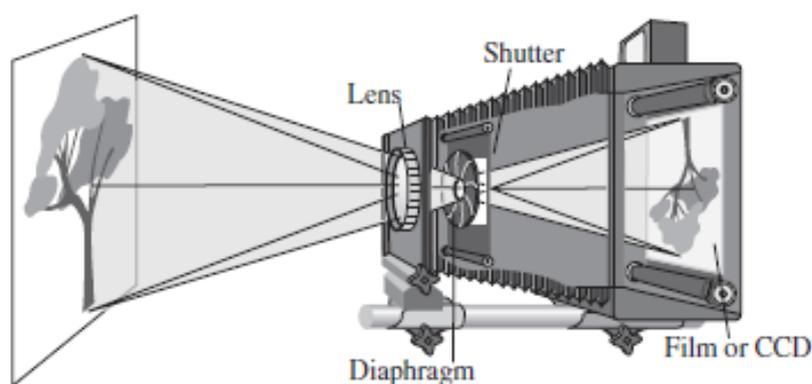
Figura 20 - Imagem de um F1 intencionalmente fotografado com tempo de exposição alto (1/60 segundos $\cong 16,7$ ms).



Fonte: Sutton (2015).

Pode-se usar um dispositivo mecânico conhecido como obturador (*shutter*) para controlar o tempo de exposição (Figura 21) mediante a rápida abertura e fechamento do mesmo no momento do registro da imagem (FOLTS; LOWELL; ZWAHLEN, 2011). Os obturadores mecânicos mais rápidos podem chegar a 1 ms, contudo, esse tempo de exposição será inadequado para filmagens de alta velocidade.

Figura 21 - Esquema básico de uma câmera consistindo de uma lente (objetiva), de um diafragma ajustável (que limita a entrada de luz que chega ao obturador), um obturador que pode abrir e fechar rapidamente e um filme ou sensor fotossensível para captura da imagem.



Fonte Hecht (2017).

Em câmeras de alta velocidade, o mais comum é o controle do tempo de exposição por intermédio de obturador eletrônico com controle via *software* (Figura 22). Dependendo da câmera, os tempos de exposição podem diminuir para até 1 μ s. Há dois tipos de abordagem para esta aplicação: *global* e *rolling*. Em um sensor com um obturador *global*, todas as células fotossensíveis (pixels) são expostas simultaneamente durante o tempo de exposição. Em sensores com obturador do tipo *rolling* cada célula fotossensível é exposta “sequencialmente uma por uma, da esquerda para a direita, linha por linha durante o tempo de exposição” (LUMENERA, 2017). Cada pixel é exposto, mas há um atraso (*lag*) entre o primeiro pixel da primeira linha, iniciando sua exposição, e o último pixel da última linha, iniciado sua exposição. O obturador *rolling* é mais adequado para imagens estáticas ou com pouca movimentação do objeto em relação a câmera. Ou seja, a luz incide sobre os pixels em instantes diferentes e, quando se está tentando fotografar ou filmar um evento transitório em alta velocidade, a

incidência de *blur* na imagem é comum. Logo, para filmagens de alta velocidade, o mais indicado é um obturador do tipo *global*, a fim evitar a ocorrência de *blur*.

Figura 22 - Regulagem do tempo de exposição (1/125 s) em uma câmera digital portátil.



Fonte: Wikihow (2017).

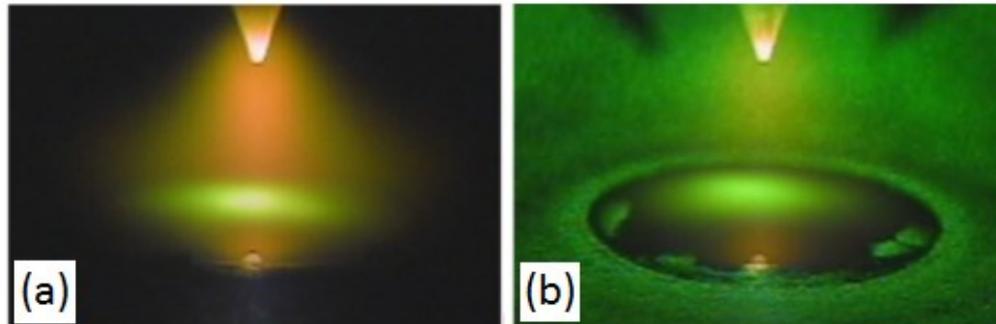
Em filmagens científicas, para uma correta regulagem inicial da câmera de alta velocidade, é necessário algum conhecimento prévio do fenômeno a ser registrado. Exemplo: considere-se uma bolha de ar se formando em uma tubulação conduzindo água que em seguida explode. O intervalo entre a formação e a explosão da bolha é menor do que 300 μ s. Em uma filmagem com uma taxa de aquisição de 2000 fps, tem-se um tempo entre dois quadros consecutivos de 500 μ s. Empregando um tempo de exposição igual ao tempo entre dois quadros, provavelmente não se verá nenhum detalhe da bolha. Para registrar maiores detalhes da formação e explosão da bolha será necessário usar um tempo de exposição muito curto, em torno de 25 μ s, doze vezes menor que o tempo de duração do evento (VERLUIS, 2000). Logo, para que o tempo de exposição seja igual ao tempo entre dois quadros consecutivos, é necessária uma taxa de aquisição de 40000 fps (nesse caso, é provável que se perca em resolução). Em suma, o tempo de exposição deverá ser muito menor do que o tempo de duração do evento a ser registrado.

3.1.4 Tipos de luz e LASER

Em fotografia e filmagem, o domínio da luz é de grande relevância para a captação de imagens. Em filmagens de alta velocidade e conforme o caso, o emprego do sistema de iluminação pode ser a diferença entre a obtenção de uma imagem altamente definida e uma imagem inútil para o objetivo do estudo. Do ponto de vista da fotografia, os tipos de luz são: a luz natural, a luz existente e a luz artificial (FOLTS; LOWELL; ZWAHLEN, 2011). A luz natural nada mais é do que a luz do sol que pode ser suave ou difusa, dependendo das condições climáticas. A luz existente (ou disponível) é a luz encontrada no local da fotografia em recintos fechados e é geralmente pouco uniforme, ficando certas áreas altamente iluminadas enquanto outras ficam nas sombras. Embora também possa ser artificial, a luz existente se diferencia da luz artificial por não ser especificamente projetada para fotografia ou filmagem, tendo como objetivo principal apenas iluminar ambientes.

A luz artificial pode ser necessária e suficiente em filmagens de alta velocidade, contudo isso não é verdadeiro na filmagem de processos de soldagem a arco. Neste caso em particular, um sistema LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) tem importante papel quando se trata de filmagens de alta velocidade de processos de soldagem devido à natureza do arco voltaico. Este último, emite luminosidade, raios infravermelhos e ultravioletas com grande intensidade sendo que, uma filmagem de alta velocidade empregando apenas a câmera não serviria para qualquer análise haja visto que será registrado apenas um clarão. Uma maneira de atenuar a intensidade da luz proveniente do arco voltaico, eliminá-lo quando conveniente ou até melhorar a qualidade da imagem é o uso de iluminação LASER, cujo comprimento de onda é diferente da maior parte do espectro do arco (OGAWA, 2011). Se o obturador eletrônico da câmera estiver em sincronia com a pulsação do laser há aumento da eficiência da iluminação externa, o que pode ser útil na filmagem de certos eventos. Em suma, um LASER de intensidade e comprimento de onda adequados são essenciais para se conseguir uma imagem clara e definida, geralmente em associação com a filtros. A Figura 23.a mostra a filmagem do arco voltaico no processo TIG onde pode-se visualizar a extremidade do eletrodo de tungstênio, mas não a poça de fusão. Na Figura 23.b pode-se observar não só o eletrodo, mas também a poça de fusão, no entanto, a intensidade luminosa do arco foi praticamente eliminada.

Figura 23 - (a) Imagem do arco voltaico no processo TIG sem o uso de iluminação LASER; (b) imagem da poça de fusão durante uma soldagem TIG com o uso de iluminação LASER.



Fonte: Ogawa (2011).

3.1.5 Aplicações de Filmagem em alta velocidade ao estudo de processos de soldagem a arco

Quando se fala de filmagem em alta velocidade aplicada à análise de processos de soldagem, geralmente a primeira imagem que vem à mente, é uma câmera sofisticada sendo empregada para a monitoração e análise da transferência metálica no processo MIG/MAG. Dada a importância da transferência metálica neste processo, esta é, de fato, uma das principais aplicações das técnicas de filmagem em alta velocidade, como se verá no primeiro exemplo a seguir. Contudo, a medida que os processos de soldagem evoluíram ao longo das últimas décadas, a filmagem em alta velocidade mostrou-se útil para a análise de outros fatores de importância no êxito da operação de soldagem e no funcionamento dos processos em si. A soldagem de alta velocidade se revela útil não só no estudo do processo MIG/MAG, mas auxilia também na compreensão de fenômenos característicos de processos como TIG (RIFFEL, 2018) ou eletrodo revestido (BERNARDI, 2018). Este item tem como objetivo principal demonstrar o quanto a aplicação da filmagem de alta velocidade pode ser útil no estudo dos processos de soldagem a arco, especialmente quando se trata de modalidades especiais de MIG/MAG.

No LABSOLDA-UFSC, até menos de uma década atrás, o estudo de processos com controle de forma de onda de corrente (como o MIG/MAG Pulsado) ficava restrito a avaliação dos diagramas de corrente e tensão ou oscilogramas coletados por intermédio do Sistema de Aquisição Portátil (SAP) (LABSOLDA, 2015) apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Sistema de Aquisição Portátil (SAP).



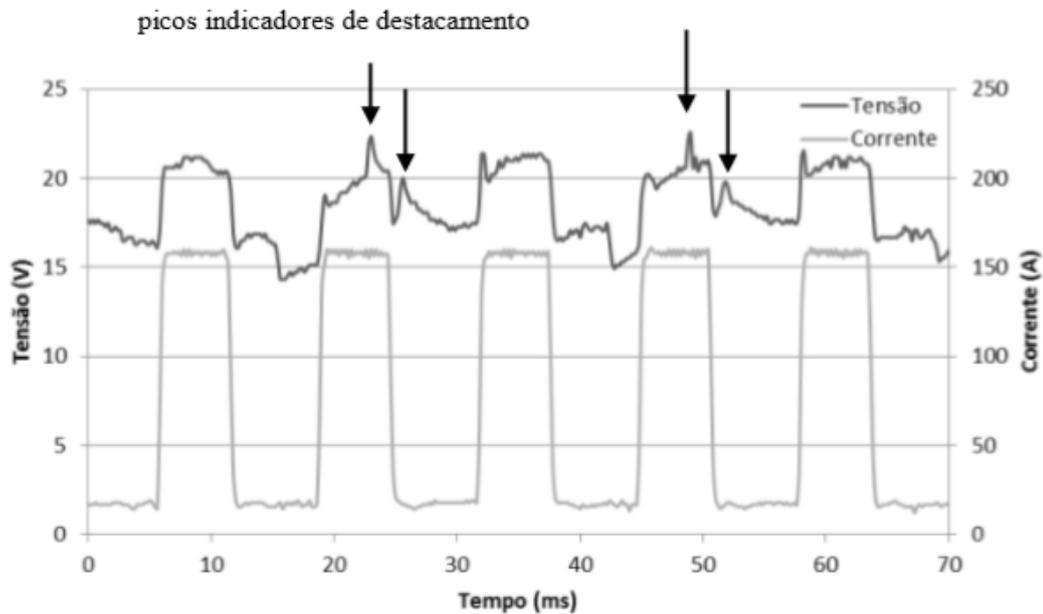
Fonte: LABSOLDA-UFSC (2015).

Apesar de a coleta de dados a partir do SAP permitir uma série de análises e determinações de parâmetros via cálculo, a mera avaliação dos oscilogramas limita o pesquisador a presumir alguns fenômenos sem maior base de constatação, especialmente no que diz respeito a transferência metálica, produzindo incertezas quanto ao resultado.

Por exemplo, em um oscilograma como o da Figura 25, que mostra uma forma de onda típica de um processo pulsado tradicional (forma de onda retangular) o pico de tensão identificado com uma seta é um indicativo do destacamento de uma gota metálica. Entretanto, a partir da avaliação do oscilograma, por exemplo, não se pode inferir que:

1. Com certeza que o processo pulsado analisado respeita a condição UGPP (uma gota por pulso). Em outras palavras, não é possível determinar o destacamento ou não de gotas secundárias;
2. Quanto ao momento exato de destacamento da gota. Ou seja, no pulso ou na base. O pico de tensão é apenas um indicativo que pode ser confundido com alguma interferência (*ripple*) ou vice-versa e;
3. Se, para determinada situação, é mais vantajoso o destacamento na base, no pulso ou em uma fase de destacamento.

Figura 25 - Oscilogramas de tensão e corrente para o processo MIG/MAG Pulsado aplicado ao alumínio. Os picos de tensão indicados pelas setas são indicativos do destacamento de gota.

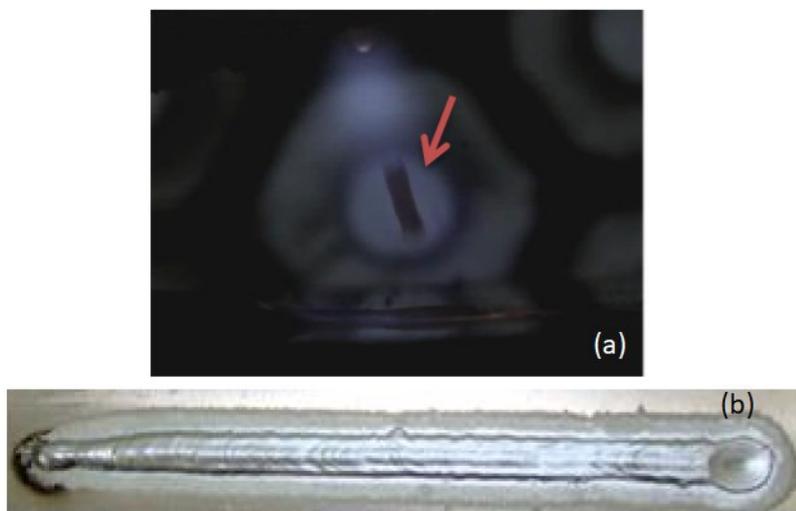


Fonte: Dutra, Marques e Silva (2012).

Um exemplo representativo, particularmente no que diz respeito ao item (3) da lista, está no estudo de Dutra, Marques e Silva (2012). Este demonstra para o caso da soldagem MIG Pulsado do alumínio¹⁹, que a gota metálica destacada no período de pulso é acelerada em demasia. Como consequência, a gota metálica sofre um alongamento assumindo uma forma elíptica e o choque desta com a superfície da peça forma um cordão de aparência irregular, conforme retrata a Figura 26. Sem a filmagem em alta velocidade essa verificação seria impossível.

¹⁹ Condições de soldagem: Arame ER 4043, conforme classificação AWS, Ø1,2 mm e argônio como gás de proteção.

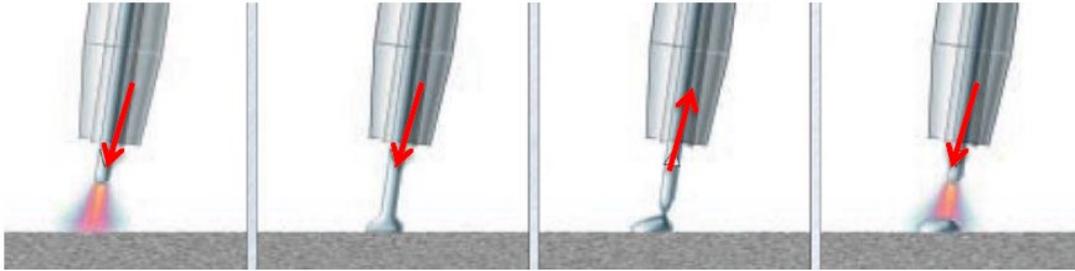
Figura 26 - No caso do alumínio, a gota destacada no período de pulso deforma a gota metálica na forma aproximada de uma elipse (a) prejudicando a aparência do cordão de solda em (b).



Adaptado de: Dutra, Marques e Silva (2012).

O próximo exemplo aborda a necessidade de realizar a união de chapas de aço galvanizado e alumínio, por meio de processos de soldagem a arco. Os aspectos limitantes são: formação de fases intermetálicas frágeis (FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5) cuja espessura aumenta com o calor imposto a junta (CAO et al., 2013) e; os vapores e óxidos de zinco podem causar discontinuidades como porosidade, fusão incompleta e mesmo trincas. Como solução para estes problemas e principalmente com o intuito de atender uma demanda da indústria automobilística, Bruckner (2005) apresentou o sistema MIG/MAG CMT (*Cold Metal Transfer*) cuja principal inovação está na integração de alimentação dinâmica de arame ao processo de soldagem. Sempre que ocorre o curto-circuito, a corrente de soldagem é reduzida e ocorre a retração do arame para promover o destacamento da gota metálica (Figura 27). Enfim, esse sistema foi desenvolvido para tornar possível a soldagem (ou solda-brasagem) de juntas de alumínio e aço galvanizando, embora possa ser empregado com sucesso em outras aplicações como por exemplo na soldagem de passes de raiz de chapas de alumínio 5083 (MARQUES, 2013).

Figura 27 - Movimento de avanço e recuo do arame para o MIG/MAG.



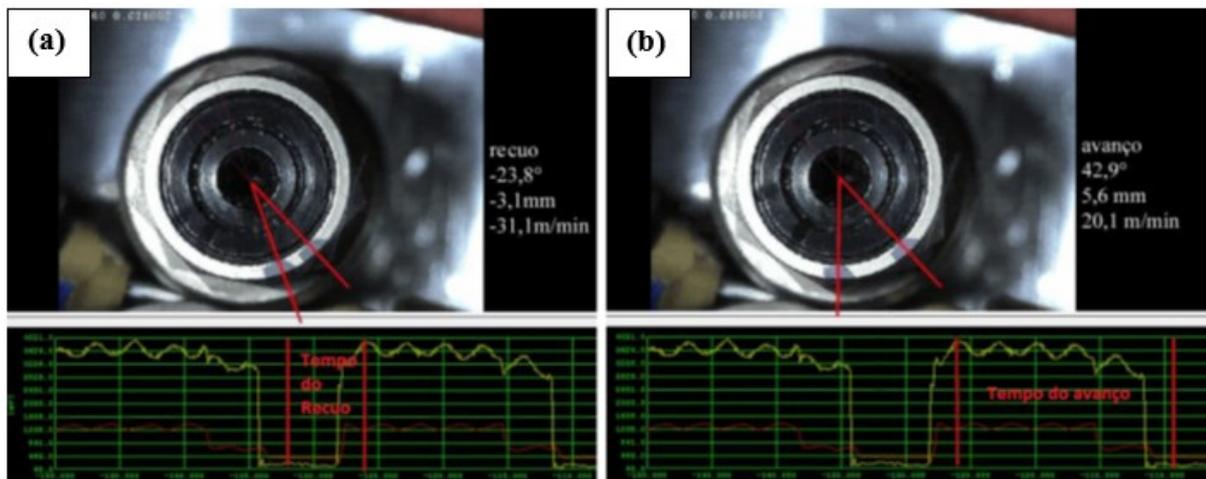
Fonte: Adaptado de FRONIUS (2017).

O LABSOLDA-UFSC passou a estudar o processo CMT com recursos da filmagem de alta velocidade, conduzindo inicialmente ensaios que avaliaram o movimento de avanço e recuo do arame diretamente no sistema de roletes da tocha de soldagem²⁰. Os vídeos realizados possibilitaram a verificação dos valores das distâncias de avanço e recuo, assim como a velocidade média que o motor opera em cada um dos tempos. A Figura 28 apresenta imagens retiradas da filmagem realizada, em duas situações. Em (a) verificam-se sobre o rolete as linhas vermelhas que marcam os extremos do movimento de recuo. Em (b) a figura mostra o ângulo de deslocamento para o movimento de avanço. Com o valor conhecido do diâmetro do rolete, foi possível determinar os valores de deslocamento e velocidade. Verificou-se que, para a situação testada, com uma corrente regulada em 100 A e arame de alumínio ER4043 de 1,2 mm, as velocidades de recuo foram maiores que as de avanço.

Este é um bom exemplo na qual apenas a monitoração dos sinais de corrente e tensão e, até mesmo apenas a filmagem da transferência metálica, não revela todos os detalhes do processo.

²⁰ A tocha fornecida pela FRONIUS para o processo CMT possui roletes que são responsáveis pelo movimento de recuo característico do processo MIG/MAG CMT.

Figura 28 - Análise do avanço e recuo no CMT com filmagem de alta velocidade.



Fonte: Marques (2017).

3.1.6 Câmera de alta velocidade

A câmera de alta velocidade empregada no LABSOLDA-UFSC é uma modelo Y4-D2 da fabricante IDT (2017) apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Câmera de alta velocidade Y4-S2 da empresa IDT.



Fonte: IDT (2017).

As especificações técnicas básicas constam na Tabela 2, como segue:

Tabela 2 - Especificações técnicas básicas da câmera Y4-S2 da fabricante IDT.

Característica	
Máx. fps com máx. Resolução	4.500 fps e 1024x1024
Nº máx. de quadros/segundo	108.000 fps 1024x16
Tempo de exposição mínimo	1 μ s
Faixa de temp. operacional	-40 °C a +50 °C
Memória	64 GB
Sensor	CMOS
Tamanho da imagem	1 Megapixel
Comunicação	USB 2.0

Fonte: IDT Specification Sheet (2017).

3.2 FILMAGEM TERMOGRÁFICA

Este item apresentará alguns princípios básicos de transferência de calor por radiação onde serão definidas a natureza da radiação térmica, o espectro eletromagnético e a faixa onde a radiação térmica atua, o conceito de emissividade, a influência do ambiente e as preocupações iniciais no momento de calibrar uma câmera termográfica. O entendimento destes conceitos é fundamental em termografia. Em seguida o funcionamento básico da câmera é levado em conta assim como a imagem térmica e outras considerações de ordem técnica. Por fim, são analisadas as aplicações mais comuns da termografia na indústria e mais especificamente na área de soldagem.

3.2.1 Definição

Define-se termografia infravermelha como “a ciência de aquisição e análise de informações térmicas a partir de dispositivos de obtenção de imagens térmicas sem contato” (ITC, 2013). A imagem gerada costuma ser chamada de “termograma” ou imagem termográfica. As vantagens do emprego desta técnica são sintetizadas na lista a seguir:

- Possibilidade de medir temperaturas sem que haja contato do instrumento com o alvo;
- Medir temperaturas a distância e em locais de difícil acesso;
- Possibilidade de visualizar os dados em duas dimensões (imagem térmica) e;
- Possibilidade de analisar o comportamento da temperatura no tempo em função de um determinado tipo de aquecimento em tempo real.

3.2.2 Radiação térmica

Todo material emite e absorve continuamente ondas eletromagnéticas ou fótons, pelo incremento ou decréscimo de seus níveis de energia (MODEST, 2013). A intensidade e os comprimentos de onda das emissões dependem da temperatura do material. A transferência de calor como radiação térmica se distingue das demais formas de transferência de calor - condução e convecção - de formas notáveis. Tal como a luz, a radiação térmica se propaga no vácuo e tem natureza “dual” (dualidade onda-partícula), isto é, em alguns momentos é mais adequado considerá-la uma onda eletromagnética como, por exemplo, quando se propaga em um meio qualquer. Quando se trata dos fenômenos de emissão e absorção é mais conveniente tratá-la como sendo formada por fótons (HECHT, 2002). As propriedades radiativas geralmente são difíceis de medir e muitas vezes exibem comportamento errático (MODEST, 2013). Como a transferência de calor por radiação torna-se mais importante à medida que a temperatura aumenta, pode chegar a um ponto onde é predominante sobre a condução e a convecção.

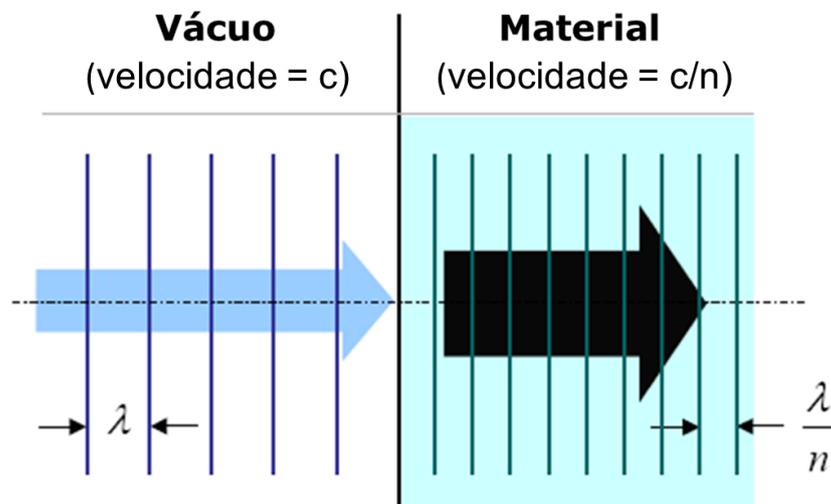
3.2.3 O espectro eletromagnético

A radiação térmica se propaga na faixa de 0,1 a 100 μm do espectro eletromagnético. Boa parte (36,7%) da energia solar que chega ao planeta Terra está no espectro visível da luz. No entanto, em objetos que se encontram ao nosso redor, normalmente a propagação se dá na faixa do infravermelho (ITC, 2013). Todas as ondas eletromagnéticas ou fótons, propagam-se através de qualquer meio em alta velocidade. Como a luz é uma parte do espectro eletromagnético, esta velocidade é conhecida como velocidade da luz, c . A velocidade da luz depende do meio através do qual a onda eletromagnética viaja, e deve ser relacionada a velocidade da luz no vácuo (absoluta), c_0 , como mostra a Equação (8):

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (8)$$

Onde n é o índice de proporcionalidade, mais conhecido como índice de refração absoluto. Para o vácuo, o índice de refração é $n \equiv 1$ e no ar corresponde a $n = 1,00029$, ou seja, tanto para o vácuo quanto para o ar, a luz e as demais ondas eletromagnéticas se propagam praticamente na mesma velocidade. O comprimento de onda λ diminui quando a onda eletromagnética passa para um meio mais refringente como mostra a Figura 30.

Figura 30 - Velocidade da luz no vácuo e em um meio material. Alteração na velocidade c e no comprimento de onda λ segundo um mesmo índice de proporcionalidade n (índice de refração).



Adaptado de: Albertazzi (2017).

Mais apropriadamente, para caracterizar uma onda eletromagnética deve-se ter em conta: frequência, ν (medida em Hz); comprimento de onda, λ (μm ou nm) e; frequência angular, ω (radianos/s). As quatro grandezas estão relacionadas conforme a Equação (9):

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} \quad (9)$$

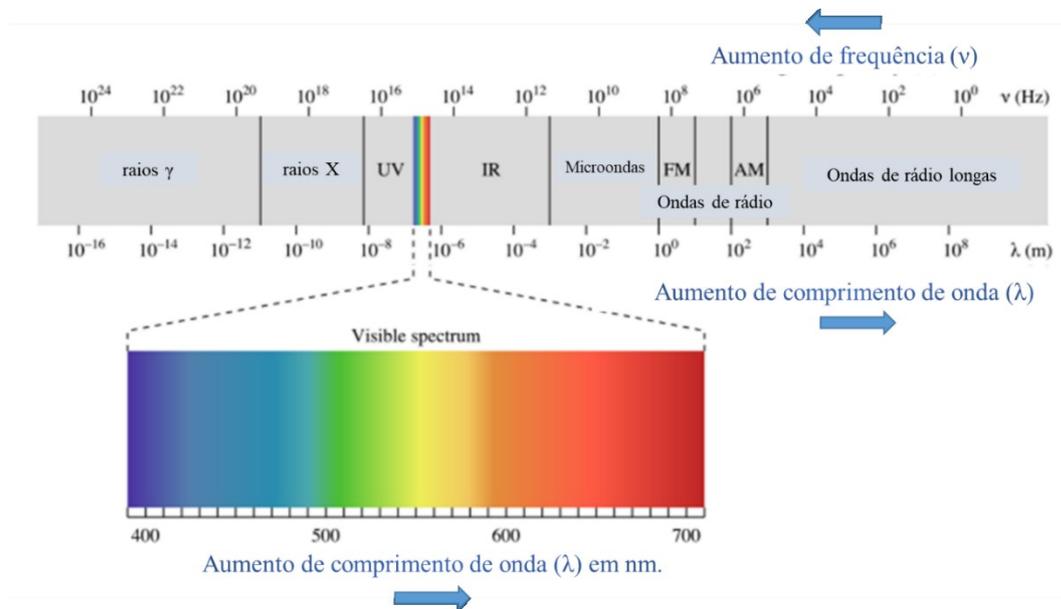
Cada onda ou fóton carrega consigo uma energia ϵ , de tal forma que:

$$\epsilon = h\nu, \quad (10)$$

Sendo h a constante de Planck²¹. O espectro eletromagnético, apresentado na Figura 31, apresenta as faixas de frequência e comprimentos de onda. O infravermelho (IV), de maior importância no âmbito deste trabalho, estende-se de 3×10^{11} a 4×10^{14} Hz e pode-se dividi-lo em quatro regiões, embora esta divisão seja imprecisa segundo Hecht (2002):

- IV próximo ou próximo do visível (780-3000 nm);
- IV intermediário (3000-6000 nm);
- IV térmico (6000-15000 nm) e;
- IV longínquo (15000 nm-1 mm).

Figura 31 - Espectro eletromagnético (para radiação viajando através do vácuo).



Adaptado de: Albertazzi (2017).

O infravermelho é emitido, em um espectro contínuo, por corpos quentes, tais como aquecedores elétricos, carvão em brasa e aquecedores domésticos. Uma lâmpada elétrica incandescente emite mais radiação IV do que luz no espectro visível (HECHT, 2017).

²¹ Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947) – físico teórico alemão que desenvolveu a teoria quântica, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1918, além de outras contribuições. Sua teoria quântica revolucionou o entendimento dos processos atômicos e subatômicos ao mesmo tempo que a relatividade de Albert Einstein revolucionava o entendimento sobre espaço e tempo. O valor numérico da constante de Planck com a precisão conhecida de hoje é $h = 6,62606957 \times 10^{-34}$ J.s.

3.2.4 Emissividade

Para medir a radiação emitida (e, por conseguinte, sua temperatura) a partir de um objeto qualquer empregando uma câmara termográfica é necessário determinar a emissividade do material. A Equação (11) mostra que a emissividade ε é dada pela relação entre a energia irradiada por um corpo negro (W_b) e a energia irradiada pelo objeto (W_o) de modo que:

$$\varepsilon = \frac{W_o}{W_b} \quad (11)$$

A Tabela 3 mostra o valor de emissividade para alguns metais. Segundo esta tabela, o ferro fundido ($\varepsilon = 0,81$) emite mais radiação do que o aço inoxidável ($\varepsilon = 0,45$), por exemplo. A Equação (12) incorpora o valor de ε no momento do cálculo de fluxo radiante por intermédio da Lei de Stefan-Boltzmann ²² a partir de objetos comuns, de modo que se tem:

$$W_o = \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

Tabela 3 - Valores de emissividade (ε) recomendados para alguns metais.

Material	Especificação	Espectro	Emissividade (ε)
Alumínio	Anodizado, cinza claro, opaco	2-5 μm	0,61
Latão	Placa, laminada	Espectro total	0,06
Ferro fundido	Fundido	Espectro total	0,81
Bronze	Fosforo Bronze	8-14 μm	0,06
Aço	Laminado sob alta temperatura	Espectro total	0,6
Aço inoxidável	Laminado	Espectro total	0,45

Fonte: FLIR (2012).

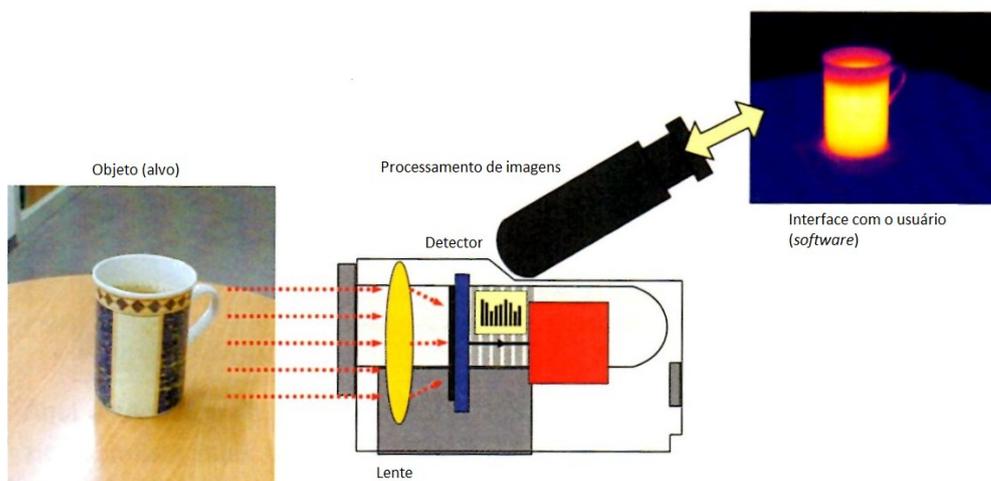
²² A Lei de Stefan-Boltzmann pode usada para calcular o total de energia irradiada por um corpo negro (W_b) a uma dada temperatura (T) de modo que $W_b = \sigma T^4$. Por se tratar de um corpo negro $\varepsilon = 1$ e, portanto, não aparece na equação. Já σ é a constante de Stefan-Boltzmann de valor $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Esta lei recebeu os nomes de dois cientistas austríacos: Josef Stefan (1835 – 1893) e Ludwig Edward Boltzmann (1844 – 1906).

3.2.5 A câmera termográfica

Os principais componentes de uma câmera termográfica são: as lentes, o detector (*focal plane array* ou FPA), um resfriador (*cooler*) para o detector e a parte eletrônica auxiliar e *software* para processamento e visualização de imagens. A câmera converte radiação infravermelha invisível em uma imagem visível (FLIR, 2015). A radiação infravermelha é irradiada a partir do alvo e a câmera capta isso. Auxiliadas pela Figura 32, as palavras a seguir resumem de maneira bastante simples o funcionamento de uma câmera termográfica:

“A radiação infravermelha passa através de lentes, e é focalizada no detector, muito parecido com o que ocorre com a radiação visual no filme de uma câmera normal. O detector criará um sinal elétrico de algum tipo, que variará de acordo com a intensidade da radiação infravermelha que incide nele. [...] O sinal elétrico é amplificado, digitalizado e enviado para os componentes eletrônicos da câmera. Ele então é convertido em uma figura que é exibida no visor da câmera, e aí podemos ver uma imagem infravermelha.” (ITC, 2013).

Figura 32 - Princípio de funcionamento básico de uma câmera termográfica. A caneca de café emite radiação e ao incidir sobre a lente da câmera é focalizada no detector (sensor). Este cria um sinal elétrico convertido em imagem.



Fonte: ITC (2013).

A câmera termográfica capta tanto a radiação infravermelha refletida quanto a emitida. A câmera termográfica não mede temperaturas, mede a radiação e calcula a temperatura (FLIR, 2015). Há dois tipos básicos de câmeras termográficas, conforme seus detectores, já citados no item sobre influência da atmosfera, chamados de janelas atmosféricas (*atmospheric windows*):

aqueles que estão na faixa de comprimento de onda curtos/médio (SW/MW) e as que estão na faixa de comprimento de onda longo (LW).

A câmera termográfica empregada no desenvolvimento deste trabalho é uma SC7200 F/3 da fabricante FLIR (2017), apresentada na Figura 33. A Tabela 4 traz as especificações técnicas básicas desta câmera.

Figura 33 - Câmera termográfica modelo SC7200 F/3 da fabricante FLIR.



Fonte: FLIR (2017).

Tabela 4 - Especificações técnicas básicas da câmera SC7200 F/3 da fabricante FLIR.

Característica	
Distância focal	50 mm
Tolerância de medição	+/- 1 °C
Faixa de temp. operacional	-20 °C a +55 °C
Faixa de temp. medição	5 até 3000°C
Frequência de Aquisição	Até 175 Hz
Número de pixels	320 x 256 pixels
Material do detector	InSb

Fonte: FLIR (2012).

3.2.6 A imagem térmica

A imagem térmica ou termograma é uma imagem da intensidade de radiação térmica e não uma figura de distribuição de temperatura. Na Figura 34, que apresenta uma xícara azul com detalhes em dourado. Embora toda a superfície da xícara esteja mais ou menos a mesma temperatura, na imagem térmica a parte azul tem uma emissividade elevada e, portanto, irradiará mais do que a impressão dourada, que tem emissividade mais baixa. A imagem térmica mostra as diferenças de intensidade de radiação, mas não diferenças reais e temperatura (ITC, 2013). Em outras palavras, o que provoca o contraste na imagem térmica é diferença de emissividade e não de temperatura.

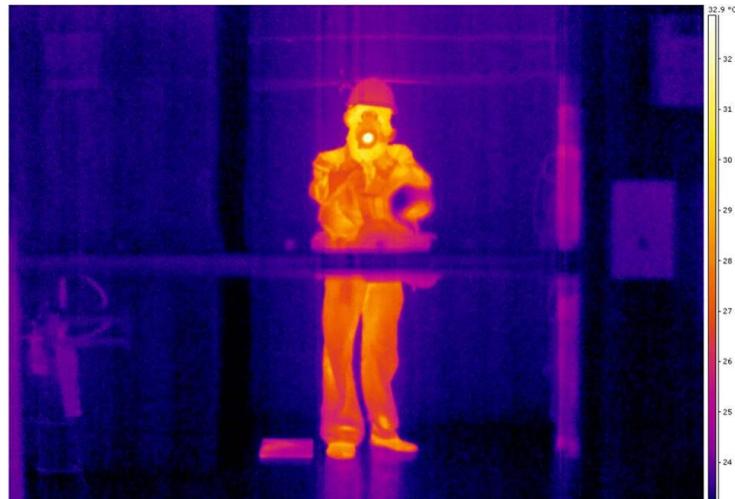
Figura 34 - Xícara azul com impressões em azul e dourado; imagem normal e térmica



Fonte: ITC (2013).

Reflexos podem ser problemáticos quando se tenta realizar uma filmagem cujo o alvo é um material reflexivo. A Figura 35 apresenta um técnico fazendo uma filmagem de frente para uma chapa de aço inoxidável. Para evitar esse resultado, obviamente, a primeira medida é evitar ficar diretamente de frente para o alvo. Depois deve-se posicionar a câmera em um ângulo que esta não apareça no termograma. Tapumes podem ser usados para bloquear a luz proveniente de outras fontes e possíveis fontes de reflexo.

Figura 35 - O problema da reflexão.



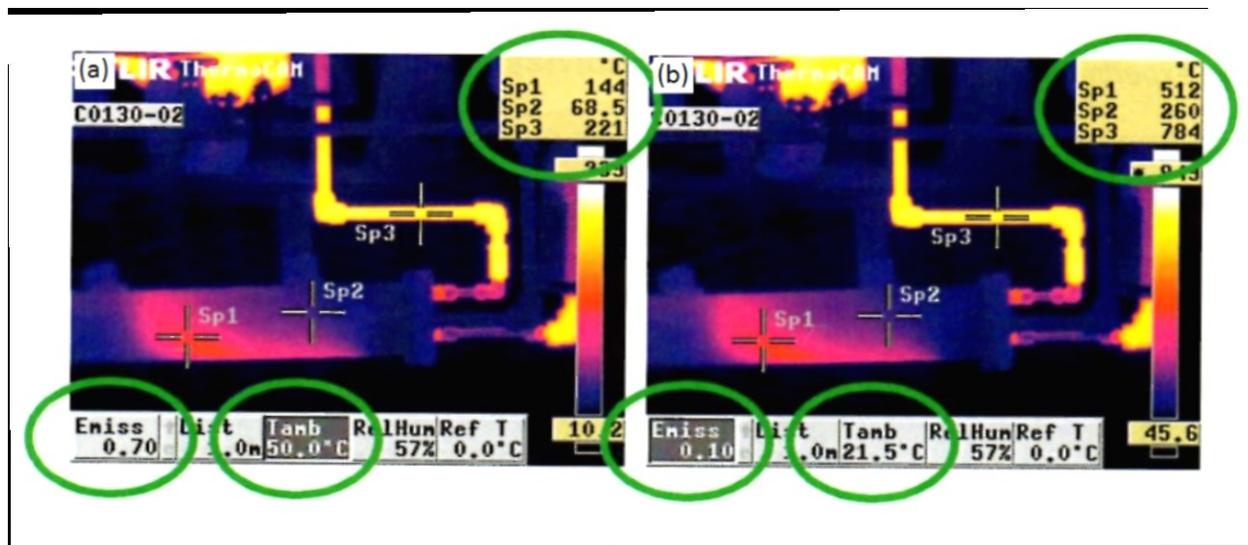
Fonte: ITC (2013).

3.2.7 Temperatura aparente

Por definição, a temperatura aparente “é a leitura não compensada de uma câmera infravermelha, contendo toda a radiação incidente no instrumento, independentemente de suas fontes” (ITC, 2013). Isto é, quando no *software* da câmera ou na interface, ajusta-se a emissividade para 1,0 e distância objeto-câmera em zero, mede-se a temperatura aparente, pois nenhuma compensação é feita.

A temperatura verdadeira é medida quando se faz as compensações necessárias, entre elas a regulagem de emissividade (propriedade do alvo) e outras devem ser considerados como temperatura ambiente e umidade relativa (propriedades do ambiente). Lembrando que a compensação ou a regulagem dos parâmetros da câmera não alteram a imagem térmica em si e sim os resultados das medições. Por exemplo, na Figura 36 em (a) tem-se uma imagem térmica na qual os valores de emissividade (“Emiss”) e temperatura ambiente (“Tamb”) estão em destaque. Há também três pontos de controle em Sp1, Sp2 e Sp3. Os valores para cada ponto estão no canto superior direito da imagem (a). Em (b) os valores de emissividade e temperatura ambiente são alterados de modo que as temperaturas medidas também são. A imagem térmica não é alterada pois a intensidade da radiação emitida pelos alvos não se modifica.

Figura 36 - Dois exemplos diferentes de compensação de parâmetros do objeto para a mesma imagem. (a) emissividade em 0,70 e temperatura ambiente em 50,0°C. (b) emissividade em 0,10 e temperatura ambiente em 21,5°C.



Fonte: ITC (2013).

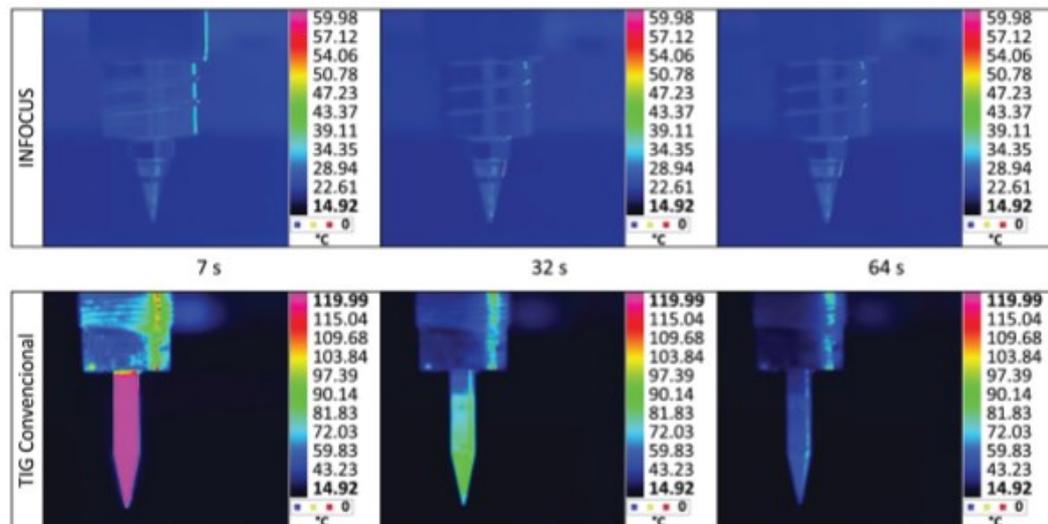
3.2.9 Aplicação na análise de processos, inspeção e controle

Este item visa demonstrar a utilidade da filmagem termográfica especificamente na área de soldagem, inspeção e controle. Como primeiro exemplo tem-se Olivares et al. (2015) que empregou filmagens termográfica para avaliar comparativamente o resfriamento do eletrodo de tungstênio em uma tocha do tipo Infocus²³ em relação a uma tocha TIG convencional, mas com capacidade para suportar correntes de até 520 A)²⁴. Os resultados das imagens termográficas (Figura 37), demonstram que a tocha Infocus consegue manter uma temperatura menor (30 °C) que uma tocha convencional.

²³ A tocha Infocus é descrita como capaz de produzir um arco mais constrito pela delimitação da região de emissão de elétrons do eletrodo de tungstênio. Essa característica deve-se ao sistema de refrigeração do eletrodo, projeto e material da tocha. Para maiores informações acessar <http://www.kjellberg.de/files/Documents/Welding/Applications/High-Performance-Welding-InFocus.pdf>

²⁴ Ambas as tochas foram ensaiadas sob condições iguais. A corrente, a velocidade de soldagem e o comprimento do cordão de solda foram mantidos constantes.

Figura 37 - Imagens térmicas obtidas de uma tocha Infocus e uma tocha TIG convencional logo após terem sido empregadas na soldagem de um cordão de 27 cm, a mesma velocidade e com corrente de soldagem de 520 A.



Fonte: Olivares et al. (2015).

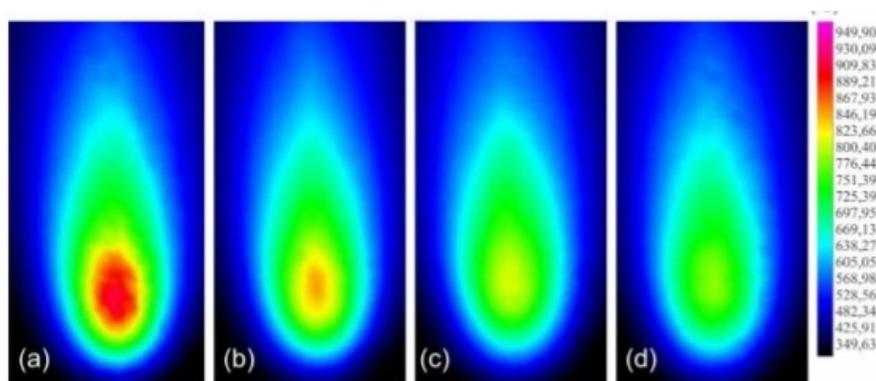
Este resultado demonstra que a tocha Infocus tem um sistema de refrigeração mais eficiente do que as tochas convencionais, o que torna possível a realização de cordões de solda em correntes bastante altas (mais de 1000 A) por grandes períodos de tempo.

O trabalho de Paes (2016) tratou sobre o emprego de soldagem TIG com alimentação dinâmica de arame na soldagem de passes de raiz em tubulações e avaliou seu desempenho no que diz respeito a produtividade além de outros fatores. Como parte da análise, foi qualificada a influência da alimentação dinâmica de arame²⁵ no gradiente térmico da poça de fusão. Para avaliar a influência da alimentação dinâmica de material sobre a poça de fusão, Paes instalou uma câmera termográfica embaixo de uma chapa de aço carbono enquanto se conduzia soldagem com TIG nos modos sem alimentação (processo autógeno), com alimentação contínua de arame e com alimentação dinâmica. A Figura 38 evidencia que a adição de material afeta a temperatura da poça de fusão e, que à medida que a frequência da alimentação dinâmica

²⁵ Entende-se por alimentação dinâmica como a imposição de um movimento recíproco linear (de avanço e retração) sobreposto à movimentação normal do arame. A reciprocidade é produzida pelo sistema de alimentação de arame, especialmente projetado para essa aplicação. Exemplos de modalidades do processo TIG que utilizam alimentação de arame podem ser encontrados em Rudy (1982), Wilson (2007) e Silva et al. (2019).

de arame aumenta temperatura da poça de fusão diminui. Este autor sugere que o resultado pode estar associado “ao fato do arame ter se deslocado para fora do arco voltaico e ter trocado calor com o ambiente” (PAES, 2016). Quando o arame retorna tem-se então, uma redução da temperatura da poça de fusão. Ademais, parte do calor do arco também se perde na fusão do arame de adição.

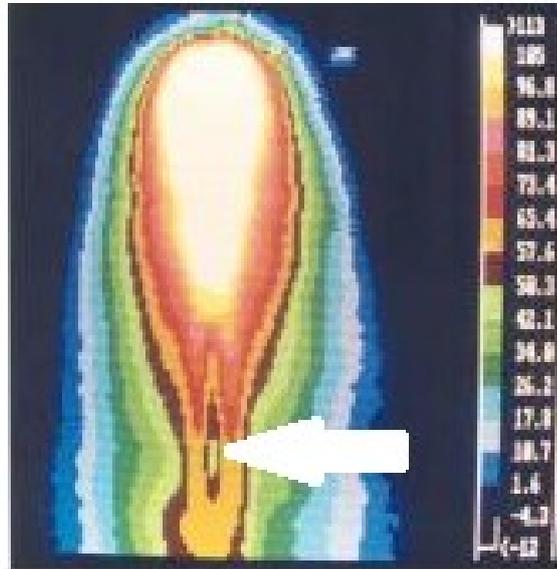
Figura 38 - Imagem térmica obtida com câmera embaixo de uma chapa de aço carbono enquanto estava sendo submetida a soldagem TIG de quatro maneiras diferentes: (a) processo autógeno; (b) processo com alimentação contínua; (c) processo com alimentação dinâmica e frequência de 1 Hz; (d) processo com alimentação dinâmica e frequência de 2 Hz.



Fonte: Paes (2016).

Embora o emprego de termografia na área de inspeção de soldagem ainda não esteja bem estabelecido, existem trabalhos que demonstram que há possibilidades nesta área. Cita-se por exemplo, o trabalho de Venkatraman et al. (2006) aponta para a possibilidade do uso de termografia para a detecção de falta de penetração na soldagem de raiz com TIG de juntas de topo formadas por chapas de aço inoxidável AISI 316 LN com 8 mm de espessura e com chanfro em “V”. Ao monitorar a soldagem de um passe de raiz em uma destas juntas, os autores identificaram a formação de um “ponto frio” na imagem térmica que denota falta de penetração nesta região (Figura 39).

Figura 39 - Identificação de um “ponto frio” em uma imagem termográfica na soldagem de um passe de raiz.



. Fonte: Venkatraman et al. (2006).

4 MIG/MAG PULSADO CC – SISTEMAS DE CONTROLE DE ARCO

Este capítulo traz a metodologia para o cumprimento do objetivo (1), presente no capítulo 1, item 1.3 que é de determinar a real funcionalidade dos sistemas de controle de forma de arco denominado como “*Wave control*” apresentados pela Lincoln em sua fonte de soldagem *Power Wave 455M* e pela OTC na sua fonte OTC DW-300, onde o sistema de controle é denominado “*Arc control*”. Subsequentemente a metodologia se tem então os resultados para estes ensaios e análise relativas aos dois sistemas.

4.1 METODOLOGIA

Para leitura e caracterização das formas de onda de cada fonte de soldagem, empregou-se o Sistema de Aquisição Portátil (SAP) (LABSOLDA, 2015). A leitura de tensão foi realizada entre o conector da tocha de soldagem e o grampo de fixação do cabo-terra. Um sensor de efeito Hall para leitura da corrente foi instalado no cabo-terra enquanto um sistema de medição de velocidade de arame (desenvolvido no LABSOLDA-UFSC) foi instalado diretamente no tracionador de arame. Mais especificamente, o cálculo da corrente média e da tensão média são calculados pelas Equações (13) e (14) respectivamente. A potência é calculada por intermédio da Equação (15).

$$I_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (13)$$

Onde:

I_m = Corrente Média (A);

I_i = Corrente Instantânea (A).

$$U_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (14)$$

Onde:

U_m = Tensão Média (V);

U_i = Tensão Instantânea (V).

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i U_i \quad (15)$$

Onde:

P = Potência (W)

I_i = Corrente Instantânea (A).

U_i = Tensão Instantânea (V).

As características geométricas dos cordões de solda, mais especificamente penetração, altura do reforço, diluição e ângulo de molhamento em cada amostra, foram avaliadas por meio de ensaios macrográficos. As dimensões dos corpos de prova de aço ao carbono (SAE 1020) foram de 200 x 60 x 9 mm.

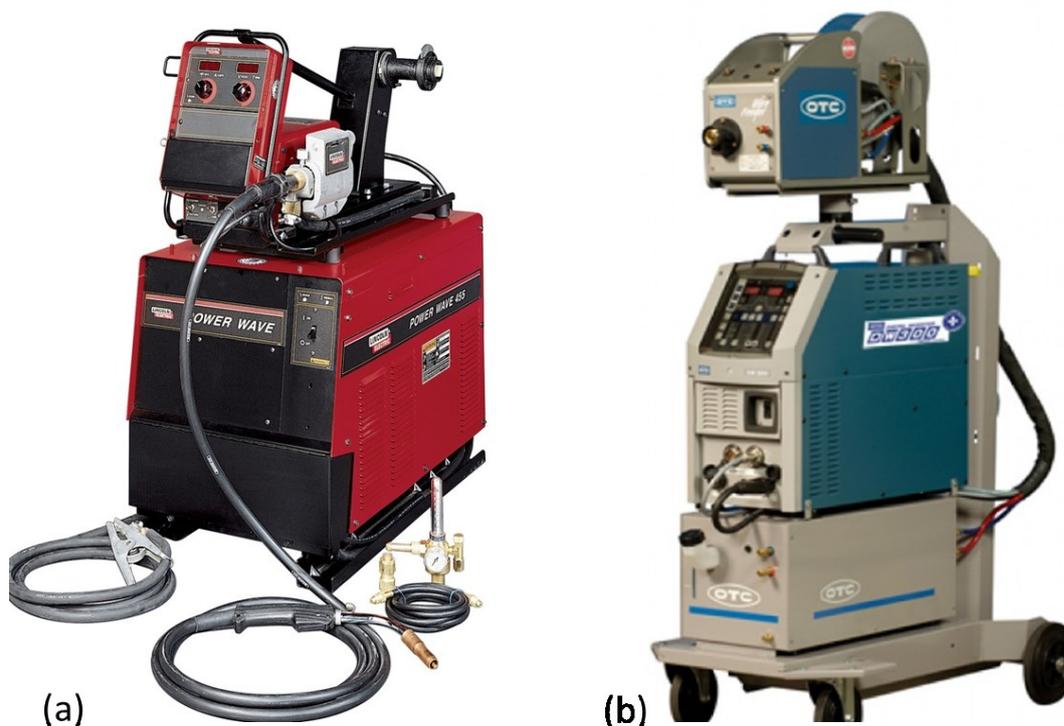
A distância bico de contato-peça (DBCP) e o ângulo de tocha foram respectivamente de 12 mm e de 90° em relação à superfície da peça de trabalho para todos os ensaios. O arame empregado foi o ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm e a velocidade de alimentação de arame (V_a) foi de 5 m/min. O gás de proteção empregado foi 95% Ar + 5% CO₂ com vazão de 12 l/min

O comprimento do arco voltaico foi monitorado por intermédio de filmagens conduzidas com uma câmera HEMA Modelo Seelector ICAM-HD4 (HEMA, 2015). Posteriormente as filmagens foram analisadas e comprimento de arco foi mensurado para cada ensaio em um *software* para tratamento de imagens.

Como sistema de movimentação de tocha, utilizou-se o robô antropomórfico YASKAWA MOTOMAN modelo YR-UP6-A02 (MOTOMAN, 1999). A tocha de soldagem foi instalada em um suporte enquanto o robô movimentava a peça de trabalho, situação mais conveniente para filmagens. A velocidade de soldagem (V_s) foi de 45 cm/min.

As fontes empregadas foram a Lincoln *Power Wave* 455M (Figura 40.a) e OTC DW-300 (Figura 40.b). Ambas possuem um sistema de controle de frequência de pulso de corrente que as fabricantes alegam ter efeito sobre o formato do arco. Quando a frequência é mais baixa o arco é menos constricto (*soft*) enquanto que quando a frequência é mais alta o arco é mais constricto (*stiff*)

Figura 40 – (a) Fonte de soldagem Lincoln *Power Wave* 455M com sistema *Wave control*. (b) Fonte de soldagem OTC DW-300 com sistema *Arc Control*.

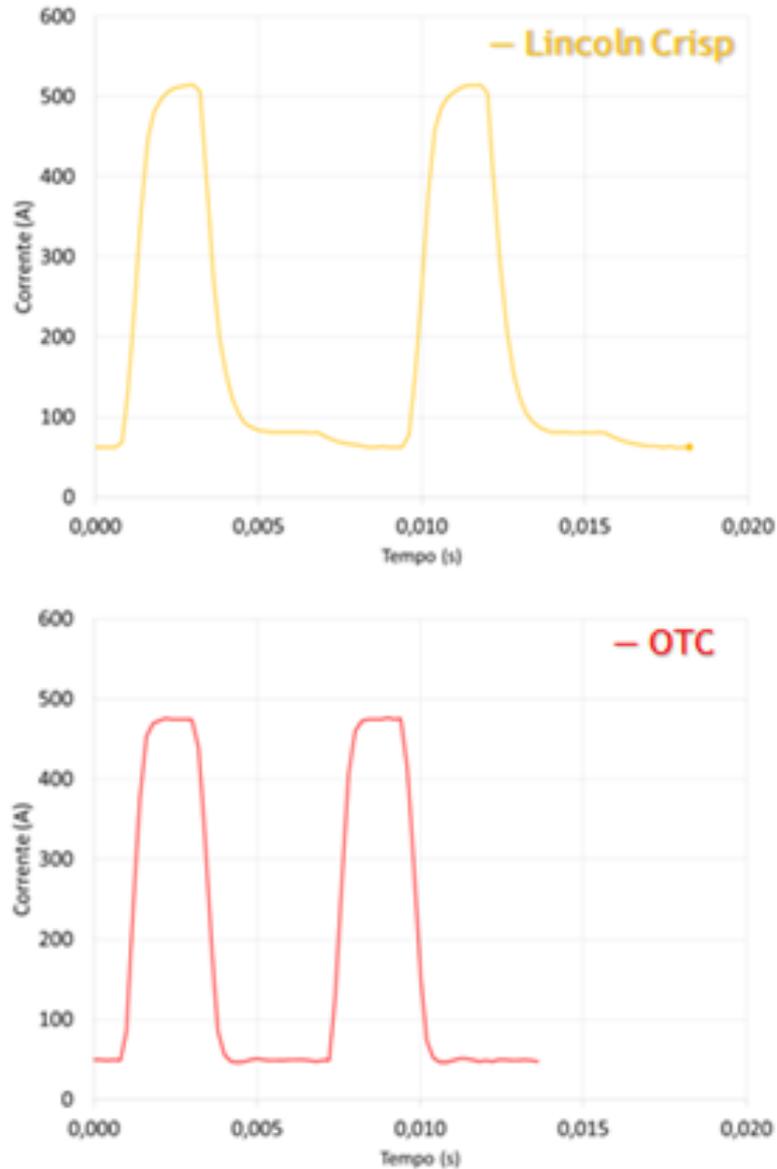


Fontes: Airgas (2020); Mechanicsystem (2020).

4.2 CONTROLE DO FORMATO DO ARCO VOLTAICO – *ARC CONTROL E WAVE CONTROL*

As formas de onda de corrente dos sistemas sinérgicos da Lincoln *Power Wave* 455M e da OTC DW-300 são apresentadas na Figura 41. A fonte da OTC apresenta apenas uma forma de onda para arames de aço ao carbono enquanto a fonte da *Lincoln* apresenta os sistemas *Soft* e *Crisp*, sendo que neste trabalho, apenas o segundo foi objeto de análise. A leitura das formas de onda foi conduzida com os sistemas de controle de arco desabilitado, ou seja, na regulação *OFF* para a fonte da Lincoln e 0 (zero) para a fonte da OTC.

Figura 41 - Formas de onda de corrente da Lincoln e da OTC. Os sistemas de controle de arco estavam desabilitados (posição *OFF* ou “0”).



A forma de onda do sinérgico da Lincoln tem características bastante similares às aquelas mostradas na Figura 5 (Capítulo 2), com rampas de aumento e diminuição de corrente e uma fase de destacamento de gota. A forma de onda da *OTC* possui as rampas, porém a forma de onda se aproxima mais da forma retangular apresentada na Figura 1 (Capítulo 2). A Tabela 5 apresenta os valores para os parâmetros do pulsado (t_p , I_p , t_b , I_b , t_d , I_d) para os oscilogramas

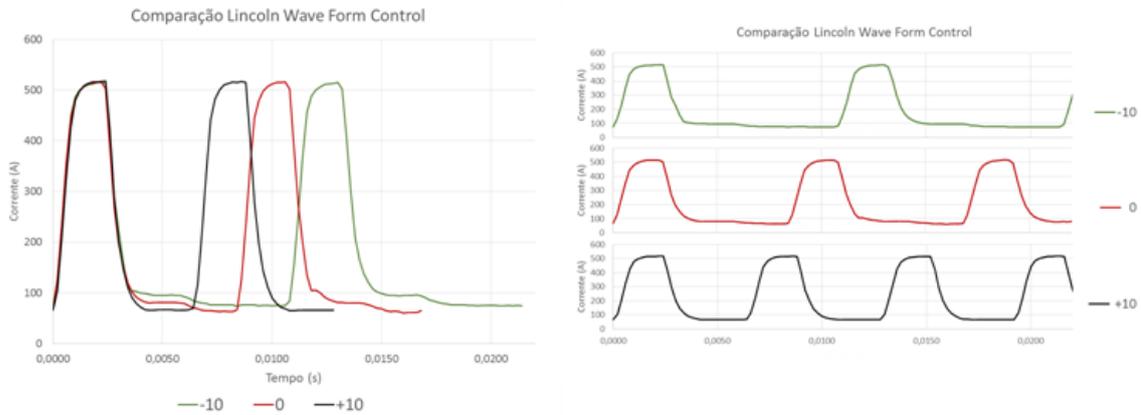
da Figura 41, medidos por intermédio de leituras realizadas no SAP e com os sistemas de controle de arco na posição *OFF* (*Power Wave 455M*) ou zero (*DW-300*)

Tabela 5 -Valores dos parâmetros para as formas de onda das fontes avaliadas. Sendo: t_p = tempo de pulso; t_d = tempo de destacamento, t_b = tempo de base; I_p = corrente de pulso; I_d = corrente de destacamento e; I_b = corrente de base.

	OTC	Lincoln Crisp
Frequência (Hz)	156,3	117,7
t_p (ms)	2,2	2,4
t_d (ms)	-	3,6
t_b (ms)	4,2	2,4
I_p (A)	474	515
I_d (A)	-	80
I_b (A)	49	62

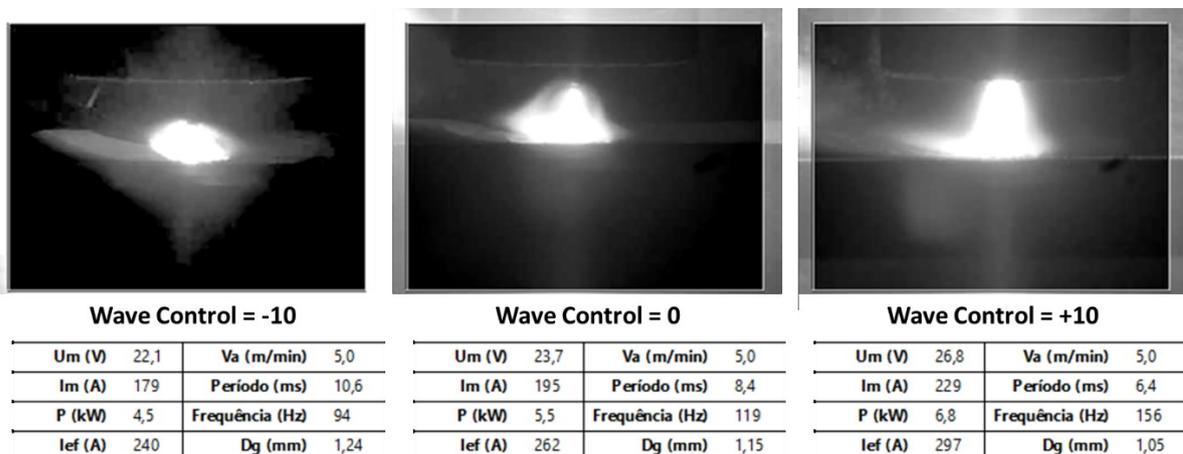
A Figura 42 mostra uma comparação entre as formas de onda da *Lincoln* quando os valores de *Wave Control* estão regulados em zero (*OFF*), +10 e -10. Nota-se que a maior frequência de pulso ocorre para a regulagem +10, conforme é descrito no manual da fonte *Power Wave 455M/ST*. A corrente de base também é a menor dos valores testados que diminui de 85 A na regulagem -10 para 67 A na posição + 10. Em suma, o sistema mantém constante a corrente de pulso e tempo de pulso mas diminui a corrente de base e tempo de base a medida que o valor do *Wave Control* é aumentado de -10 a +10. Isto resulta em um aumento da frequência de pulso que supostamente deve levar a mudança no formato do arco. Os valores de corrente de destacamento e tempo de destacamento também são alterados, a ponto de inexistir esta fase no valor de +10 (maior frequência de pulso).

Figura 42 - Oscilogramas de corrente para os valores de *Wave Control* -10; 0; +10.



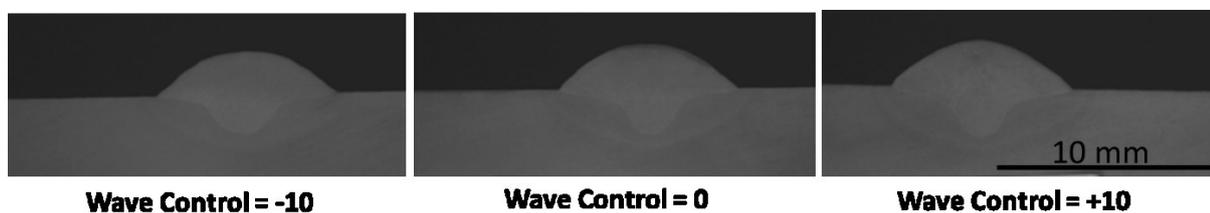
Contudo, mesmo com estas alterações na forma de onda, não há uma preocupação da empresa fabricante em manter a corrente média. Para uma V_a de 5,0 m/min, tem-se um aumento de 179 A em -10, passando por 195 A em 0 até 229 A em +10. Isto provocou um aumento do comprimento de arco mensurado a partir das filmagens exemplificadas na Figura 43. Na situação de menor frequência de pulso (regulagem -10), o comprimento medido foi de 3,4 mm na regulagem -10 e chegou a mais de 9,2 em +10. Esta abordagem praticamente invalida a proposta do sistema de tornar o arco mais constrito. Para manter o mesmo comprimento de arco o operador deve realizar uma segunda regulagem no sistema de comprimento de arco chamada de *TRIM* na fonte de soldagem *Power Wave 455M*.

Figura 43 - Comprimento de arco no sistema *Wave Control* da Lincoln. Valores de *Wave Control* -10; 0; +10.



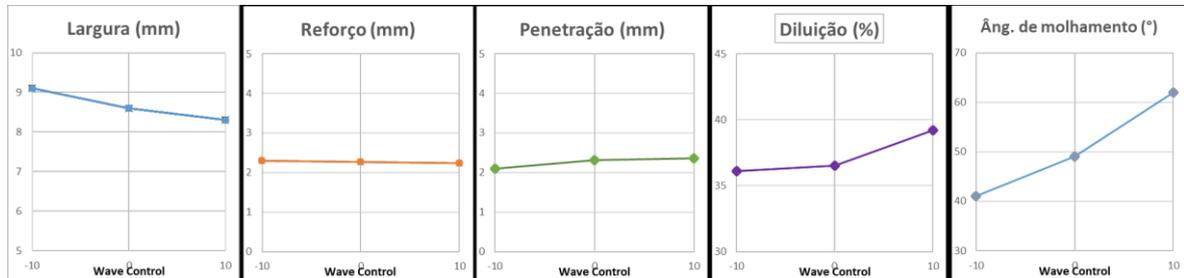
A alteração de frequência de pulso, sem que haja preocupação em manter a corrente média, afeta a geometria do cordão de solda de modo que cada vez mais se tem um formato do tipo “*finger shape*”. Como se constata na Figura 44, a penetração foi maior na condição +10,0 (maior frequência de pulso), embora não por muito. Não se pode atribuir este resultado unicamente à maior frequência de pulso ou uma suposta constrição do arco, já que não há maior cuidado em relação a corrente média que aumentou de 179 A na regulagem -10 (menor frequência de pulso) para 229 em +10. Considerando a proposta do sistema, este fato poderá ser prejudicial quando se está soldando chapas de menor espessura ou mesmo fora-de-posição. O operador pode realizar um ajuste de *Wave Control* buscando uma condição mais favorável para uma determinada operação de soldagem e causar a perfuração da chapa (especialmente se não houver alteração da velocidade de soldagem) ou causar o “escorrimento” do material fundido em uma soldagem na posição sobre cabeça, por exemplo. Dentro das questões de ordem prática, há ainda o risco de fusão do bico de contato, já que o aumento do comprimento de arco é considerável.

Figura 44 - Macrografias dos cordões de solda realizados com o sistema Wave Control. Valores de Wave Control -10; 0; +10.



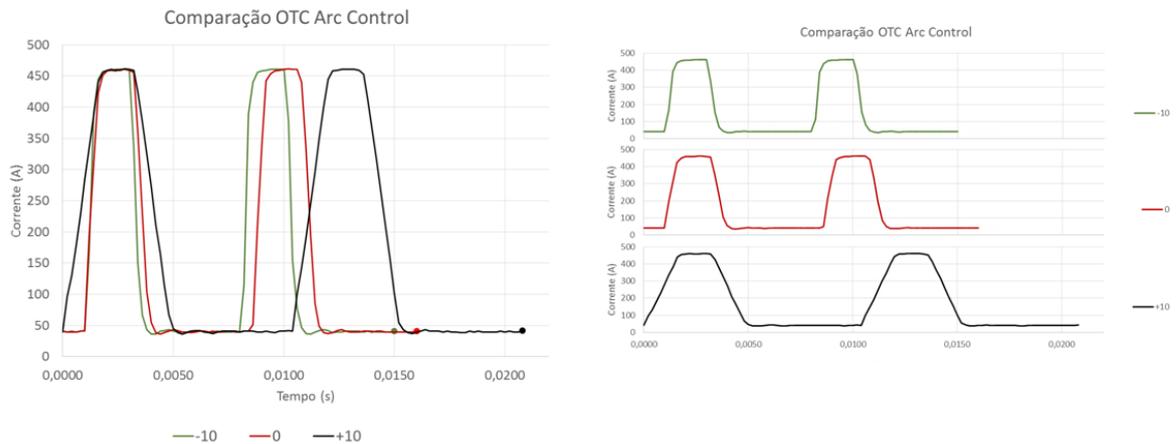
Os resultados das medições de penetração de solda e demais características geométricas (largura, altura do reforço, penetração de solda, diluição e ângulo de molhamento), são mostradas na Figura 45. Aparentemente, a variação do comprimento de arco tem alguma influência na largura, diluição e ângulo e principalmente, no ângulo de molhamento. E, provavelmente, pelo mesmo motivo, os demais valores praticamente não sofreram alterações de um cordão para outro.

Figura 45 - Os resultados das medições das características geométricas dos cordões de solda realizados com a fonte da Lincoln.



A Figura 46 mostra uma comparação entre as formas de onda da *OTC* quando os valores de *Arc Control* regulados em zero, -10 e +10. Este sistema mantém a corrente de pulso e a corrente de base e altera frequência de pulso, tempo de base, tempo de pulso e rampa de elevação/decaimento de corrente. A maior frequência de pulso ocorre quando o sistema está regulado em -10.

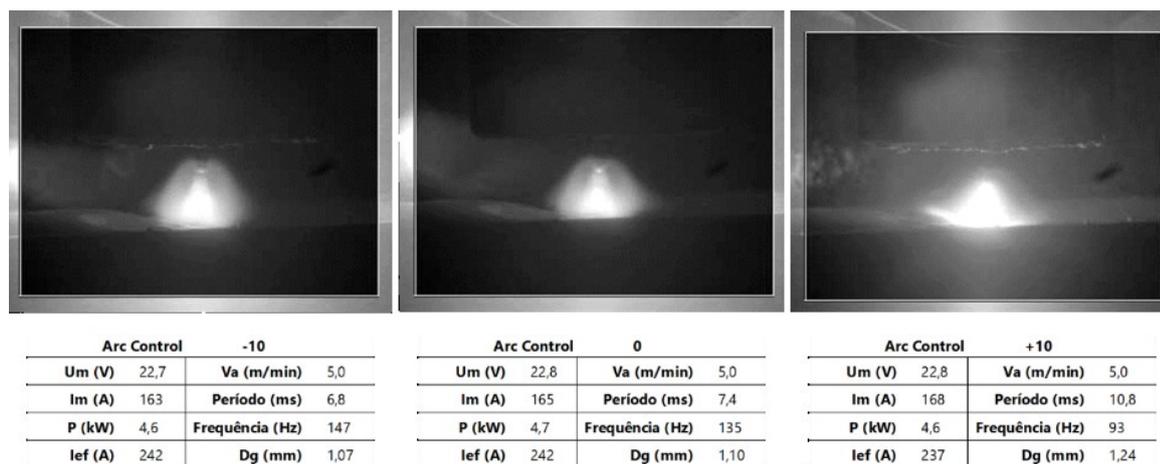
Figura 46 - Oscilogramas de corrente para os valores de Arc Control -10, 0, +10.



Ao contrário do que acontece no *Wave Control*, a variação de comprimento de arco e corrente média é significativamente menor conforme se constata na Figura 47. No *Arc Control* da fonte OTC DW-300 (OTC, 2012) também há alteração nestes parâmetros, contudo a variação é consideravelmente menor, o que parece evidenciar uma maior preocupação da fabricante quanto a este aspecto. A alteração no comprimento de arco e corrente média é de

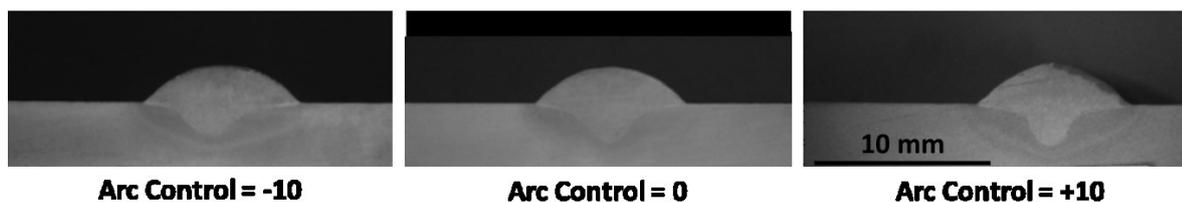
apenas 1,2 mm e 5 A, respectivamente. Para fins práticos, esta característica é desejável, pois não obriga o operador a realizar regulagens adicionais de comprimento de arco. Ademais, o risco de perfuração na soldagem de chapas finas é menor assim como a possibilidade de “escorrimento” do material de adição em soldagens fora-de-posição.

Figura 47 - Comprimento de arco no sistema *Arc Control* da OTC. Valores de *Arc Control* -10, 0, +10.



As macrografias são apresentadas na Figura 48 e demonstram que a maior penetração ocorre para a condição +10 (menor frequência de pulso e corrente média ligeiramente mais alta em relação as demais).

Figura 48 - Macrografias dos cordões realizados com o sistema *Arc Control* da OTC.



A Figura 49 mostra, em forma de gráfico, os valores mensurados para as características geométricas dos cordões de solda realizados com a fonte da *OTC*. Apenas a penetração e o ângulo de molhamento apresentam uma tendência definida. As duas características aumentam a medida que o valor de *Arc Control* passa de -10 para +10. A Tabela 6 resume os resultados apresentados neste item.

Figura 49 - Os resultados das medições das características geométricas dos cordões de solda realizados com a fonte da OTC.

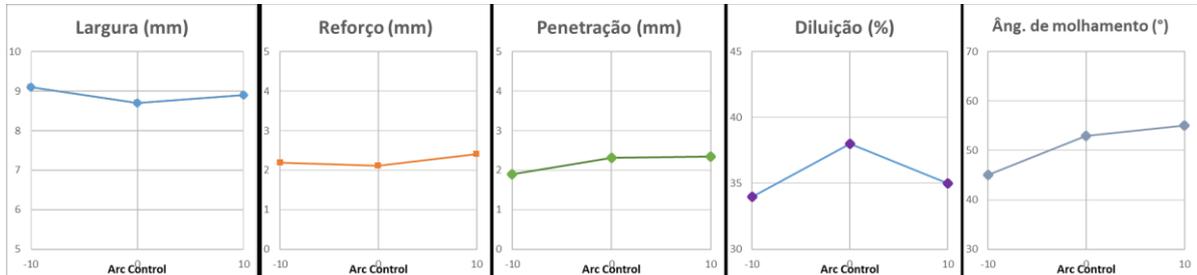


Tabela 6 - Comparação entre os sistemas Lincoln *Wave Control* e OTC *Arc Control*.

Lincoln <i>Wave Control</i>	OTC <i>Arc Control</i>
<ul style="list-style-type: none"> Altera frequência de pulso (f); Altera tempo de base (t_p); Altera corrente de base (I_b). 	<ul style="list-style-type: none"> Altera frequência de pulso (f); Altera tempo de base (t_p); Altera tempo de pulso (t_p); Altera rampa de subida/descida de corrente.
<ul style="list-style-type: none"> Mantém corrente de pulso (I_p); Mantém tempo de pulso (t_p). 	<ul style="list-style-type: none"> Mantém corrente de pulso (I_p); Mantém corrente de base (I_b).
<p>Para uma mesma velocidade de alimentação de arame (v_a):</p> <ul style="list-style-type: none"> Alteração significativa da corrente média (de 179 A até 229 A); Alteração significativa do comprimento de arco (de 3,4 mm até 9,2 mm, sendo que neste último valor já não foi possível ver a posição de ancoragem do arco); 	<p>Para uma mesma velocidade de alimentação de arame (v_a):</p> <ul style="list-style-type: none"> Alteração mínima de corrente (de 163 A até 168 A); Alteração mínima do comprimento de arco (de 4,2 até 5,4).

5 MIG/MAG PULSADO CC - FORMAS DE ONDA AVANÇADAS E ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Este capítulo traz a metodologia e resultados concernentes ao objetivo (2), presente no capítulo 1, item 1.3. A motivação é comparar cinco formas de onda de corrente e seu relacionamento com transferência metálica, destacamento de gotas, condição UGPP ou MGPP, geração de respingos, características geométricas dos cordões de solda resultante da soldagem com cada forma de onda.

5.1 METODOLOGIA

As fontes de soldagem empregadas trabalho foram Fronius CMT *Advanced* 4000R, OTC DW300, Lincoln *Power Wave* 455M e IMC Digitec 600 (Figura 50), que apresentam sistemas sinérgicos que se distinguem pela abordagem de cada fabricante em relação ao MIG/MAG Pulsado CC. Cabe informar que a fonte da Lincoln apresenta dois sistemas sinérgicos (“*Pulse Crisp*” e “*Pulse Soft*”), de forma que foram testadas cinco formas de onda diferentes. Para facilitar o entendimento, se fará referência a estes sistemas como *Lincoln Crisp* e *Lincoln Soft* ao longo do texto. A fonte IMC Digitec 600 foi empregada principalmente devido a particularidade de permitir regulagem manual de parâmetro de pulsação. Desta forma, foi possível regular um conjunto de parâmetros com abordagem oposta ao das fontes anteriores, gerando uma forma de onda “clássica” semelhante àquelas que constam em publicações da década de 1980 e 90 (AMIN, 1981) (ESSERS E GOMPEL, 1984) (UEGURI ET AL., 1985).

Figura 50 - Fontes de soldagem empregadas nos ensaios.

FRONIUS
CMT *Advanced* 4000R



OTC DW 300



Lincoln *Power Wave*
455M



IMC Digitec 600



Para avaliação das características geométricas dos cordões de solda, foram realizados cordões sobre chapa para cada sistema sinérgico. As dimensões dos corpos de prova de aço ao carbono (SAE 1020) foram de 200 x 60 x 9,6 mm. Foram conduzidos ensaios macrográficos que permitiram a medição da largura do cordão de solda, penetração, altura do reforço, diluição e ângulo de molhamento em cada amostra. O reagente na preparação da amostra foi Nital 5%. A distância bico de contato-peça (DBCP) e o ângulo de tocha foram respectivamente de 12 mm e de 90° em relação à superfície da peça de trabalho. O arame empregado foi o ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm e velocidade de alimentação de arame (v_a) de 5 m/min. O gás de proteção foi 95%Ar + 5%CO₂ com vazão de 12 l/min.

O comprimento do arco voltaico foi monitorado por intermédio de filmagens conduzidas com uma câmera HEMA Modelo Seelector ICAM-HD4 (HEMA, 2015). Desta forma, foi possível manter o comprimento de arco entre 4 e 5 mm, minimizando a influência desta variável sobre as características do cordão de solda. Posteriormente as filmagens foram analisadas e comprimento de arco foi mensurado para cada ensaio em um software para tratamento de imagens.

Como sistema de movimentação, utilizou-se o robô antropomórfico YASKAWA MOTOMAN modelo YR-UP6-A02 (MOTOMAN, 1999). A tocha de soldagem foi instalada em um suporte enquanto o robô movimentava a peça de trabalho, situação mais adequada para as filmagens. A velocidade de soldagem (V_s) foi de 45 cm/min.

Para leitura e caracterização das formas de onda de cada fonte de soldagem, empregou-se o Sistema de Aquisição Portátil (SAP) (LABSOLDA, 2015). A leitura de tensão foi realizada entre o conector da tocha de soldagem e o grampo de fixação do cabo-terra. Um sensor de efeito Hall para leitura da corrente foi instalado no cabo-terra enquanto um sistema de medição de velocidade de arame (desenvolvido no LABSOLDA-UFSC) foi instalado diretamente no tracionador de arame.

Por fim, foram realizadas filmagens de alta velocidade para avaliação da transferência metálica para cada processo pulsado com uma câmera Y4-S2, da empresa fabricante IDT (IDT, 2015). A camera de alta velocidade operou a uma frequência de aquisição de imagens de 4160 Hz em conjunto com o laser CAVILUX HF - Class 4 com potência de 500 W e comprimento de onda de 810 nm.

O Tabela 7 resume as condições respeitadas em todos os ensaios, além do aparato experimental empregado.

Tabela 7 - Equipamentos e condições de soldagem.

Condições de soldagem:
Corpos de Prova: Aço Carbono; 200 x 60 x 9 mm
Arame: ER70S-6; Ø1,2 mm
Velocidade de alimentação: 5 m/min
Gás: 95%Ar + 5%CO ₂
Vazão: 12 l/min
Velocidade de soldagem: 45 cm/min
DBCP = 12 mm
Comprimento de arco: 4-5 mm
Aparato Experimental:
Câmera HEMA Modelo Seelector ICAM-HD4
Câmera de Alta Velocidade Y4-S2
Robô Antropomórfico YASKAWA MOTOMAN modelo YR-UP6-A02
Sistema de Aquisição Portátil (SAP)

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMAS DE ONDA E TRANSFERÊNCIA METÁLICA

A análise das formas de onda das fontes de soldagem (Figura 51) demonstra que as fontes de soldagem empregam correntes de pulso altas (de 451 a 556 A) e tempos de pulso curtos (de 1,5 até 2,4 ms) conforme apresentado na Tabela 8. Regulou-se uma corrente de pulso de 291 A na fonte Digitec 600 em uma estratégia oposta à das demais fontes empregadas para fins de comparação, conforme comentado anteriormente.

No tocante ao MIG/MAG Pulsado, inicialmente os pesquisadores consideraram como condição para o destacamento estável de gotas, apenas o uso de correntes de pulso acima do valor de transição (Amin, 1983), sem mais recomendações. Mais tarde, Ueguri et al. (1985) complementaram este estudo recomendando o uso de correntes de pulso de no mínimo 380 A para condições de soldagem semelhantes às empregadas neste trabalho. Segundo estes últimos, para um arame de aço (ER70S-G, Ø 1,2 mm) em valores abaixo de 380 A, a gota metálica tende a oscilar na extremidade do eletrodo não ocorrendo destacamento durante o pulso ou

posteriormente, independentemente do tempo de pulso. Como resultado, a gota se torna maior e provoca instabilidade de arco acompanhado de curtos-circuitos.

Figura 51 - Formas de onda das fontes empregadas

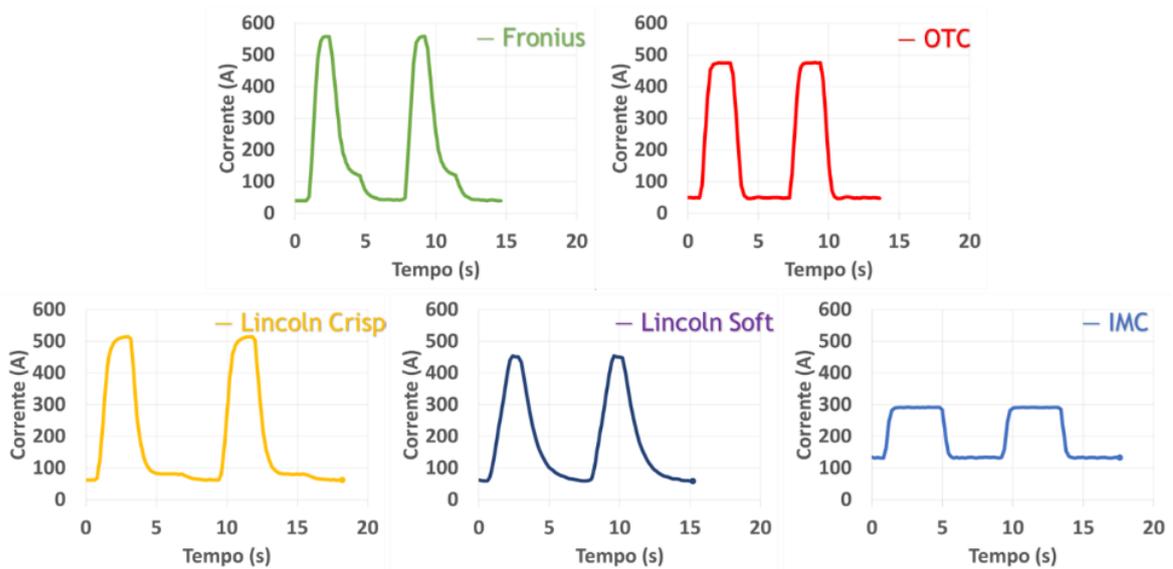


Tabela 8 - Valores dos parâmetros para as formas de onda. Sendo: t_p = tempo de pulso; t_d = tempo de destacamento, t_b = tempo de base; I_p = corrente de pulso; I_d = corrente de destacamento e; I_b = corrente de base.

	Fronius	OTC	Lincoln Crisp	Lincoln Soft	IMC
Frequência (Hz)	140,0	156,3	117,7	138,5	118,9
T_p (ms)	1,5	2,2	2,4	2,2	4,1
T_d (ms)	2,1	-	3,6	-	-
T_b (ms)	3,5	4,2	2,4	5,0	4,3
I_p (A)	556	474	515	451	291
I_d (A)	125	-	80	-	-
I_b (A)	38	49	62	59	133

Apesar de as formas de onda dos sistemas sinérgicos da fonte Fronius e *Lincoln Crisp* incorporarem uma fase de destacamento de gota, caracterizada por t_d e I_d , apenas no primeiro sistema o destacamento da gota realmente ocorreu na fase de destacamento como se constata a partir da Figura 52, que mostra imagens de filmagem de alta velocidade sincronizada com a aquisição dos sinais de tensão e corrente. Sendo a corrente de destacamento apenas 18 A acima

da corrente de base (62 A), levanta-se certas dúvidas quanto a real eficácia desta abordagem neste sistema. Por fim, o sistema da fonte Fronius CMT *Advanced* 4000R obedeceu à condição UGPP, fato que não ocorreu no sistema *Lincoln Crisp*, conforme mostra a Figura 53.

Figura 52 - Transferência metálica no sistema sinérgico da Fronius CMT *Advanced* 4000R que produz o destacamento de uma gota por pulso. O destacamento da gota ocorre no início da fase de destacamento.

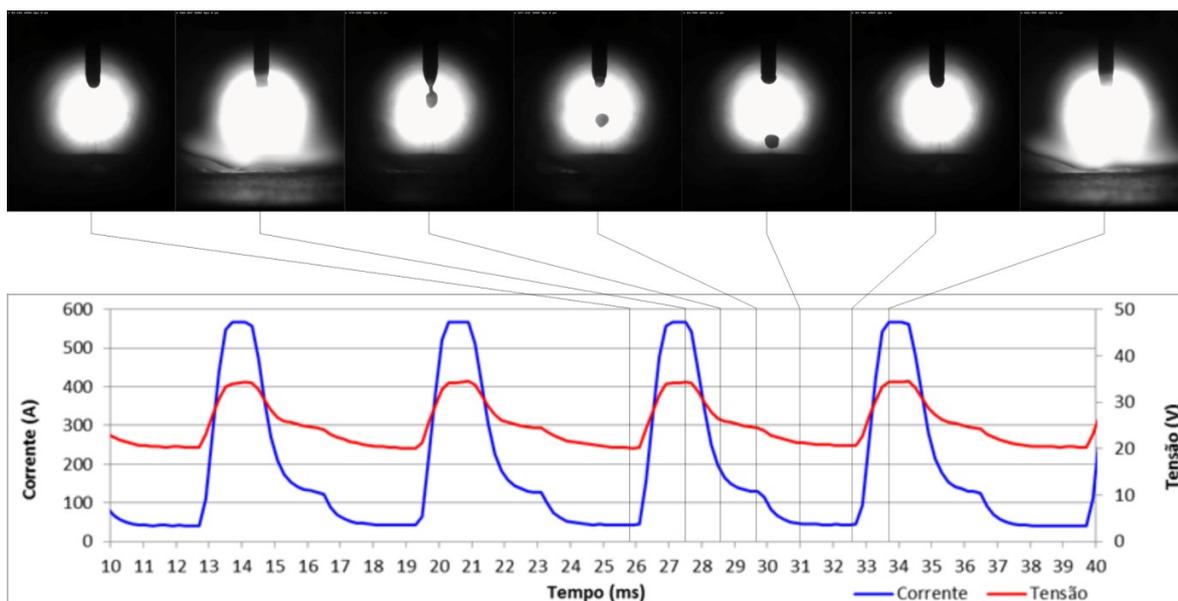
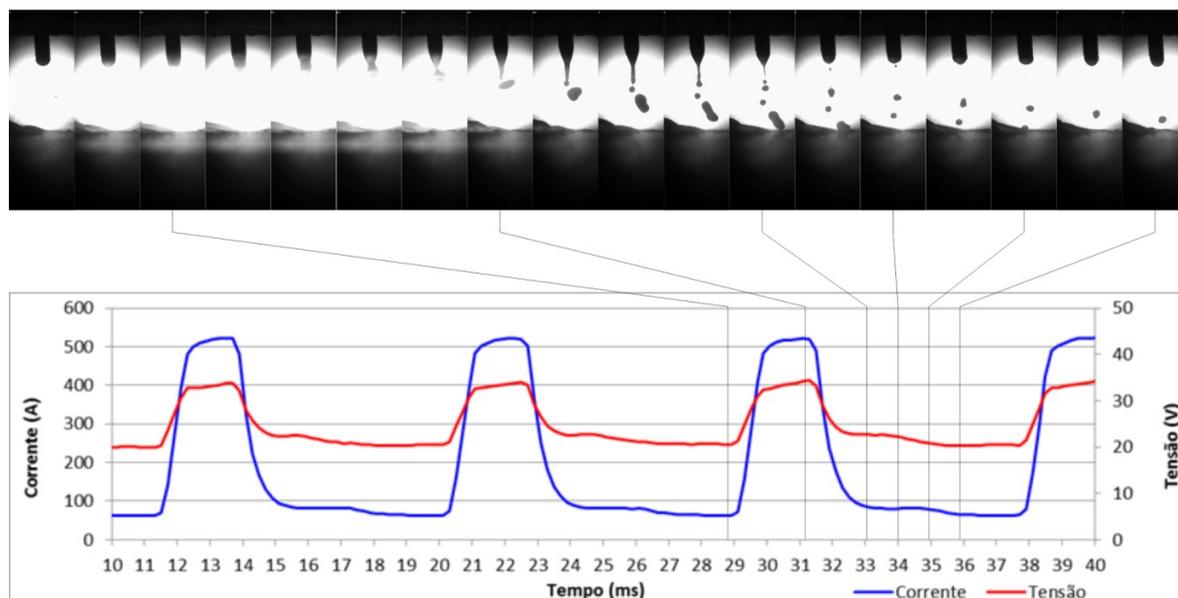


Figura 53 - Transferência metálica no sistema sinérgico *Lincoln Crisp*, que produz o destacamento de uma gota principal e de gotas secundárias por pulso. O destacamento ocorre no final da fase de pulso.



O sinérgico da *OTC* apresente uma forma de onda trapezoidal com rampas de subida e descida de corrente. O destacamento de gota ocorre na base já que não há uma fase de destacamento. No entanto, as filmagens mostram que a transferência metálica está longe da condição UGPP. A Figura 54 mostra o destacamento de uma gota principal logo após o término do pulso, com posterior destacamento de gotas secundárias de menor diâmetro que geralmente completam sua transferência no pulso seguinte.

A forma de onda denominada de *Lincoln Soft* utiliza uma estratégia diferente sendo que logo após o pulso há uma rampa de decaimento de corrente (*tail-out*). Este sistema também produz o destacamento de uma gota por pulso, conforme evidencia a Figura 55. O destacamento de gota ocorre alguns instantes antes do final do *tail-out*.

Figura 54 - Transferência metálica no sistema sinérgico da fonte OTC DW-300 que produz o destacamento de uma gota principal pulso seguido de gotas secundárias. A gota se destaca no início da base.

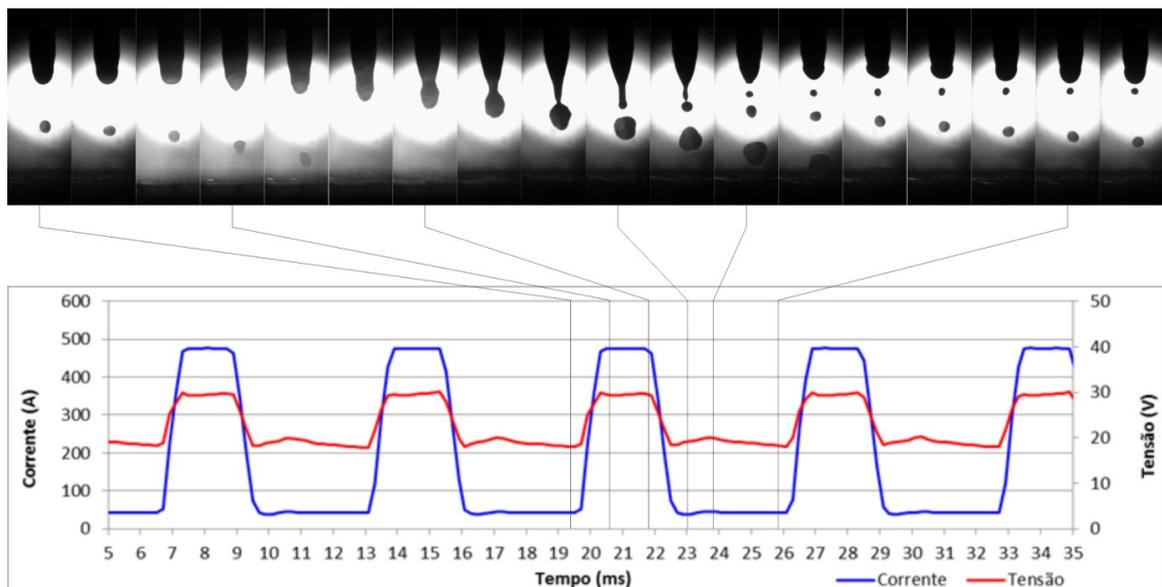
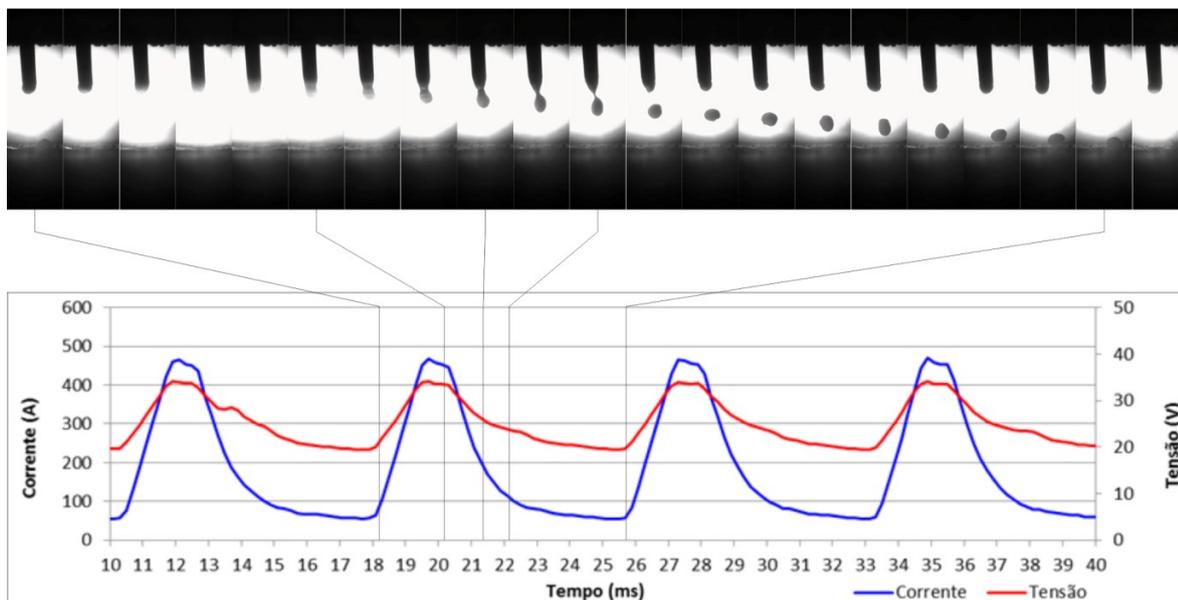
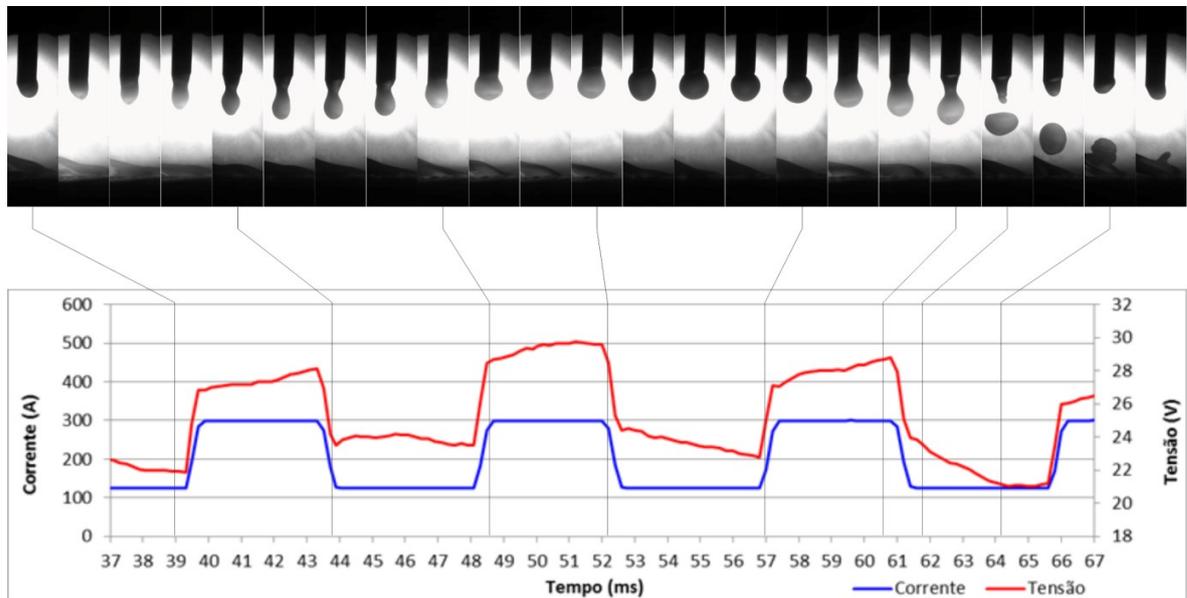


Figura 55 - Transferência metálica no sistema sinérgico *Lincoln Soft* que produz o destacamento de uma gota por pulso. A gota completa seu destacamento nos instantes finais do *tail-out*.



A parametrização empregada na fonte da IMC apresenta uma I_p de 291 A e um t_p de 4,1 ms. As filmagens de alta velocidade endossam os resultados de Ueguri et al. (1985). Para esta parametrização, há uma tendência de a gota não ser destacada com a ação de apenas um pulso, mas apenas depois de um segundo e em alguns casos de um terceiro (Figura 56). Nos quadros que vão de 44 ms até 48 ms sugere que as forças eletromagnéticas não foram suficientes para sobrepujar a ação da tensão superficial. Como resultado a gota não é destacada nem neste pulso e nem no pulso subsequente. Mesmo com esta anormalidade, não ocorreram maiores instabilidades como curtos-circuitos durante a soldagem, por exemplo.

Figura 56 - Transferência metálica da parametrização da fonte Digitec 600. Com a parametrização programada na fonte, a gota metálica só é destacada depois da ocorrência de mais de um pulso.



5.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS CORDÕES DE SOLDA

A Figura 57 mostra a aparência superficial dos cordões de solda e evidencia que mesmo com a ocorrência de anormalidades na transferência metálica em alguns sistemas sinérgicos não há um prejuízo apreciável na aparência dos cordões. A Tabela 9 mostra os resultados para tensão média (U_m), corrente média (I_m), Potência (P) dentre outros, calculados por intermédio do SAP.

Figura 57 - Aparência superficial dos cordões de solda.

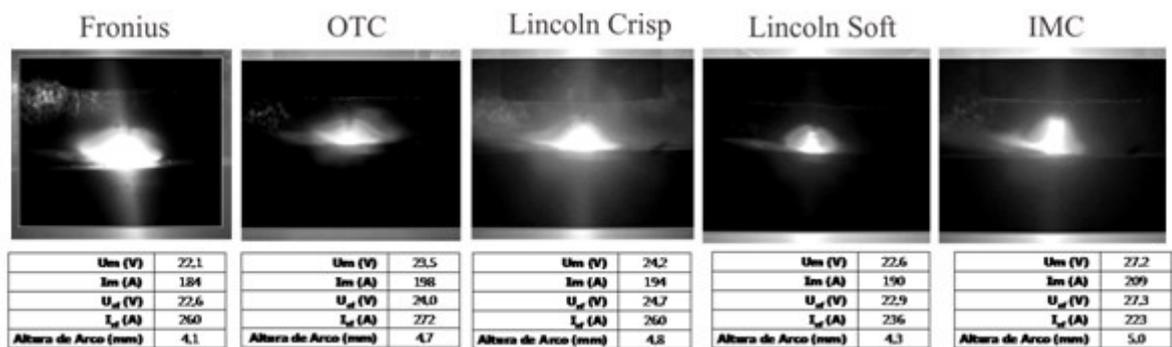
Tabela 9 - Resultados para tensão média (U_m), corrente média (I_m), velocidade de alimentação de arame (v_a), Potência (P), tensão eficaz (U_{ef}), corrente eficaz (I_{ef}) dentre outros calculados via SAP.

	Fronius	OTC	Lincoln Crisp	Lincoln Soft	IMC
U_m (V)	22,1	23,5	24,2	22,6	27,2
I_m (A)	184	198	194	190	209
v_a (m/min)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
P (kW)	4,9	5,5	5,5	4,8	5,9
U_{ef} (V)	22,6	24,0	24,7	22,9	27,3
I_{ef} (A)	260	272	260	236	223
Frequência (Hz)	140,0	156,3	117,7	138,5	118,9
Diâmetro de gota (mm)	1,08	1,05	1,15	1,09	1,15
Comprimento de Arco (mm)	4,1	4,7	4,8	4,3	5,0
Velocidade das gotas (m/s)	1,6	1,5	1,7	0,7	0,6

As filmagens executadas com a câmera HEMA (Figura 58) permitiram um controle satisfatório do comprimento de arco que foi mantido em valores que variaram entre 4,1 e 5 mm, conforme apresentado na Tabela 9. Adotou-se esta medida a fim de minimizar o efeito do comprimento de arco sobre o resultado da soldagem. A corrente média foi maior para a fonte

da IMC (209 A) que também teve o maior comprimento de arco, lembrando que todos os ensaios foram realizados com a mesma velocidade de alimentação de arame. Em contraposição ao resultado da fonte IMC Digitec 600, a corrente média da Fronius foi a menor ($I_m = 184$ A) assim como o comprimento de arco (4,1 mm).

Figura 58 - Imagens realizadas com a câmera HEMA para monitoração do comprimento de arco.



A regulagem de comprimento de arco da IMC Digitec 600 atua na velocidade de alimentação de arame do processo. Ou seja, para aumentar o comprimento de arco esta é diminuída em 0,1 m/min para cada acionamento no controle de correção. Esta abordagem mantém a corrente média constante o que é uma vantagem do ponto de vista prático. Porém, esta particularidade tornou mais difícil a obtenção de um comprimento de arco dentro da faixa pretendida. Nas demais fontes, a regulagem de comprimento de arco se dá pela atuação na frequência de pulso de corrente, o que acarreta em alteração da corrente média, mas mantém a velocidade de arame constante.

As macrografias são apresentadas na Figura 59 enquanto os resultados das medições são mostrados nos gráficos da Figura 60. Para facilitar o entendimento, inicialmente se analisará os resultados separando as fontes em três grupos, o primeiro formado por Fronius e *Lincoln Soft* (que destacam uma gota por pulso), o segundo por OTC e *Lincoln Crisp* (que destacam mais de uma gota por pulso) e em terceiro a IMC. Os valores para as características geométricas são valores mensurados nas amostras macrograficas para cada cordão de solda e, conseqüentemente, para cada forma de onda.

1º) O sinérgico da Fronius CMT *Advanced* 4000i apresentou uma frequência de pulso de 140 Hz, com corrente média de 184 A (a menor de todos os sistemas analisados) e potência de 4,9 kW. A penetração de solda dos cordões foi de 2,3 mm com diluição de 37%. O sistema *Lincoln Soft* produziu cordões de solda com a mesma penetração e diluição levemente menor (35%) com corrente média de 190 A e potência de 4,8 kW. Com relação a penetração e diluição, os cordões de solda são praticamente equivalentes. As diferenças estão na largura, altura do reforço e ângulo de molhamento. A diferença mais significativa está no ângulo de molhamento que é de 41° para *Lincoln Soft* contra 49° da Fronius.

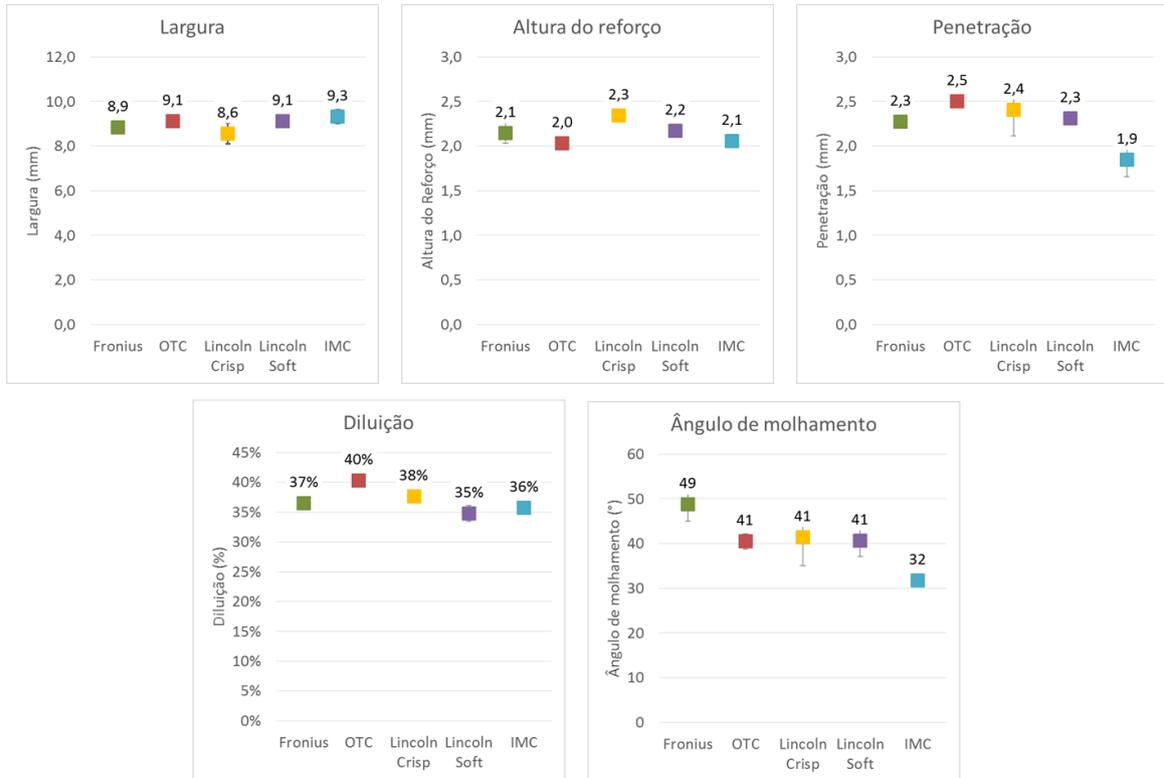
2º) O sistema da OTC DW-300 produziu cordões de solda com maior penetração do que as demais fontes (2,5 mm) e diluição de 40% com uma corrente média de 198 A, potência de 5,5 kW e frequência de pulso de 156 Hz. Já o sistema *Lincoln Crisp* teve uma penetração um pouco menor (2,4 mm) e diluição de 38%. O valor de potência foi o mesmo, corrente média praticamente igual (194 A) e frequência de pulso de 117 Hz, bem menor que da OTC. Altura de reforço e ângulo de molhamento são praticamente iguais nos dois cordões. Os cordões se diferenciam mais pela largura, sendo 9,1 mm para OTC e 8,6 mm para *Lincoln Crisp*.

Figura 59 - Amostras macrográficas correspondentes a cada fonte de soldagem testada.



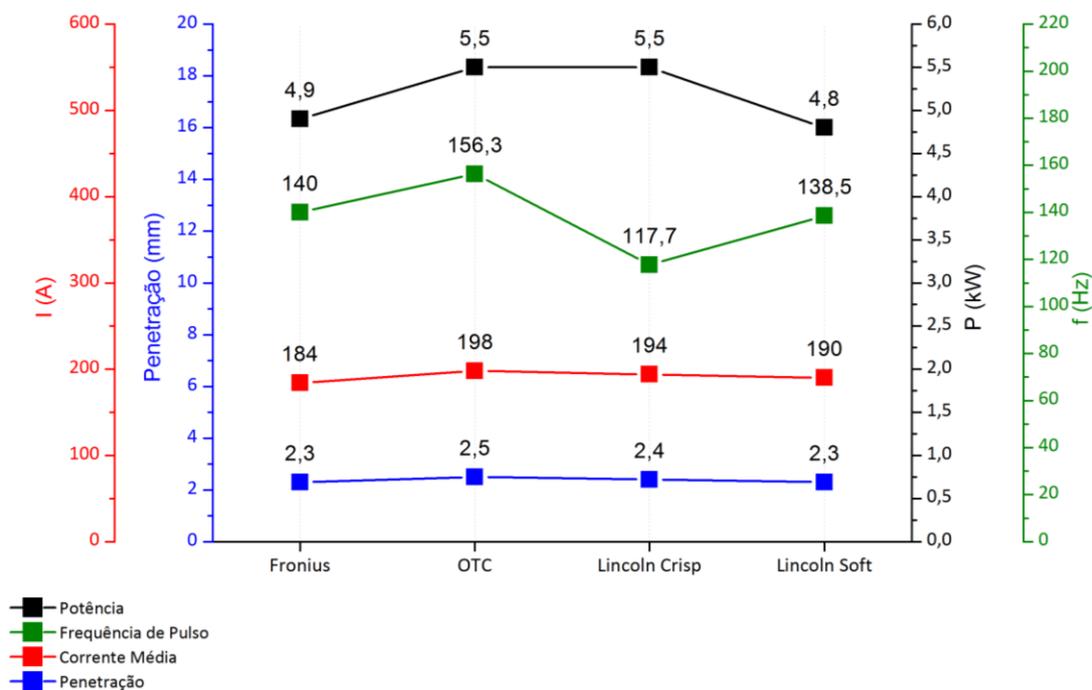
3º) No caso da fonte da IMC, o destacamento de uma gota só pôde ocorrer apenas depois de mais de um pulso. Deste modo, mesmo possuindo a maior corrente média (209 A) e a maior potência (5,9 kW) os cordões resultantes mostram a menor penetração entre todas as fontes testadas (1,9 mm). Não obstante, os resultados concernentes à molhabilidade do cordão foram satisfatórios, evidenciado principalmente pelo menor ângulo de molhamento (31°).

Figura 60 - Resultados das medições de largura, altura do reforço, penetração de solda, diluição e ângulo de molhamento para as macrografias da Figura 59.



As diferenças entre as características geométricas entre os cordões de solda são bastante sutis. Por exemplo, dentre as fontes analisadas nos itens anteriores, a diferença entre a maior e menor penetração é, em média, de 0,2 mm. A formação do cordão de solda no processo MIG/MAG é complexa, consequência de um conjunto de fatores. Essers e Walter (1981) estimam que a menor parte do calor transferido para a região da solda é devido às gotas metálicas transferidas (25%). O calor transferido por radiação, convecção e condução combinadas e pela passagem de corrente representam 34% e 41%, respectivamente. O gráfico da Figura 61 compara os resultados de penetração com corrente média, potência e frequência de pulso. Este demonstra que, de fato, a penetração é maior para a maior corrente média e para a maior potência.

Figura 61 - Comparação entre a penetração de solda e corrente média, potência e frequência de pulso.

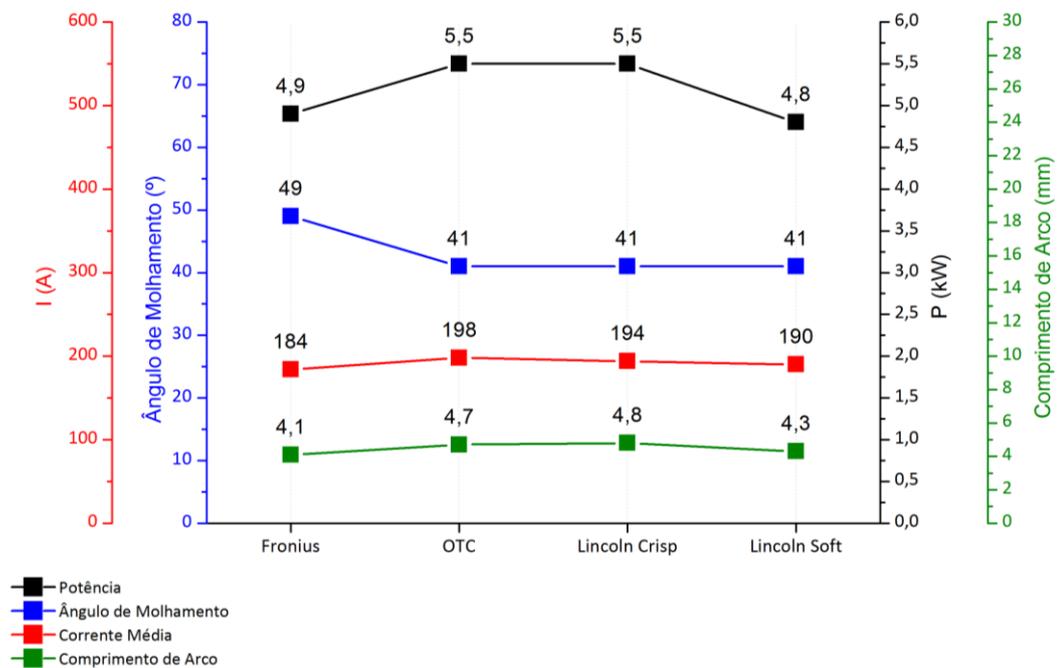


O sistema *Lincoln Crisp*, mesmo tendo menor frequência de pulso, com exceção da IMC, teve a segunda maior penetração. Por intermédio de filmagens de alta velocidade, Essers e Walter (1981) constataram que o impacto de cada gota com a poça de fusão causa uma cavidade no centro desta. Quando a frequência de destacamento é alta e após o impacto de uma gota metálica, não há tempo para que a cavidade se feche. As gotas subsequentes entram em contato com o fundo da poça de fusão produzindo maior penetração. Não só a frequência de destacamento, mas também a velocidade e a massa das gotas que impactam sobre a poça de fusão influenciam na penetração de solda.

O fato de o sistema *Lincoln Crisp* produzir o destacamento de uma gota principal durante o pulso, e não durante a base como os demais, pode ter causado maior velocidade de deslocamento da gota (1,7 ms) de maneira que o impacto da gota contra a poça de fusão seja maior, produzindo uma cavidade maior e, conseqüentemente, maior penetração de solda. Deve-se considerar ainda que gotas secundárias foram destacadas logo após a principal, que também transferem energia ao entrarem em contato com fundo da poça. Possivelmente estes fatores combinados com a alta potência, compensaram a menor frequência de pulso deste sistema.

A Figura 62 compara os resultados do ângulo de molhabilidade com corrente média, potência e frequência de pulso, comprimento de arco. A fonte da Fronius teve o menor ângulo de molhamento (49°) o que poderia ser atribuído a um menor comprimento de arco (4,1 mm) e a menor corrente média. Entretanto, a molhabilidade da *Lincoln Soft* é de 41° e o comprimento de arco foi apenas 0,2 mm menor. Deste modo, é difícil atribuir os resultados a um parâmetro ou outro, pois no processo MIG/MAG Pulsado a geometria do cordão de solda depende da interação de diversos fatores.

Figura 62 - Comparação entre a ângulo de molhamento e corrente média, potência e comprimento de arco.



6 SOLDAGEM DE CHAPAS DE ALUMÍNIO COM MIG/MAG PULSADO CC/CA

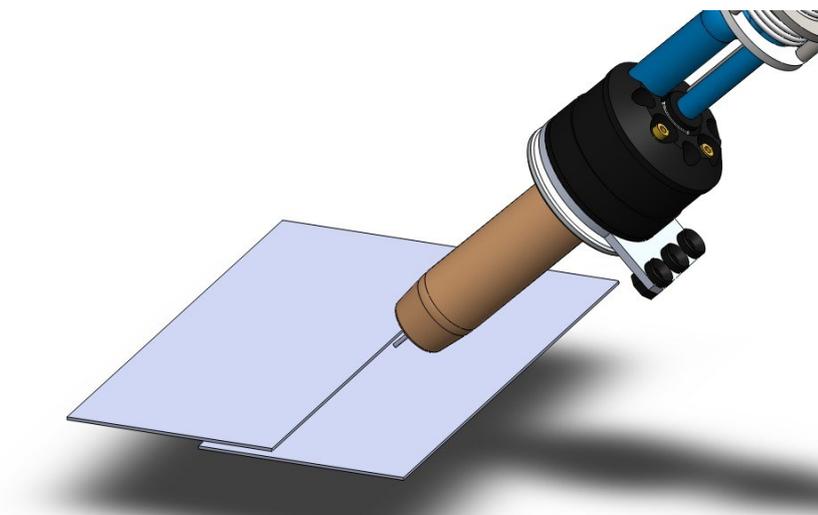
Este capítulo se remete ao objetivo de número três (3), apresentado no capítulo 1 (Introdução). Aqui são descritos os resultados referentes a soldagem MIG Pulsado CC/CA de chapas de alumínio, especialmente no que concerne a questão da soldagem de juntas sobrepostas formadas por chapas e a capacidade de preenchimento de juntas atribuída ao processo MIG Pulsado CA ou *gap bridge ability*. Para tanto, foram empregadas filmagem de alta velocidade, filmagem termográfica e coleta de dados elétricos (tensão e corrente) e mecânicos (velocidade de alimentação de arame) via SAP.

Os ensaios foram divididos em três partes:

- 1) Soldagem de juntas sobrepostas com diferentes espaçamentos;
- 2) Soldagem de juntas sobrepostas com diferentes EN Ratios;
- 3) Soldagem em chapas planas.

Em (1) as juntas sobrepostas (Figura 63) foram montadas com diferentes espaçamentos (0, 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm) com um EN Ratio de 30%. Estas foram soldadas na região da junta com MIG Pulsado CC e CA para fins de comparação. O objetivo é avaliar a real capacidade do processo MIG Pulsado CA de realizar soldas nestas condições em comparação com o processo CC. Neste caso a velocidade de arame foi mantida a mesma em todos os ensaios.

Figura 63 - Soldagem de juntas sobrepostas com processo MIG Pulsado CC/CA.



Em (2) as juntas foram montadas com espaçamentos iguais (1,5 mm) porém as EN Ratios foram modificadas de solda para solda. Neste caso, em uma etapa de ensaios a velocidade de alimentação de arame foi mantida constante e em outro, se deixou que a velocidade de arame se regulasse automaticamente conforme a EN Ratio foi modificada na fonte de soldagem.

Já em (3), as soldagens foram realizadas sobre chapas planas de alumínio com maior espessura. Os objetivos foram analisar os resultados das soldagens mediante ensaio macrografico nos cordões de solda e verificar certas afirmações na literatura de que o aumento do EN Ratio tem como consequência o aumento do diâmetro de gota favorecendo, deste modo, o preenchimento dos *gap*'s nas juntas.

O item a seguir apresenta a metodologia de forma mais detalhada, especificando os materiais, consumíveis, parâmetros e condições de soldagem além dos sistemas de movimentação de tocha e monitoração.

6.1 METODOLOGIA

6.1.1 Soldagem de juntas sobrepostas com diferentes espaçamentos

Primeiramente, juntas sobrepostas formadas por chapas de alumínio AISI 1100 de dimensões 200 mm x 70 mm x 1 mm de espessura foram confeccionadas com espaçamentos ou *gap*'s entre as chapas de 0; 0,5 mm; 1,0 mm; 1,5 mm e 2,0 mm com a finalidade de pôr a teste a capacidade de *gap bridge ability* do processo MIG pulsado CA em comparação com o MIG Pulsado CC. As chapas foram limpas com um pano embebido em álcool caseiro antes da realização da soldagem para retirar qualquer contaminante além de oleosidade proveniente da manipulação ou de qualquer outra origem. Os corpos de prova foram dispostos sobre um dispositivo de soldagem feito de aço que permitiu a fixação eficiente das chapas. Obviamente, este dispositivo influenciou na dissipação de calor da chapa de alumínio, mas como foi empregado para todos os ensaios espera-se que, para fins de comparação, esta influencia seja a menor possível, especialmente no que tange as filmagens termográficas

O arame empregado foi o ER 5183 de Ø1,2 mm, cuja composição química está na Tabela 10. O gás empregado foi argônio comercialmente puro a uma vazão de 17 l/min. A velocidade de soldagem foi de 42 cm/min para todos os ensaios. O robô antropomórfico YASKAWA MOTOMAN modelo YR-UP6-A02 foi utilizado como sistema de movimentação

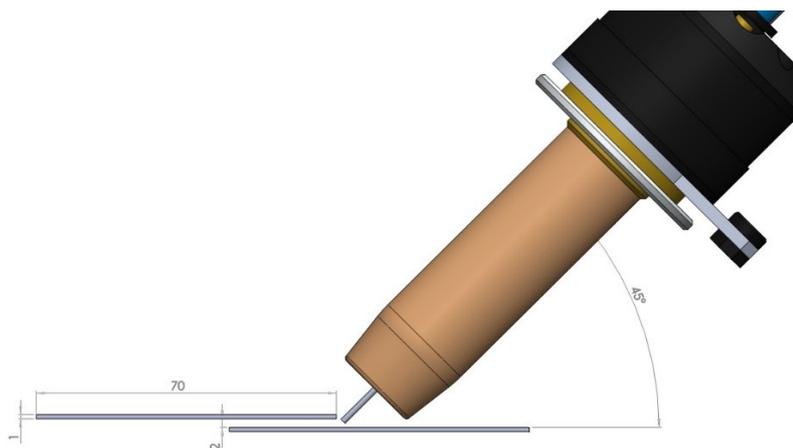
de tocha que foi posicionada conforme mostra a Figura 64 sempre com um ângulo de 45° em relação a superfície das chapas. Procurou-se manter a mesma DBCP em todos os ensaios ao manter o comprimento do eletrodo constante em 15 mm, medidos antes de iniciar o processo de posicionamento da tocha.

Tabela 10 - Composição química do arame de alumínio ER 5183.

Composição química								
Mn	Cu	Zn	Ti	Si	Mg	Al	Cr	Fe
0,65 %	0,01 %	0,01 %	0,10 %	0,04 %	4,9 %	94,2 %	0,08 %	0,13 %

Fonte: ESAB (2020)

Figura 64 – (a) Ângulo da tocha de soldagem e das juntas sobrepostas para todos os ensaios. (b) Fotografia da tocha de soldagem acoplada ao robô antropomórfico e posicionada para soldagem.



(a)



(b)

A primeira etapa de experimentos consistiu da soldagem das chapas sobrepostas empregando o processo MIG Pulsado CC. Foram soldadas dez juntas com este processo, ou seja, duas soldas para cada espaçamento. Foram retiradas amostras destas juntas soldadas para realização de macrografias que foram retiradas da região central da junta e em seguida passaram pelos procedimentos para ensaios macrografico, sendo o ataque realizado com ácido fluorídrico 5% para todas as amostras.

Empregou-se o processo descrito anteriormente as soldagens com MIG Pulsado CC e CA. Utilizou-se A fonte IMC Digiplus A7 (Figura 65) em todos os ensaios sendo os parâmetros de pulsação apresentados na Tabela 11.

Figura 65 - Fonte IMC Digiplus A7.



Fonte: IMC (2020)

A Figura 66 mostra a localização da câmera termográfica FLIR SC7200 F/3 em relação a bancada e demais equipamentos empregados durante os ensaios. Com esta câmera foi possível capturar imagens termográficas das filmagens de modo que foi possível determinar a curva de resfriamento para os ensaios realizados. O *software* empregado para realizar as análises e

medições de temperatura e detalhes relacionados ao método de medição são apresentados no Apêndice 1.

Tabela 11 - Parâmetros de pulsado utilizados para MIG Pulsado CC e CA.

Processo	Parâmetros
MIG Pulsado CC	$I_p = 350 \text{ A}$ $t_p = 1,2 \text{ ms}$ $I_b = 23 \text{ A}$ $t_b = 16,3 \text{ ms}$ $v_a = 2,5 \text{ m/min}$ EN Ratio = 0%
MIG Pulsado CA	$I_p = 350 \text{ A}$ $t_p = 1,2 \text{ ms}$ $I_b = 24 \text{ A}$ $t_b = 11,1 \text{ ms}$ $I_n = -20 \text{ A}$ $t_n = 5,2 \text{ ms}$ $v_a = 2,5 \text{ m/min}$ EN Ratio = 30%

Figura 66 - Localização da câmera termográfica em relação a bancada de ensaios.

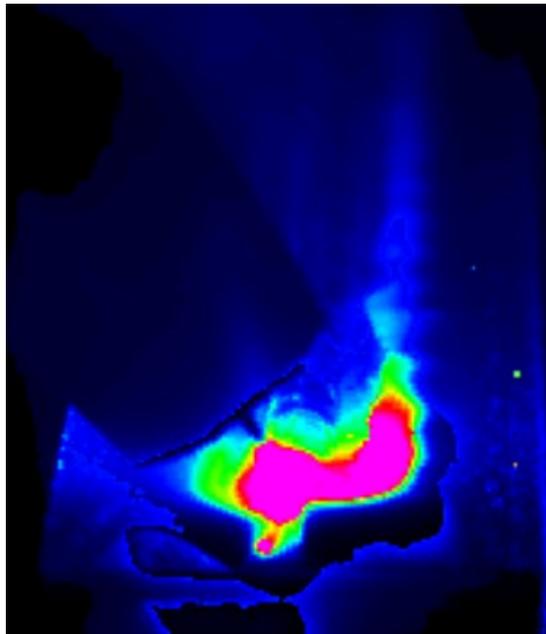


As configurações da câmera termográfica para este ensaio são apresentadas na Tabela 12 sendo estas reguladas no programa de captura/interface da câmera termográfica. Apresenta-se a Figura 67 como exemplo de uma imagem gerada com a câmera termográfica.

Tabela 12 - Configurações da câmera termográfica reguladas no software de captura da própria câmera.

Parâmetro	Valor regulado
Tempo de captura	70-80 s
Taxa de captura	169 Hz
Emissividade	0,95
Temperatura ambiente	25°C
Transmissão	97%
Distância lente-peça	40 cm
Faixa de temperatura	5 à 300 °C
Área da imagem	320 x 256 pixels

Figura 67 - Imagem obtida a partir de filmagem termográfica. Soldagem em junta sobreposta com MIG/MAG Pulsado CA.



A coleta de dados elétricos e formas de onda foram realizadas com o SAP. A tensão foi monitorada com ligação entre a conector da tocha e o cabo terra. O sensor para leitura da corrente foi instalado no cabo-terra e o sistema de medição de velocidade de arame foi instalado no tracionador de arame da fonte.

As filmagens de alta velocidade foram realizadas com a câmera numa posição semelhante à da Figura 66 e as configurações de filmagem são mostradas na Tabela 13. A câmera empregada foi novamente a IDT Y4-S4. A mesma disposição da Figura 66 foi utilizada para câmera de alta velocidade. Vale a ressalva de que as filmagens termográficas e de alta velocidade não foram realizadas ao mesmo tempo por motivos práticos como a falta de espaço e a necessidade de muitas pessoas para operar tantos equipamentos.

Tabela 13 - Configurações da câmera de alta velocidade reguladas no software de captura da própria câmera e do LASER.

Parâmetro	Valor regulado
Iluminação	Laser HF Cavilux
Frequência de pulso do laser	5052 Hz
Laser (filtro) infravermelho	810 nm
Taxa de amostragem	100 kHz
Taxa de gravação	5000 Hz
Tempo de exposição	7 μ s
Abertura do diafragma	20
Área da imagem	912 x 1016 pixels

6.1.2 Soldagem de juntas sobrepostas com diferentes EN Ratios

Nestes ensaios, foram soldadas apenas juntas sobrepostas com *gap* de 1,5 mm. O objetivo neste caso foi verificar as soldas do ponto de vista do EN Ratio. Deste modo, a abordagem foi de aumentar gradativamente o EN Ratio de ensaio para ensaio. Os EN Ratios

foram de 0%, 10%, 30%, 40% e 50%. Por praticidade, a fonte empregada neste ensaio foi a OTC DW-300²⁶.

No que tange a velocidade de alimentação de arame, foram adotadas duas estratégias. Na primeira, a EN Ratio foi aumentada gradativamente de 0% a 50%, porém a velocidade de alimentação de arame era “corrigida”. Por exemplo, quando se regula a fonte de 0% para 10%, a velocidade de alimentação de arame é aumentada automaticamente pelo sistema sinérgico da fonte, já que um aumento de EN Ratio tem como consequência o aumento da taxa de fusão. Antes de cada ensaio, embora o sinérgico da fonte aumentasse a velocidade de alimentação de arame, a velocidade sempre foi regulada de volta ao valor original de 2,5 m/min. Na segunda estratégia, foi usada a velocidade de alimentação sugerida pelo sinérgico da fonte. A razão para esta abordagem é fazer um contraponto as publicações científicas que normalmente empregam somente a segunda estratégia.

O tipo de junta, arame de solda, dimensões da chapa, material, arame e gás utilizado, sistema de movimentação de tocha, e condições de soldagem são os mesmos já descritos no item anterior. As configurações das câmeras termográfica e de alta velocidade são as mesmas apresentadas anteriormente na Tabela 12 e na Tabela 13, respectivamente. A localização das câmeras já foi dada anteriormente pela Figura 66. Já os parâmetros de pulsação para cada EN Ratio são dados na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 - Tabela com parâmetros de pulsado OTC com. Sendo que I_p = corrente de pulso; t_p = tempo de pulso; I_b = corrente de base; t_b = tempo de base; I_n = corrente negativa e; t_n = tempo de negativo.

EN Ratio = 0%	EN Ratio = 10%	EN Ratio = 30%	EN Ratio = 40%	EN Ratio = 50%
$I_p = 320$ A	$I_p = 320$ A	$I_p = 320$ A	$I_p = 320$ A	$I_p = 320$ A
$t_p = 2$ ms	$t_p = 2,1$ ms	$t_p = 2,2$ ms	$t_p = 2,2$ ms	$t_p = 2,2$ ms
$I_b = 20$ A	$I_b = 20$ A	$I_b = 20$ A	$I_b = 20$ A	$I_b = 20$ A
$t_b = 18,7$ ms	$t_b = 17$ ms	$t_b = 13,8$ ms	$t_b = 12,8$ ms	$t_b = 12,2$ ms
	$I_n = 40$ A			
	$t_n = 2$ ms	$t_n = 7,1$ ms	$t_n = 10,2$ ms	$t_n = 10,4$ ms

²⁶ A OTC DW-300 possui um sistema sinérgico para MIG Pulsado CA que é regulado conforme a EN Ratio definida na interface da fonte. Esta característica evitou mudanças de parâmetros manuais entre um ensaio e outro. Evitou ainda a necessidade de levantamento prévio de parâmetros via cálculo e ajustes posteriores, que costumam tomar bastante tempo.

6.1.3 Soldagem em chapas planas

Esses ensaios foram conduzidos com o propósito principal de investigar se de fato há um aumento de diâmetro de gota a medida que se aumenta a ação da polaridade negativa mediante a regulagem do EN Ratio no processo CA. E em caso positivo, se este aumento é relevante a ponto de ser apontado como uma das causas da suposta capacidade superior de preenchimento de *gap*'s normalmente atribuída ao processo MIG Pulsado CA. Para tanto, a filmagem de alta velocidade foi a principal ferramenta de monitoração neste caso. Realizou-se também, análise macrográfica nos cordões de solda em seguida aos ensaios de soldagem.

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de uma chapa de alumínio AISI 1100. As dimensões foram de 150 x 50 x 4 mm. Subsequentemente à soldagem, os corpos de prova foram cortados para a retirada de amostras da região central. Após isso, realizou-se ensaio macrografico para a análise das características geométricas dos cordões de solda. O ataque químico foi com ácido fluorídrico 5%.

As soldagens foram somente cordões sobre chapa (em contraste com a abordagem anterior) com a tocha de soldagem posicionada perpendicularmente a peça de trabalho (90°). Deste modo, além de simplificar os procedimentos de soldagem e filmagem, facilitou também a medição das dimensões da gota metálica a partir das filmagens realizadas.

Empregou-se a fonte OTC DW-300 nestes ensaios e as EN Ratio testadas foram novamente de 0%, 10%, 30%, 40% e 50%. Foram realizados dois cordões de solda para cada EN Ratio perfazendo 10 soldagens e 10 amostras no total. As condições de soldagem foram idênticas as apresentadas anteriormente no item 6.1, exceto pelo fato de que em nos primeiros cinco ensaios com as EN Ratios de 0%, 10%, 30%, 40% e 50%, a velocidade de alimentação de arame foi mantida em 4,5 m/min. Nos ensaios seguintes, foi permitido que o sistema sinérgico da fonte OTC DW-300 fizesse ajustes automáticos, aumentando a velocidade de alimentação a medida que se aumentava as EN Ratios. A velocidade de soldagem regulado no robô YR-UP6-A02 também foi de 25 cm/min para esses ensaios. Os parâmetros de pulsação para cada EN Ratio são dados na Tabela 15.

Tabela 15 - Tabela com parâmetros de pulsado OTC. Sendo que I_p = corrente de pulso; t_p = tempo de pulso; I_b = corrente de base; t_b = tempo de base; I_n = corrente negativa e; t_n = tempo de negativo.

Soldagem sobre chapa.

EN Ratio = 0%	EN Ratio = 10%	EN Ratio = 30%	EN Ratio = 40%	EN Ratio = 50%
$I_p = 310 \text{ A}$	$I_p = 310 \text{ A}$	$I_p = 310 \text{ A}$	$I_p = 310 \text{ A}$	$I_p = 310 \text{ A}$
$t_p = 2 \text{ ms}$	$t_p = 2,0 \text{ ms}$	$t_p = 2,1 \text{ ms}$	$t_p = 2,0 \text{ ms}$	$t_p = 2,0 \text{ ms}$
$I_b = 20 \text{ A}$	$I_b = 20 \text{ A}$	$I_b = 20 \text{ A}$	$I_b = 20 \text{ A}$	$I_b = 20 \text{ A}$
$t_b = 10,4 \text{ ms}$	$t_b = 10 \text{ ms}$	$t_b = 10,4 \text{ ms}$	$t_b = 8,9 \text{ ms}$	$t_b = 8,0 \text{ ms}$
	$I_n = 52 \text{ A}$	$I_n = 54 \text{ A}$	$I_n = 54 \text{ A}$	$I_n = 47 \text{ A}$
	$t_n = 1 \text{ ms}$	$t_n = 3,6 \text{ ms}$	$t_n = 8,1 \text{ ms}$	$t_n = 9,6 \text{ ms}$

As configurações da câmera termográfica são idênticas as apresentadas na Tabela 12. A Figura 68 traz uma imagem proveniente destas filmagens. A maior diferença está no posicionamento da câmera, que desta vez, ficava localiza de frente para o alvo (no caso, o corpo de prova)²⁷. A Figura 69 apresenta uma imagem capturada com a câmera de alta velocidade no momento do destacamento da gota.

²⁷ Maior detalhamento a respeito destas filmagens no Apêndice 1.

Figura 68 - Imagem obtida a partir de filmagem termográfica. Soldagem sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA.

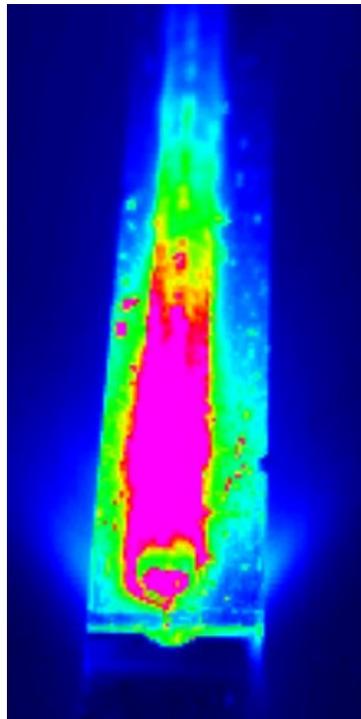
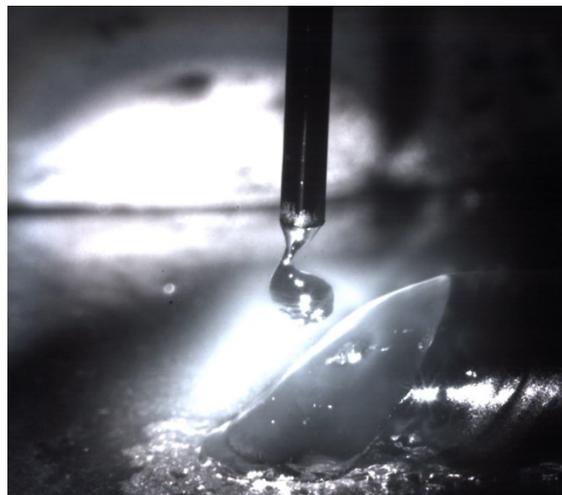


Figura 69 - Imagem capturada com câmera de alta velocidade durante soldagem sobre chapa.



6.2 ENSAIOS SOBRE JUNTAS SOBREPOSTAS

Começando pelos resultados das soldagens com pulso CC realizadas em juntas sobrepostas chapas sobrepostas de alumínio empregando a fonte IMC Digiplus A7. A Figura 70 traz a forma de onda de corrente característica desta fonte para o processo supracitado. A

Tabela 16 apresenta os valores de Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P) para a primeira série de experimentos. Esta demonstra que os valores de tensão, tanto o médio (U_m) quanto o eficaz (U_{ef}) tiveram pequena variação para os *gap's* ensaiados. Considerando que a tensão é um indicativo do comprimento de arco, é razoável afirmar que este último também sofreu pouca variação de modo a não influenciar de forma significativa nos resultados. Da mesma forma, a variação de corrente média e eficaz foi praticamente nula.

Figura 70 - Forma de onda de corrente da fonte IMC Digiplus A7 e os respectivos parâmetros de processo.

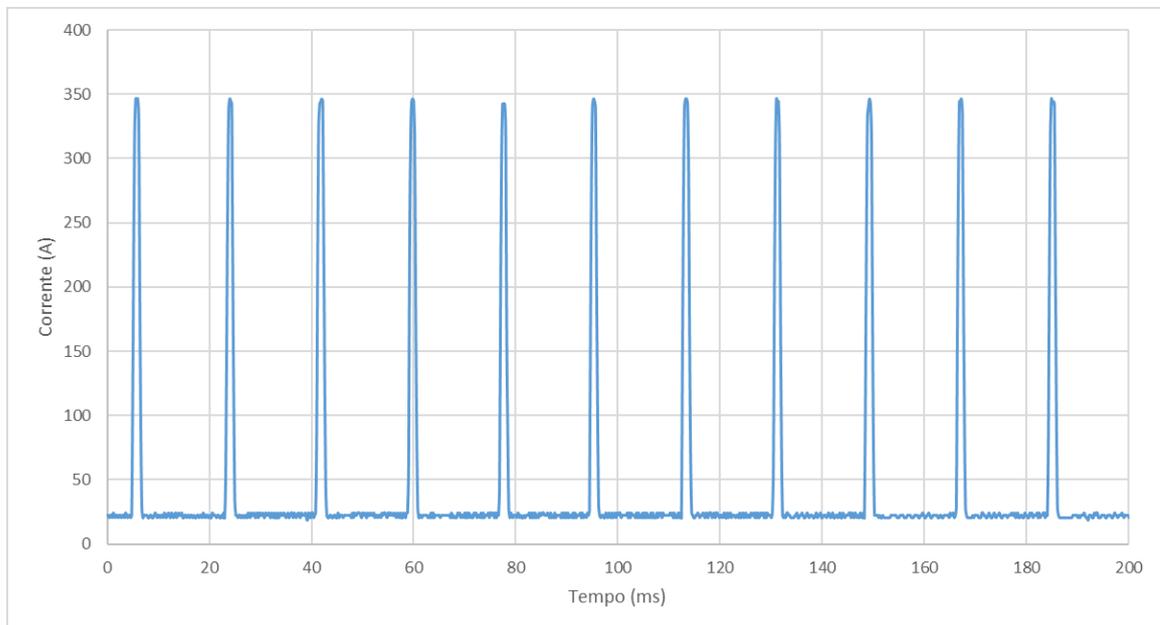
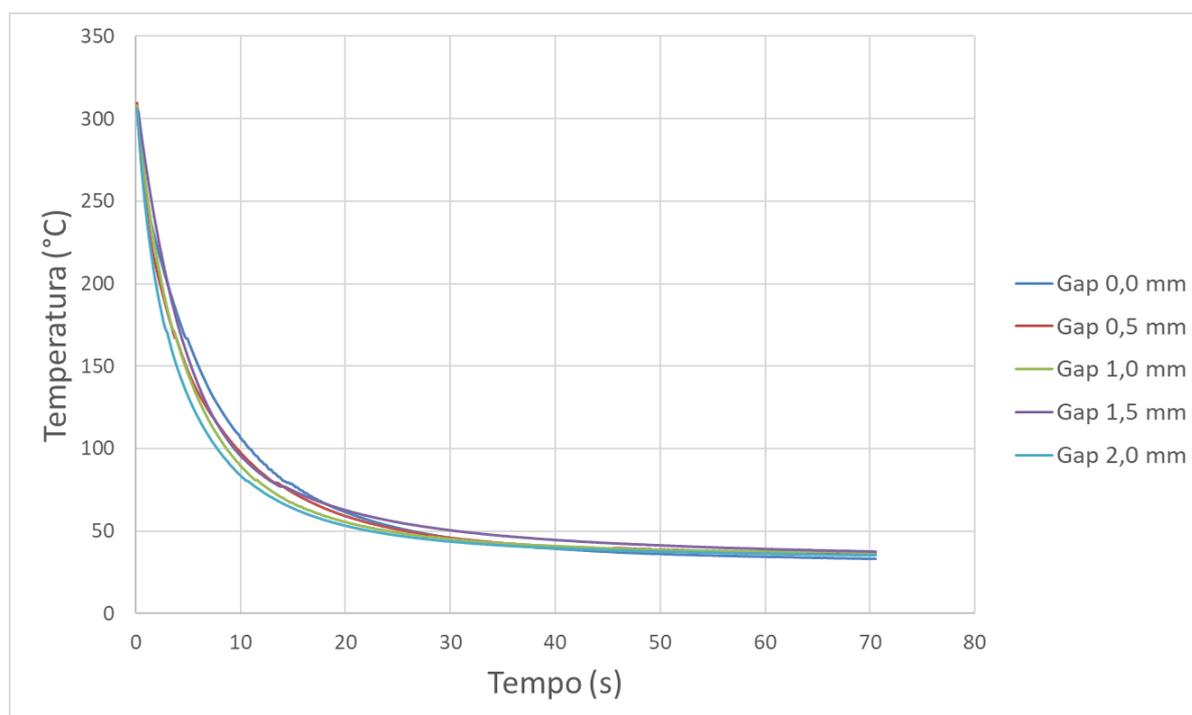


Tabela 16 - Valores Médios e Eficazes para MIG Pulsado CC. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).

Gap	0	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm
I_m (A)	46	47	46	46	46
I_{ef} (A)	89	91	90	89	89
U_m (V)	16,8	15,7	16,3	16,6	16,7
U_{ef} (V)	17,4	16,1	16,7	17	17,1
v_a(m/min)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
P (W)	1024	945	969	977	993

O gráfico da Figura 71 apresenta as curvas de resfriamento para cada *gap* testado, construído com os dados coletados com câmera termográfica. O ensaio com *gap* 0 apresenta um resfriamento mais lento entre 175 e 80 °C, aproximadamente, enquanto o ensaio com 2 mm de *gap* tem um resfriamento ligeiramente mais rápido por uma faixa maior de temperaturas. A temperatura média para o *gap* de 0 foi de 64,5°C enquanto para o *gap* de 2 mm este valor foi de 57,4°C para o intervalo de tempo considerado para o ensaio.

Figura 71 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG Pulsado CC, fonte IMC Digiplus A7. Ensaio realizado com *gap,s* de 0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2 mm.



As macrografias referentes a estes ensaios são dadas na Figura 72. Analisando as macrografias em conjunto com a Figura 73, que traz os resultados das medições de penetração realizados para estes ensaios em forma de gráfico, se constata que o valor de penetração é igual ou maior a espessura da chapa (1 mm) em 5 de 10 resultados. Ou seja, embora as juntas tenham sido preenchidas adequadamente, 50% das amostras analisadas muito provavelmente teriam sido perfuradas em uma situação real de soldagem com processo MIG Pulsado CC.

Figura 72 - Macrografias para MIG Pulsado CC (IMC Digiplus A7).

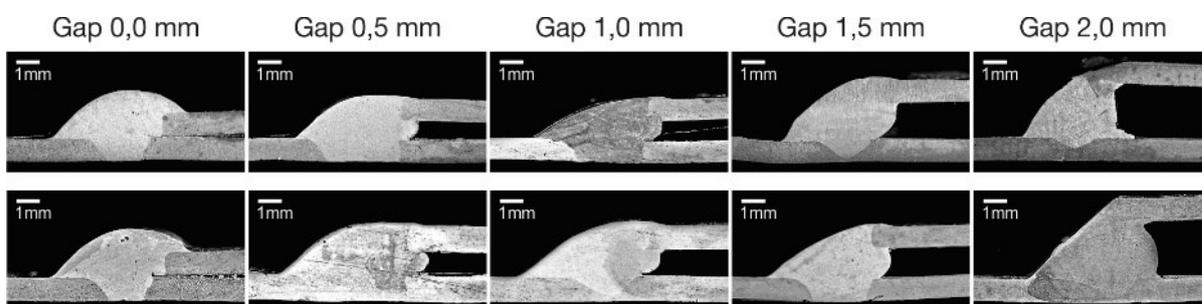
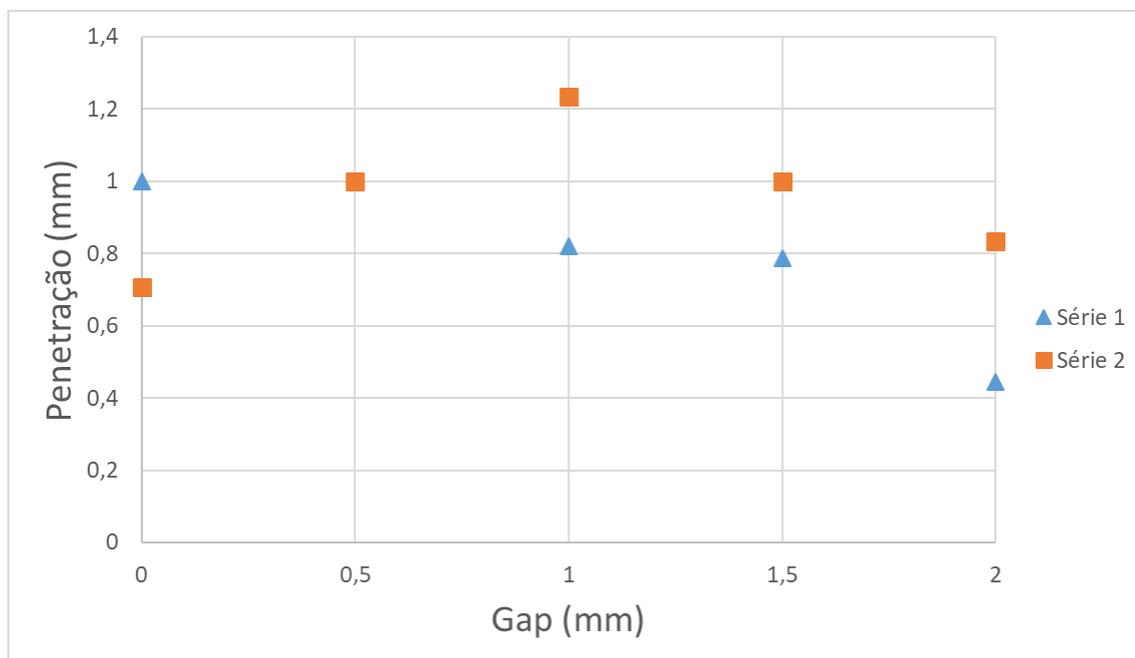
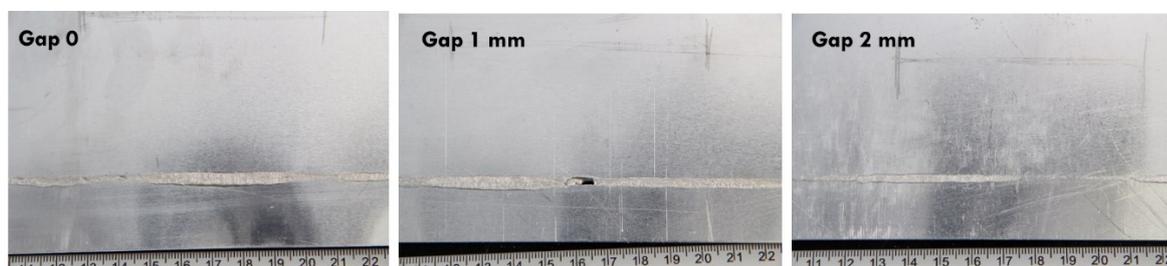


Figura 73 - Gráfico com os resultados de penetração para os ensaios com MIG Pulsado CC.



As fotografias da Figura 74 revelam que o risco de perfuração da chapa é realmente elevado, considerando as marcas no verso das chapas mesmo quando a penetração mensurada não é igual ou maior que a espessura da chapa. De fato, no corpo de prova correspondente ao *gap* de 1,0 mm (Série 2) ocorreu uma perfuração. Nos demais exemplos da Figura 74, provavelmente só não houve perfuração devido a chapa estar apoiada sobre um dispositivo de soldagem.

Figura 74 - Versos das chapas para corpos de prova referentes aos *gap*'s de 0, 1 e 2 mm. MIG/MAG Pulsado CC.



As filmagens de alta velocidade (Figura 75) demonstraram que, embora o *gap* fosse aumentando e com ele aumentasse o grau de dificuldade para a operação de soldagem, a capacidade de preenchimento da junta não chegava a ser afetada. A impressão predominante durante a realização dos ensaios é de que o êxito da soldagem é sobretudo dependente do correto posicionamento da tocha de soldagem em relação a junta²⁸. A exceção neste caso vai para o *gap* de 2 mm, situação na qual, mesmo com o correto posicionamento da tocha, o preenchimento da junta tendia a ocorrer de maneira falha (Figura 76). O erro de posicionamento levava a geração de mordeduras, cordões de solda irregulares e, em alguns casos, a perfuração da chapa. Mais de uma tentativa foi necessária durante a realização dos ensaios com *gap* de 2 mm, fato incomum nos demais ensaios com espaçamentos menores. Essa dificuldade foi encontrada mesmo na utilização da modalidade pulsado CA, como se constatará mais adiante neste item.

²⁸ Embora o correto posicionamento da tocha de soldagem em relação a junta seja fundamental em qualquer operação de soldagem automática, neste caso, devido as condições e da natureza da própria operação de soldagem, o posicionamento é ainda mais fundamental para a formação do cordão de solda e efetivo preenchimento da junta.

Figura 75 - Imagens das filmagens de alta velocidade (MIG Pulsado CC / IMC DigiplusA7).

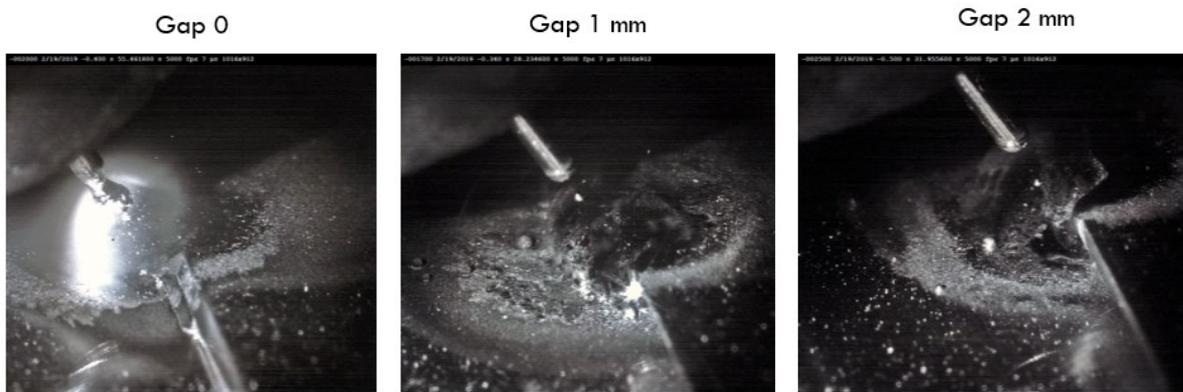
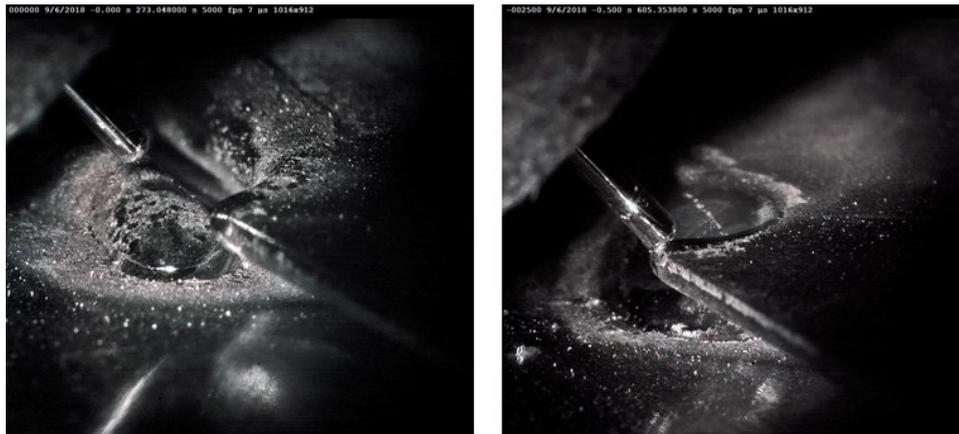


Figura 76 - Falhas no preenchimento da junta; $gap = 2$ mm (MIG Pulsado CC / IMC Digiplus A7).



A seguir então, são apresentados os resultados para os ensaios com MIG/MAG Pulsado CA. A Figura 77 mostra a forma de onda de corrente e os parâmetros do pulsado empregados para estes ensaios. Neste caso, a EN Ratio foi de 30%.

De maneira semelhante ao que aconteceu nos ensaios com a modalidade MIG Pulsado CC, os valores de tensão eficaz e média não sofreram variação significativa e, por conseguinte, indicam pouca variação de comprimento de arco, mesmo considerando a escalada do arco em direção a parte sólida do eletrodo, característica da polaridade negativa. A Tabela 17 apresenta

valores de corrente²⁹, tensão, velocidade de alimentação de arame e potência para a Série 1 de ensaios.

Figura 77 - Forma de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA (IMC).

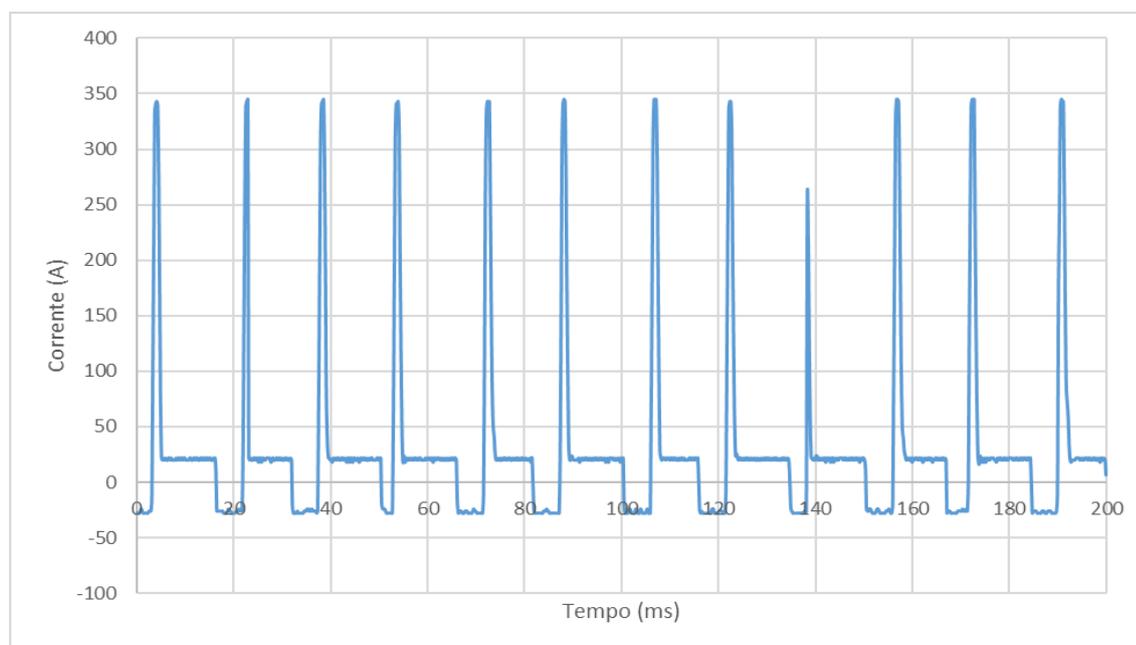


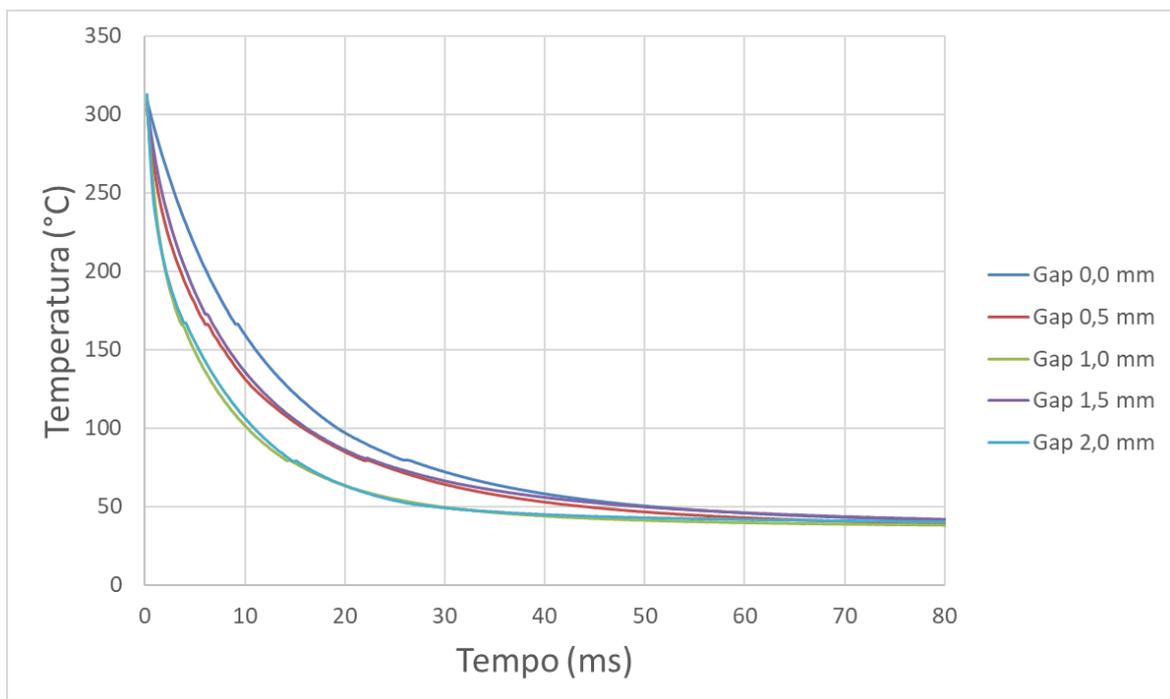
Tabela 17 - Valores Médios e Eficazes para MIG Pulsado CA. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).

Gap	0	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm
I_m (A)	45	44	44	44	45
I_{ef} (A)	85	84	84	84	86
U_m (V)	14,8	15,5	15	15,2	14,7
U_{ef} (V)	15,6	16	15,6	15,7	15,4
v_a (m/min)	2,8	2,7	2,8	2,7	2,7
P (W)	849	874	854	865	827

²⁹ A corrente média neste caso é a corrente média retificada dada por: $(I_{btb} + I_{ptp} + I_{ntn}) / (t_n + t_p + t_n)$, sendo o valor de " I_n " correspondente ao valor absoluto da corrente.

A soldagem sobre uma junta sobreposta com *gap* de 0 foi a que teve resfriamento mais lento sendo a temperatura média durante todo o intervalo do ensaio é de 66,5°C. No gráfico da Figura 78, a curva correspondente a esta soldagem fica acima de todas as outras praticamente durante todo o intervalo de tempo considerado. Isto é uma indicação de que a dissipação de calor tende a ser maior quando não há um *gap*. Já quando o *gap* é maior, a dissipação de calor tende a ser mais rápida pois aumenta o contato do material fundido com o meio circundante. Os ensaios com *gap*'s de 1 mm e 2 mm foram os que tiveram resfriamento mais rápido. As temperaturas medias para esses *gaps*'s ficaram em valores muito próximos: 52,0°C e 54,7°C, respectivamente.

Figura 78 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG Pulsado CA, fonte IMC Digiplus A7. Ensaio realizado com *gap*,s de 0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2 mm.



Na aplicação do MIG Pulsado CA à soldagem das juntas sobrepostas, o número de amostras que seriam perfuradas em uma situação real caiu de 5 para 3, conforme é evidenciado na análise das macrografias da Figura 79 em conjunto com o gráfico da Figuras 80. A média dos valores de penetração mensurados para este ensaio foi 22% menor em relação à média dos ensaios realizados com MIG Pulsado CC. Para MIG Pulsado CC se tem uma média de 0,9 mm

de penetração enquanto que com MIG Pulsado CA, a média é pouco menor que 0,7 mm. Esses resultados podem ser considerados uma pequena melhoria quando comparados aos resultados apresentados anteriormente.

Figura 79 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (IMC Digiplus A7).

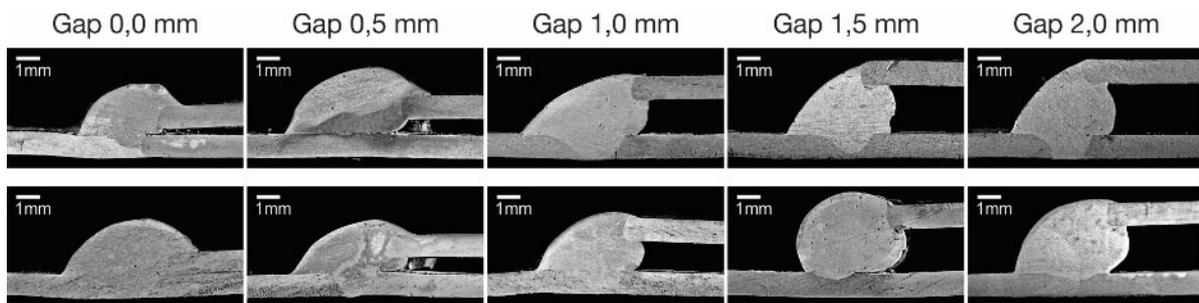
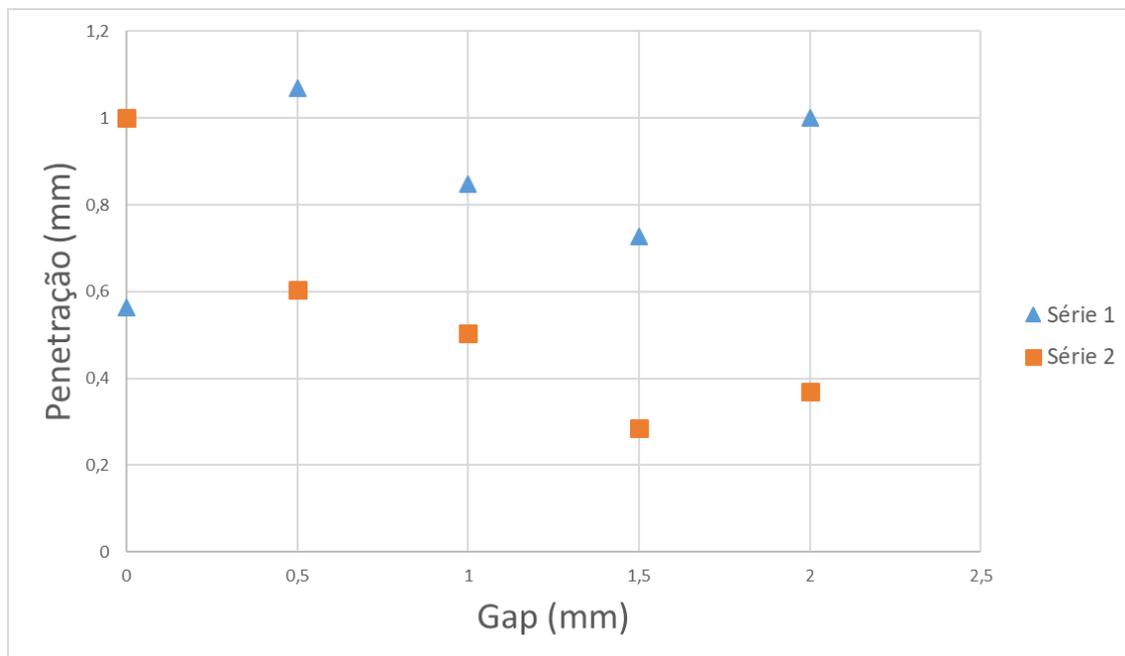


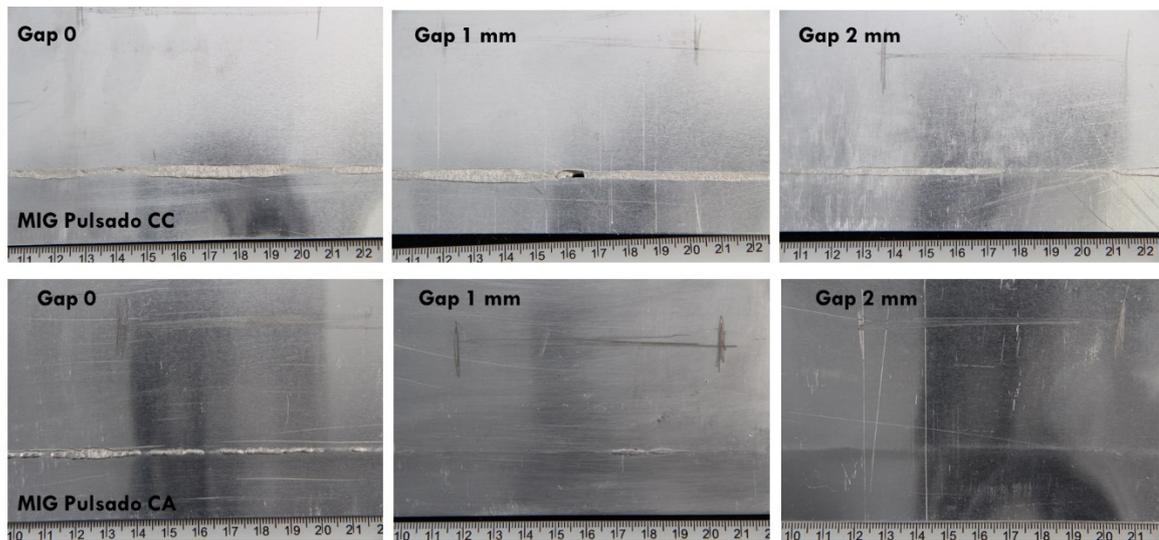
Figura 80 - Gráfico com os resultados de penetração para os ensaios com MIG Pulsado CA.



As fotografias da Figura 81 correspondem ao verso de amostras servem como um indicativo visual de que o processo MIG Pulsado CA pode produzir juntas sobrepostas com relativo sucesso, desde que um trabalho adequado seja desenvolvido com este fim. Examinando estes resultados constatou-se que a marcas no verso do corpo de prova, causadas pelo calor

imposto ao mesmo, são menos pronunciadas quando comparadas aos corpos de prova soldados com pulsado CC.

Figura 81 - Comparação entre os versos dos corpos de prova soldados com MIG Pulsado CC e MIG Pulsado CA.



Os corpos de prova apresentados na Figura 81 mostram uma melhora tímida, porém válida pois demonstra que com a soldagem pulsado CA, o risco de perfuração diminui. Quanto a questão da capacidade de preenchimento aprimorada do processo pulsado CA aplicado ao alumínio (*gap bridge ability*), se pode concluir que não há melhoria realmente significativa neste sentido. O sucesso de uma soldagem, seja com pulsado CC ou CA, mostrou-se mais dependente do correto posicionamento da tocha de soldagem do que de uma característica específica de uma modalidade do processo MIG/MAG. Quando se cometia algum erro no posicionamento da tocha de soldagem ou mesmo do corpo de prova, geralmente ocorriam má formação do cordão de solda, mordeduras, fusão exagerada ou falta de fusão da chapa superior, independentemente do processo empregado (CC ou CA). Na Figura 82, com EN Ratio = 30% ocorre excesso de fusão na chapa superior pois a tocha de soldagem foi posicionada de maneira que a energia do arco foi direcionada muita mais para o membro superior da junta do que para o membro inferior.

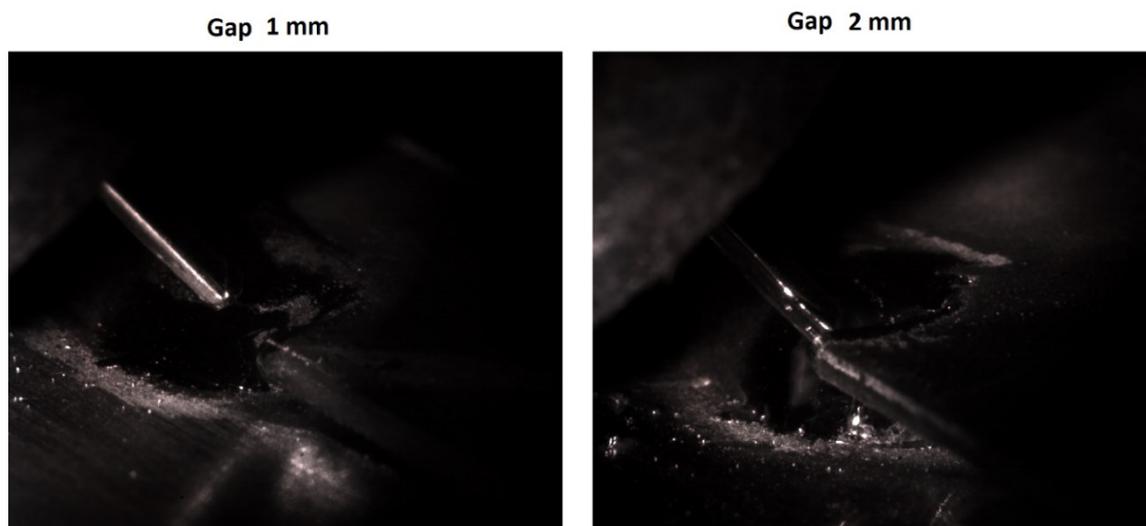
O que a literatura pesquisada concernente ao processo pulsado CA sugere é justamente que a capacidade aprimorada de preenchimento de juntas deste processo compensaria satisfatoriamente os problemas de mau-posicionamento, preenchimento de *gap's* (propositais ou não) entre as duas chapas e erro na montagem da junta, mesmo em EN Ratios mais baixas (20-30%). No entanto, não se obteve indício de melhora neste sentido na comparação realizada entre o processo CC ou CA. A vantagem prática observada no decorrer dos ensaios foi o fato de que, soldando com a modalidade pulsado CA, a chance de ocorrer uma perfuração é menor, embora não por muito. Obviamente, para se diminuir a possibilidade de perfuração, mais tempo teria que ter sido gasto no desenvolvimento do procedimento de soldagem, o que não foi o objetivo do ensaio.

Figura 82 – Falhas no preenchimento da junta em corpos de prova com *gap* = 2 mm.



A Figura 83, mostra soldagens bem-sucedidas com processo CA e *gap* de 1,5 mm, êxito alcançado muito mais pelo cuidado no posicionamento da tocha do que por uma característica específica de uma modalidade do processo MIG/MAG. As impressões que se vêm a tona quanto ao processo MIG Pulsado CC/CA com uma EN Ratio fixa em 30% e com *gap* variável, são estas. Então, o próximo passo foi avaliar quando se tem um *gap* de valor único, mas com diferentes EN Ratios.

Figura 83 - Imagens das filmagens de alta velocidade (MIG Pulsado CA / IMC Digiplus A7).



Com o objetivo de determinar se o aumento de EN Ratio e da velocidade de alimentação de arame favorece o preenchimento de *gap's* entre as juntas, foram conduzidos ensaios onde o *gap* entre as chapas foi mantido constante (1,5 mm) e a EN Ratio foi aumentada gradativamente. Neste caso, para fins de praticidade e até mesmo comparação com outros trabalhos, empregou-se a fonte da OTC DW-300. Para estes ensaios em específico, os valores de EN Ratio foram de 0% até 50%. As formas de onda para os valores de 0% e 50% são apresentados na Figura 84.

A Tabela 18, apresenta os valores médios e eficazes para corrente e tensão, além da velocidade de alimentação de arame e potência. Nota-se que não houve variação significativa para os valores de corrente e tensão (médios ou eficazes). Entre os valores de corrente eficazes houve uma diferença de 10 A entre o maior valor (EN Ratio = 10%) e o menor valor registrado (EN Ratio = 50%). Os valores de tensão variaram entre 15,8 V e 16,2 V o que demonstra que não houve grande variação do comprimento de arco. Vale ressaltar que este resultado é benéfico do ponto de vista experimental pois estes parâmetros tiveram pouco efeito sobre o resultado final da soldagem. Já a velocidade de alimentação de arame (V_a) sofreu variação, porém isto foi proposital. Neste caso, permitiu-se que o sistema sinérgico da fonte de soldagem da IMC realizasse correções na velocidade de alimentação de arame conforme a EN Ratio aumentava. Mesmo assim a velocidade de arame aumentou de 2,9 m/min até 3,4 m/min, apenas 0,5 m/min

de diferença. Interessante lembrar que esta característica é apontada como uma das causas da maior capacidade do processo pulsado CA de preencher *gap*'s em juntas sobrepostas.

Figura 84 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/OTC DW-300).

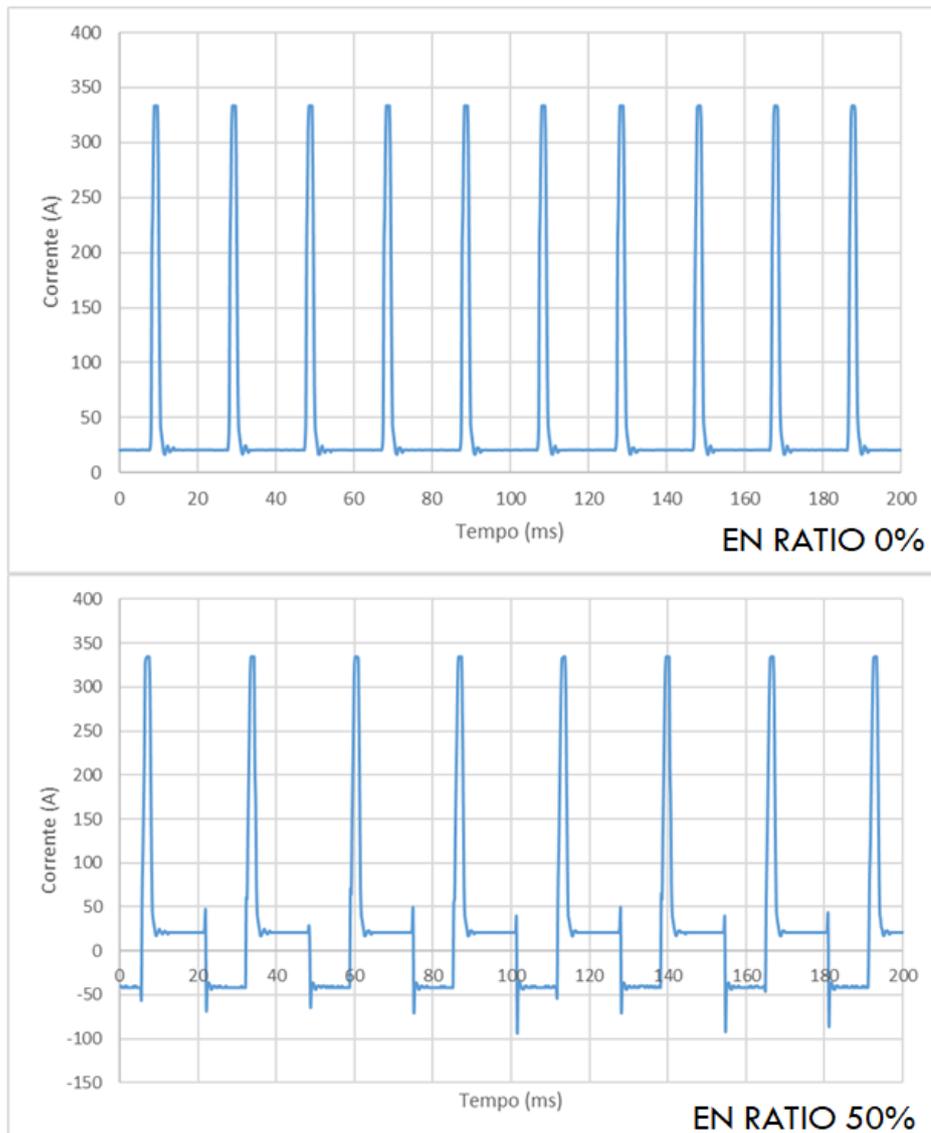
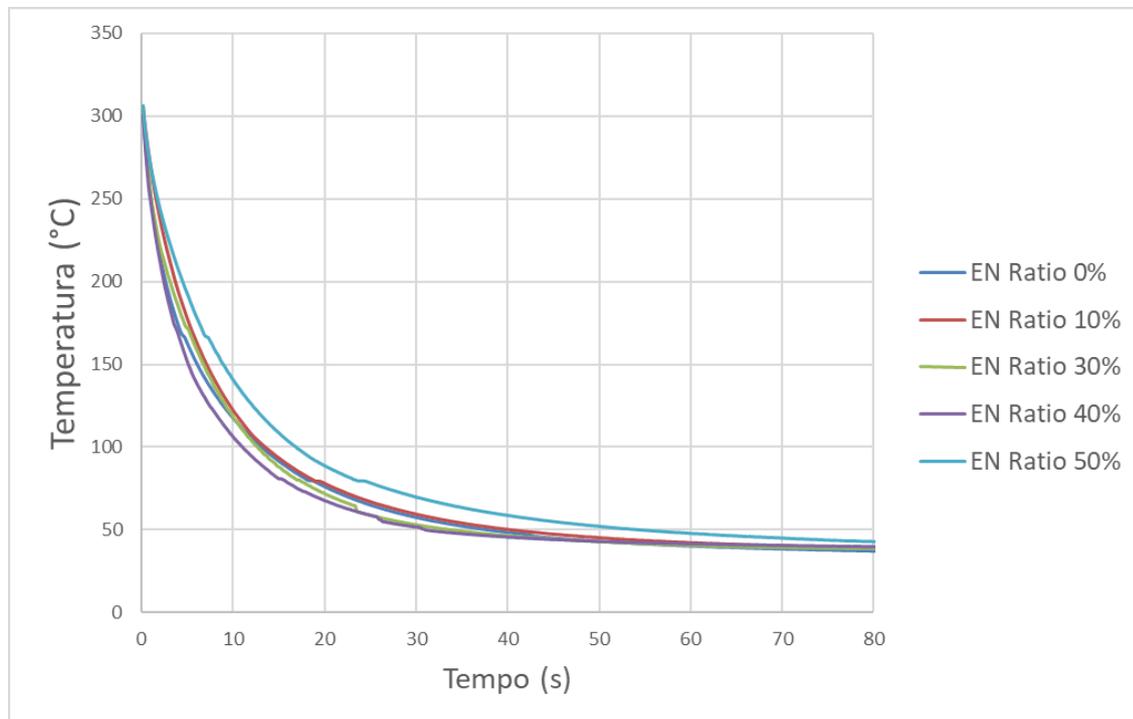


Tabela 18 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).

EN Ratio	0%	10%	30%	40%	50%
I_m (A)	49	52	51	51	51
I_{ef} (A)	96	97	91	87	87
U_m (V)	16,2	15,8	16,2	16,2	15,8
U_{ef} (V)	16,6	16,3	16,6	16,4	16,1
v_a (m/min)	2,9	2,9	3,1	3,4	3,4
P (W)	1081	1074	1041	1001	980

Ao contrário do que se poderia esperar para este ensaio, o resfriamento foi mais lento justamente na situação onde a EN Ratio foi de 50%, onde se tem maior ação da polaridade negativa conforme mostra a Figura 85. A temperatura média nesta condição foi de 66,1°C enquanto que para a EN Ratio de 0% este valor ficou em 56°C. Já que EN Ratio = 50% se tem a menor potência (980 W), seria razoável supor que se teria a menor imposição de calor e consequentemente, um resfriamento mais rápido. Contudo, não é o que acontece. Nas curvas correspondentes aos demais ensaios, há uma grande sobreposição, sendo que o resfriamento mais rápido foi em EN Ratio = 40% com temperatura média de 55,4°C. Este resultado é um indício de que a curva correspondente a EN Ratio de 50% pode ter sido um desvio dentro dos resultados.

Figura 85 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) para diferentes EN Ratios.



A Figura 86, que traz as macrografias correspondentes a estes ensaios e o gráfico EN Ratio vs penetração de solda da Figura 87, mostram que as penetrações de solda ficaram em 1 mm ou mesmo acima deste valor, exceto em uma amostra. De forma isolada, este resultado sugere de que em quase todos os casos haveria perfuração durante a soldagem. Entretanto, ao analisar o verso dos corpos de prova (Figura 88), constata-se que realmente há marcas provocadas pelo calor do arco, porém nenhuma delas tão acentuadas quanto aqueles da Figura 74 (soldados com processo MIG Pulsado CC). Ademais, não houve nenhum caso de perfuração nestes ensaios. Os resultados concernentes à análise do verso da chapa, sugerem que o risco de ocorrer uma perfuração neste tipo de soldagem é relativamente menor com o uso do processo MIG Pulsado CA, embora o êxito da soldagem continue dependente do correto posicionamento da tocha de soldagem em relação à junta.

Figura 86 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm). Juntas soldadas com diferentes EN Ratios.

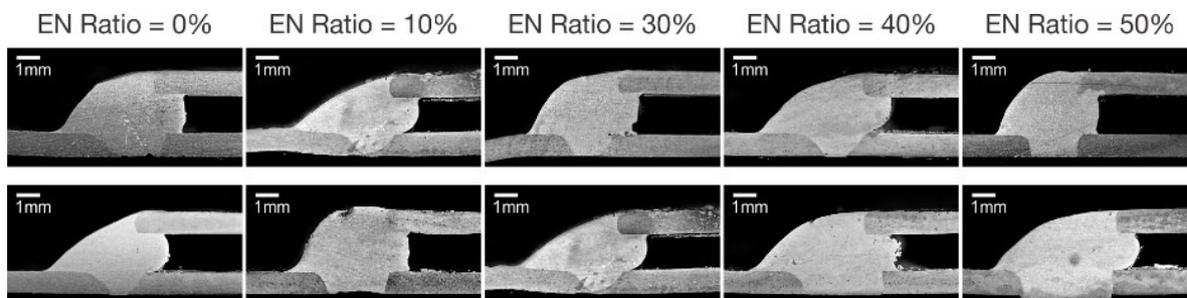


Figura 87 - Gráfico com os resultados de penetração para os ensaios com a OTC DW-300 (junta sobreposta, $gap = 1,5$ mm).

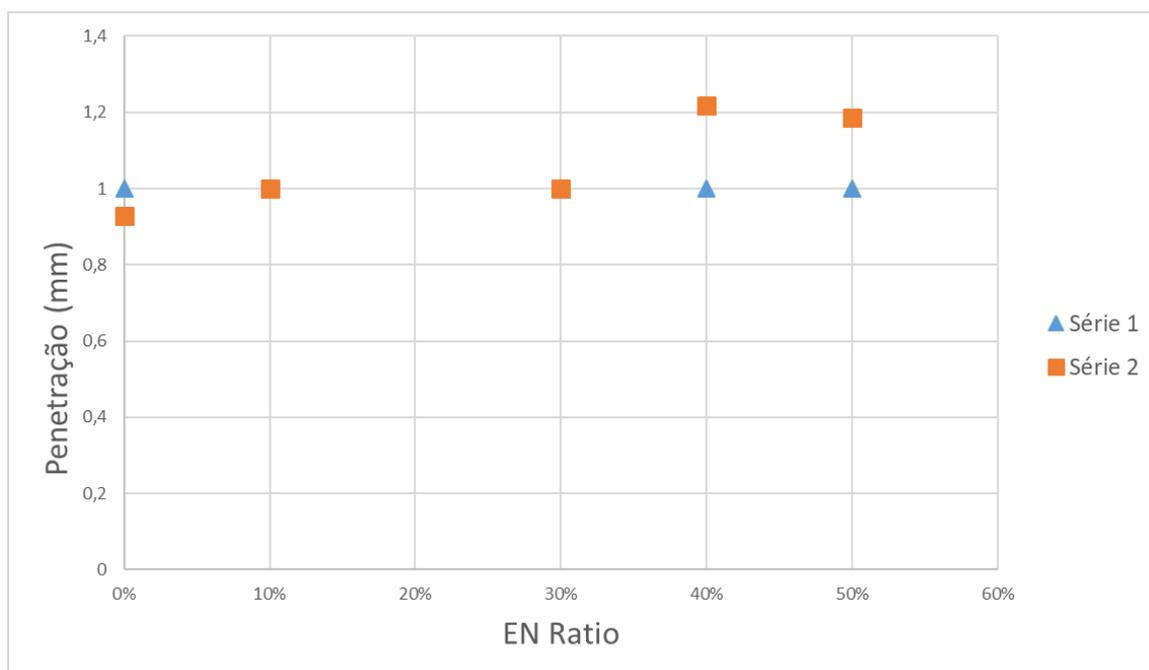
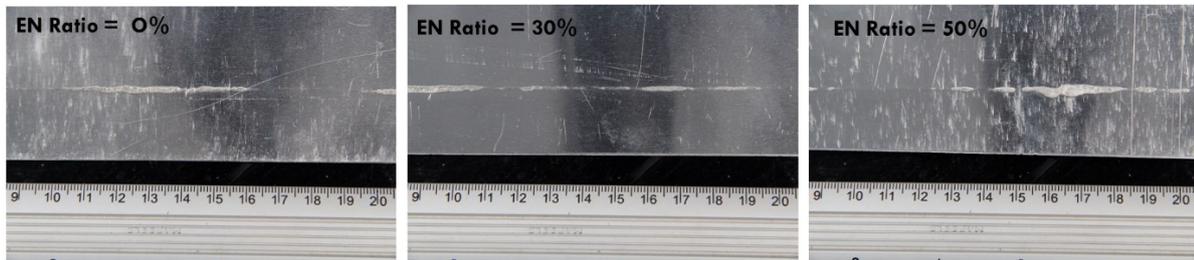
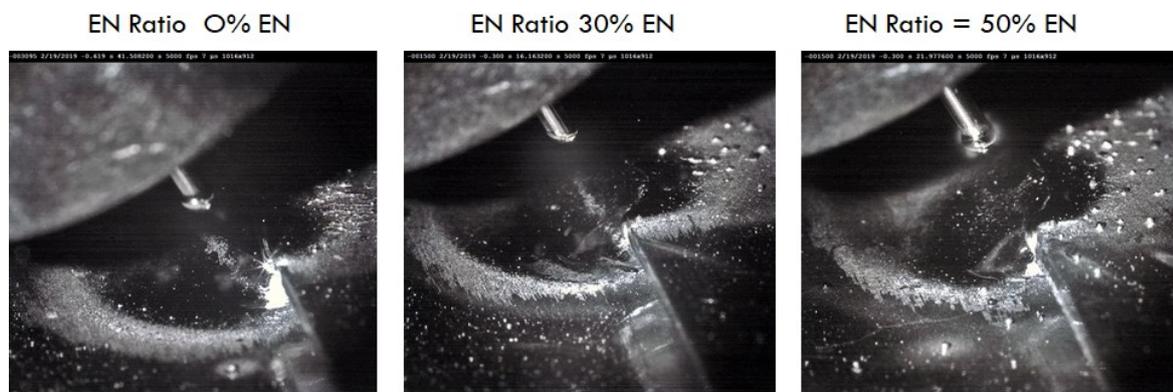


Figura 88 - Versos das chapas para corpos de prova referentes aos EN Ratios de 0%, 30% e 50%. MIG Pulsado CA (OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm).



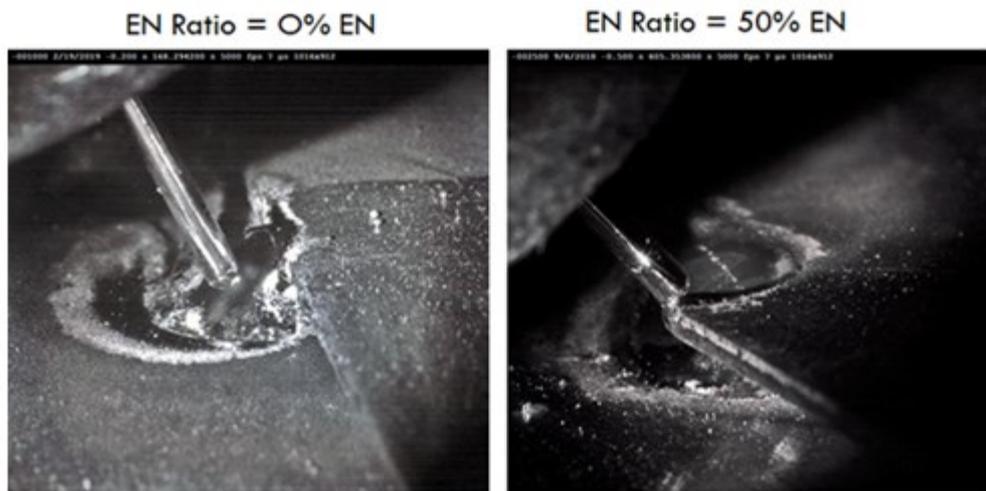
A Figura 89 mostra imagens retiradas das filmagens de alta velocidade realizadas durante os ensaios. Estas soldagens foram bem-sucedidas não por uma capacidade especial do processo MIG/MAG Pulsado CA de preencher juntas, mas pelo correto posicionamento da tocha de soldagem em relação à junta.

Figura 89 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm).



As imagens das Figura 90 denotam situações onde a maior capacidade de preenchimento de *gap's* (comumente atribuída ao processo MIG/MAG Pulsado CA) não evitou falha no preenchimento da junta na situação onde se cometeu erro no posicionamento da tocha. Para o caso onde EN Ratio = 0%, a tocha ficou posicionada de modo que o arco ficou mais concentrado na chapa inferior da junta, além de ter ficado em um ângulo acima de 45°. O resultado foi falta de fusão na chapa superior da junta. No caso onde EN Ratio = 50%, o ângulo está bem mais próximo do correto, contudo a energia do arco voltaico está voltada para a chapa superior da junta, resultando em mordeduras e má formação do cordão de solda.

Figura 90 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/ OTC DW-300, $gap = 1,5$ mm).



Embora os dados analisados neste item tragam dúvidas quanto à capacidade de preenchimento ou *gap bridge ability* do processo MIG/MAG Pulsado CA, cabe se fazer uma análise mais pormenorizada desta característica. Geralmente, a literatura não faz uma análise do ponto de vista da fluidez do material sendo depositado sobre a junta. Em corrente contínua positiva (CC+), supostamente o calor desenvolvido na junta é maior, logo a fluidez do material ao ser depositado deverá maior. A lógica sugere que com maior fluidez a capacidade de preenchimento será maior pois o material irá se difundir (ou “espalhar”) com maior facilidade na região da junta. Contudo, na soldagem de chapas finas (como as empregadas nestes ensaios) há sempre o risco de perfuração nesta situação. No processo em CA, supostamente se tem um menor calor sendo desenvolvido na junta o que diminui o risco de perfuração. Contudo, o calor desenvolvido no eletrodo durante a polaridade negativa é maior sendo suficiente para aumentar a taxa de fusão do processo em relação ao processo CC nas mesmas condições. Este calor desenvolvido no eletrodo pode muito bem ser transferido as gotas metálicas sendo destacadas de forma a manter um mínimo de fluidez do material. Deste modo, se tem uma solução razoável: em CA se tem menor risco de penetração sem que ocorra uma perda considerável na fluidez do material sendo depositado.

6.3 ENSAIOS SOBRE CHAPAS PLANAS

Uma das explicações constantes na literatura sobre MIG/MAG Pulsado CA para a chamada *gap bridge ability* é o aumento do volume da gota metálica conforme se aumenta a EN Ratio (ARIF; CHUNG, 2014). Este item traz ensaios com o objetivo colaborar para um melhor entendimento neste sentido.

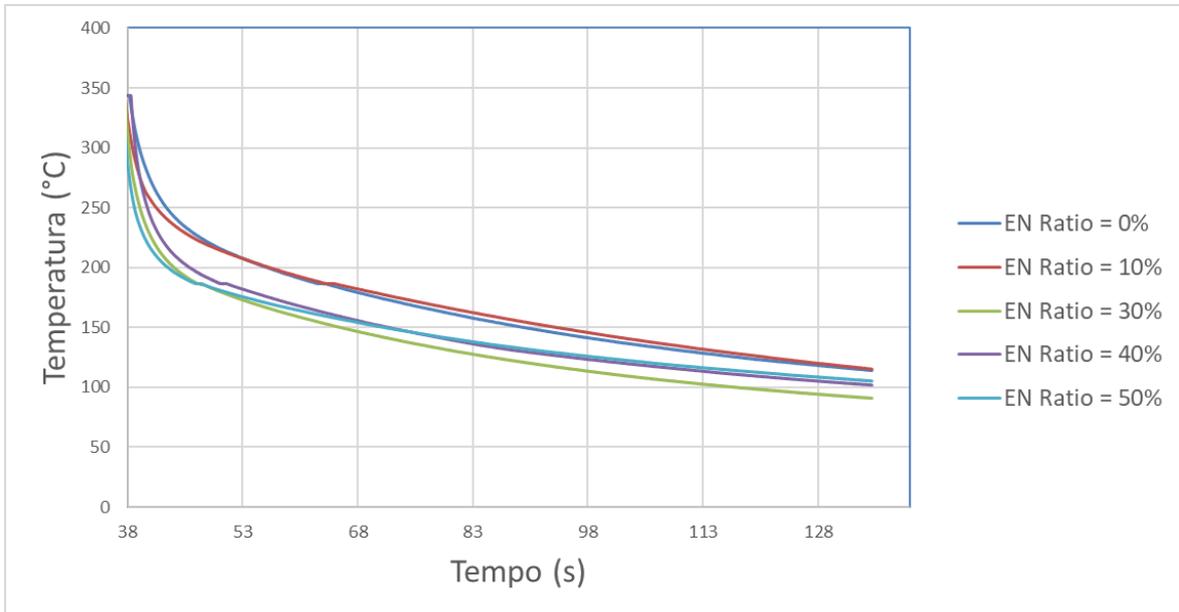
A Tabela 19 traz os valores médios e eficazes para corrente e tensão. A diferença entre a menor e a maior corrente média registrada é de 11 A. Para corrente eficaz esta diferença foi de 27 A, bastante alta se considerarmos os resultados de ensaios anteriores. Neste caso, a velocidade de alimentação de arame foi mantida constante em 3,8 m/min.. Esta abordagem inicial foi considerada para que se observasse apenas a ação da polaridade negativa sobre as dimensões da gota. A diferença entre a maior e menor potência foi de 489 W, também considerável em relação aos resultados de experimentos anteriores.

Tabela 19 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) e velocidade de arame constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).

EN Ratio	0%	10%	30%	40%	50%
I_m (A)	66	66	61	62	55
I_{ef} (A)	118	115	102	97	91
U_m (V)	18,1	17,9	17,3	17,1	16,7
U_{ef} (V)	18,7	18,6	17,8	17,6	17,1
v_a (m/min)	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
P (W)	1635	1609	1367	1330	1143

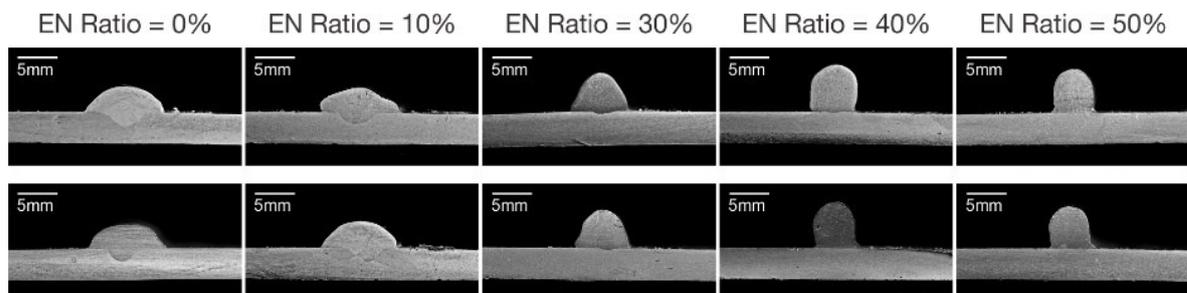
As curvas da Figura 91 mostram uma sobreposição entre as curvas referentes aos *EN Ratios* de 0% e 10% cujos resfriamentos foram mais rápidos. As temperaturas médias foram praticamente idênticas: de 210,8°C para EN Ratio = 0% e 210,9°C para EN Ratio = 10%. As demais curvas paraticamente se sobrepõem ao longo do intervalo de ensaio. A temperatura média mais baixa registrada foi de 188°C para um EN Ratio intermediário (30%), resultado este que foge ao esperado para o processo MIG/MAG Pulsado CA.

Figura 91 - Resfriamento das soldagens sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (3,8 m/min).



As macrografias da Figura 92 endossam resultados que constam na literatura com a maior penetração na EN Ratio de 0% e a menor penetração na EN Ratio de 50%. Estes resultados corroboram também as informações de Jaskulski (2009) que afirma que na soldagem MIG Pulsado CA do alumínio, para EN Ratios acima de 30% não haveria mais qualquer benefício relevante no tocante a diminuição de penetração de solda. Nota-se também a diminuição considerável da molhabilidade após 30%, de modo que os últimos cordões são completamente inaceitáveis do ponto de vista prático.

Figura 92 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Chapas soldadas com diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (3,8 m/min).



As medições das características geométricas foram plotadas nos gráficos da Figura 93.a (penetração de solda), Figura 93.b (altura do reforço) e Figura 93.c (ângulo de molhamento) que mostram, de maneira geral, que à medida que a EN Ratio aumentou a penetração diminuiu enquanto reforço e ângulo de molhamento aumentaram. As exceções ficam para o reforço e ângulo de molhamento para a EN Ratio de 50%, mesmo assim por muito pouco. Deste modo, na soldagem do tipo cordão sobre chapa (de espessura 4 mm), os resultados corroboram dados da literatura referente ao processo MIG Pulsado CA. Não obstante, em situações de ordem mais prática os resultados não foram tão previsíveis, como na soldagem de juntas sobrepostas abordadas no início deste capítulo.

As imagens da Figura 94 foram retiradas de filmagens de alta velocidade realizadas durante os ensaios. A partir destas filmagens, se constatou que sinérgico da OTC para a soldagem pulsada do alumínio não produz o destacamento de mais de uma gota por pulso (ou uma gota principal e outras secundárias). Embora se tenha apenas ensaios realizados na OTC, isto é um indício de que as empresas consideram diferentes abordagens para diferentes materiais neste sentido. Um motivo plausível para que a OTC empregue a estratégia de “uma gota por pulso” ou UGPP no caso do alumínio, reside no fato de que o alumínio tem maior capacidade de absorção de gases presentes na atmosfera (mais especificamente, O_2 , H_2 , N_2) em relação ao aço. Partindo do pressuposto de que a proteção gasosa pode não ser eficiente, ao aumentar o número de gotas destacadas por pulso, também se está aumentando o risco de que os elementos supracitados sejam absorvidos pela gota metálica e eventualmente causem trincas, poros, fragilização dentre outros defeitos ou discontinuidades.

Figura 93 - Gráfico com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame constante).

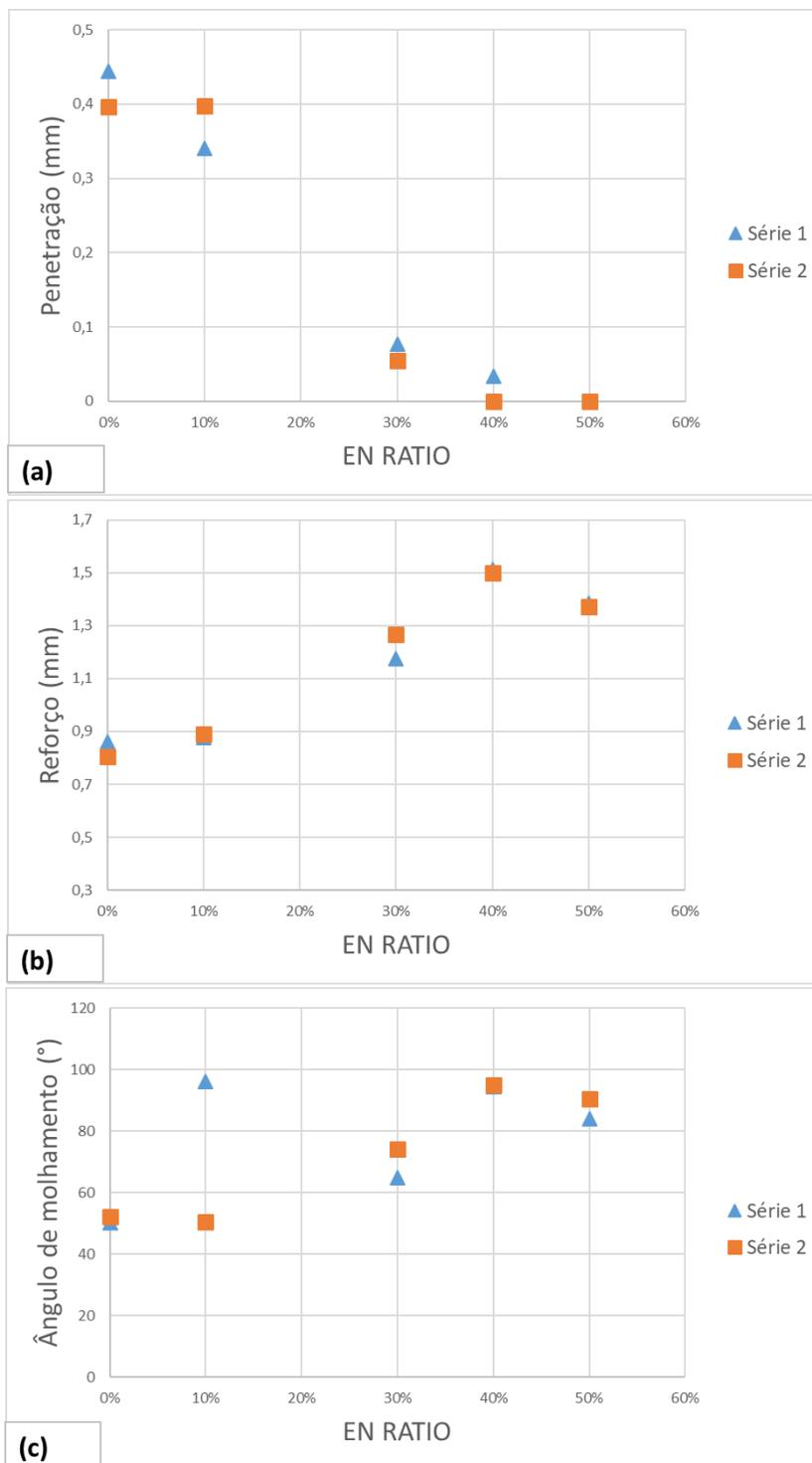
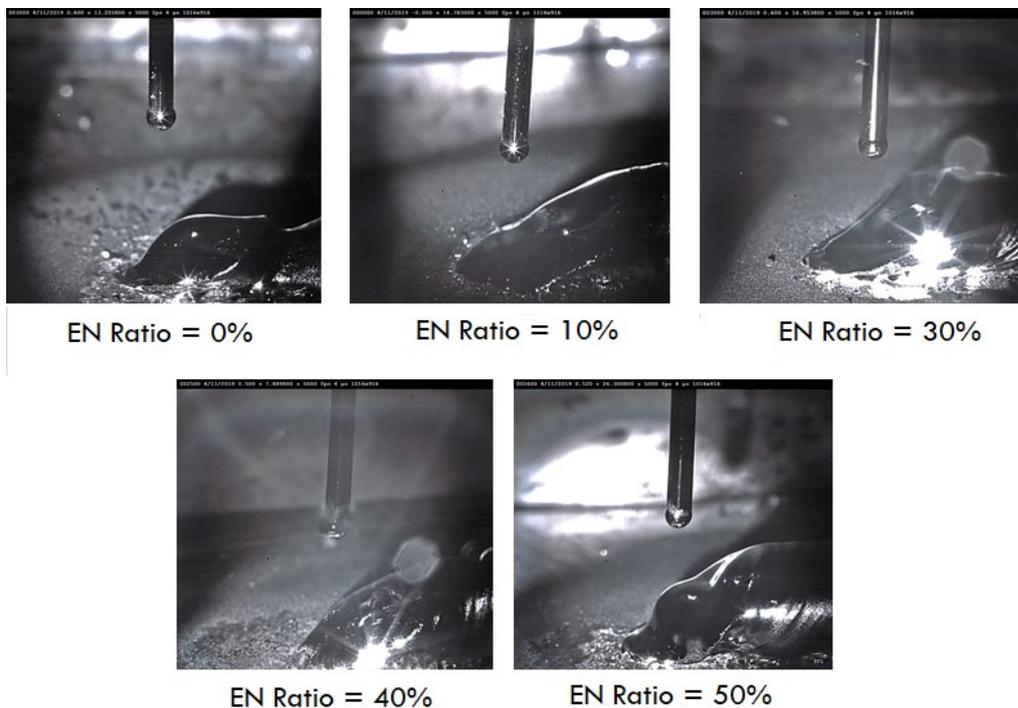


Figura 94 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/ OTC DW-300 e ensaio sobre chapa).



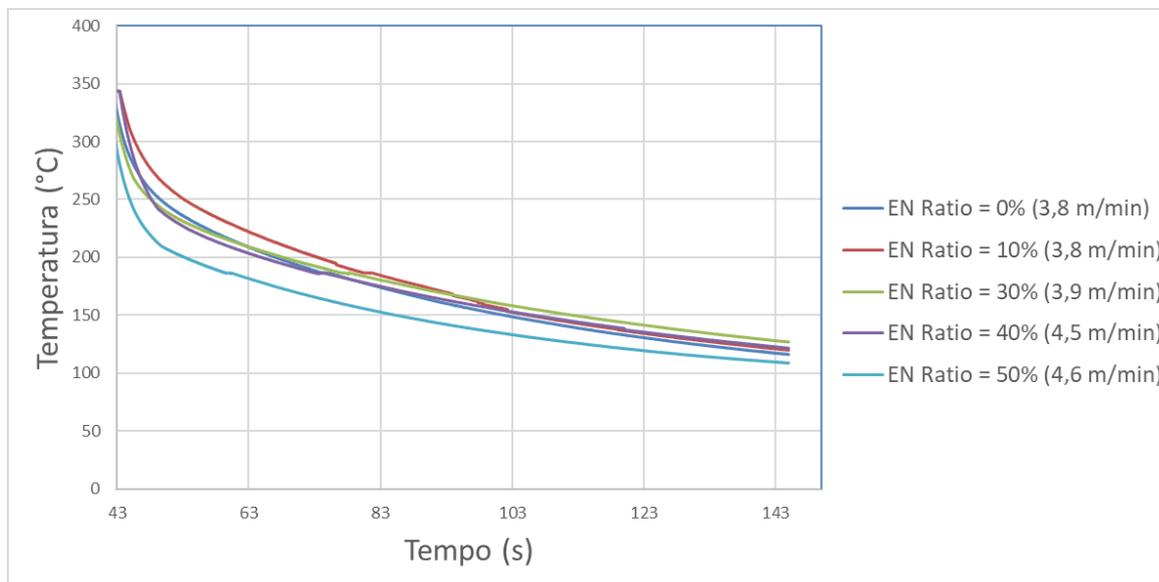
Têm-se a seguir, os valores médios e eficazes para corrente e tensão quando é permitido que a velocidade de alimentação de arame seja aumentada conforme aumenta a EN Ratio. Conforme é apresentado na Tabela 20, quase não há variação na corrente média. A diferença entre o maior e o menor valor foi de 20 A para a corrente eficaz. As tensões médias e eficazes também sofreram variação. Todavia, a maior tensão medida foi para a EN Ratio de 0% tanto para o valor eficaz quanto para o valor médio. A velocidade de alimentação de arame passou de 3,8 m/min em 0% e chegou a 4,6 m/min em 50% de EN Ratio. A diferença entre a maior (EN Ratio = 0%) e a menor potência foi de 489 W (EN Ratio = 50%).

Tabela 20 - Valores Médios e Eficazes para MIG Pulsado CA (OTC DW-300) e velocidade de arame variando conforme a EN Ratio. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P).

EN Ratio	0%	10%	30%	40%	50%
I_m (A)	64	66	61	64	63
I_{ef} (A)	115	113	101	98	95
U_m (V)	19,5	17,9	17,0	16,7	16,7
U_{ef} (V)	19,5	16,3	16,6	16,4	16,1
v_a (m/min)	3,8	3,8	3,9	4,5	4,6
P (W)	1632	1558	1297	1285	1143

As curvas de resfriamento da Figura 95, demonstram que o resfriamento mais lento não foi para a EN Ratio de 0% (temperatura média de 218,6°C) mas para de 10% (temperatura média de 223,1°C) o que não chega a ser uma grande desacerto em relação ao esperado para o processo MIG/MA Pulsado CA. Mesmo assim, as curvas correspondentes aos valores de 0%, 10%, 30% e 40% de EN Ratio ficam praticamente sobrepostas pela maior parte do tempo de resfriamento quando não durante todo o tempo considerado para o ensaio. O resfriamento mais rápido fica para a EN Ratio de 50% com temperatura média de 203°C, resultado concordante com o esperado para o processo MIG/MAG Pulsado.

Figura 95 - Resfriamento das soldagens sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variável.



Analisando as macrografias da Figura 96 juntamente com o gráfico da Figura 97.a se tem que a penetração de solda cai à medida que se emprega uma porcentagem maior de EN Ratio. O único resultado destoante vai para a EN Ratio de 0%, série 2, onde a penetração de solda fica muito abaixo do esperado. Novamente, constata-se que não há grande diminuição de penetração entre os EN Ratios de 30% e 50%. Já a taxa de fusão passou de 4,6 m/min em 30% para 5,3% em 50%, um ganho de 13%.

Figura 96 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Chapas soldadas com diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variando conforme a EN Ratio.

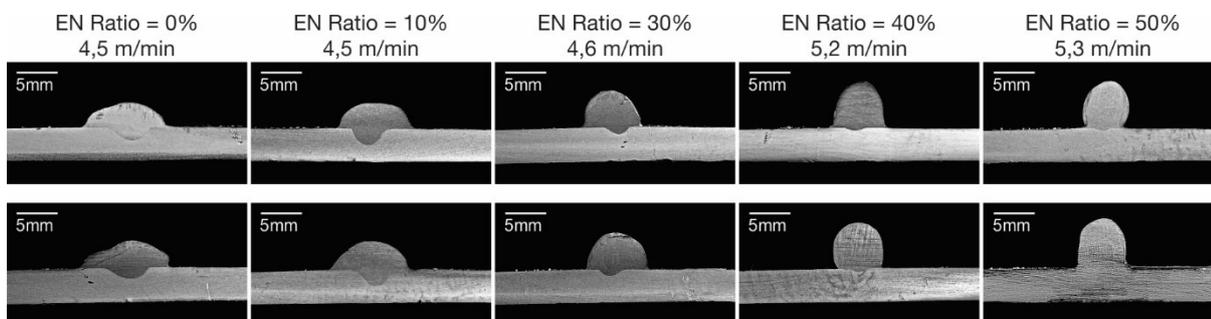
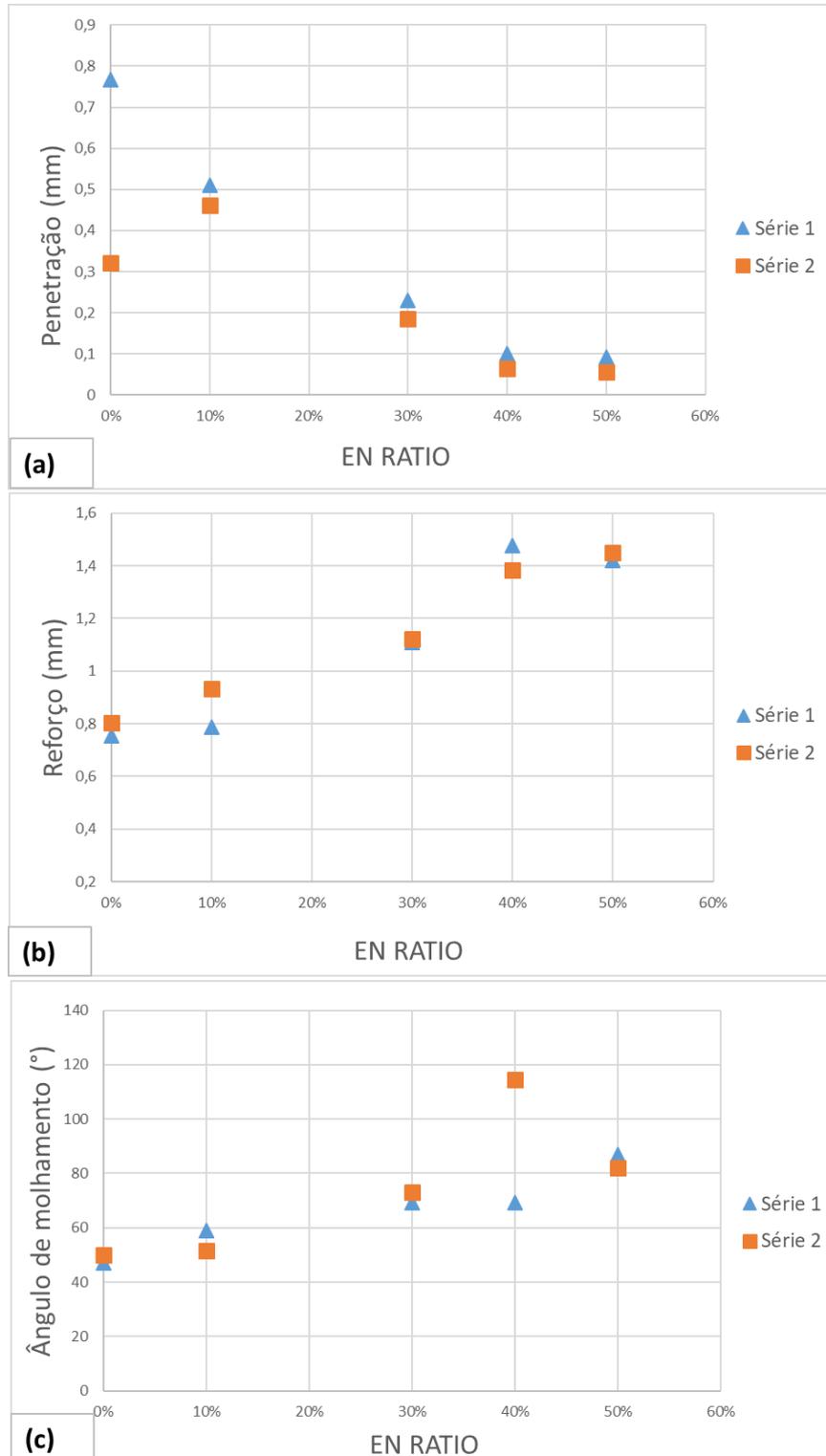


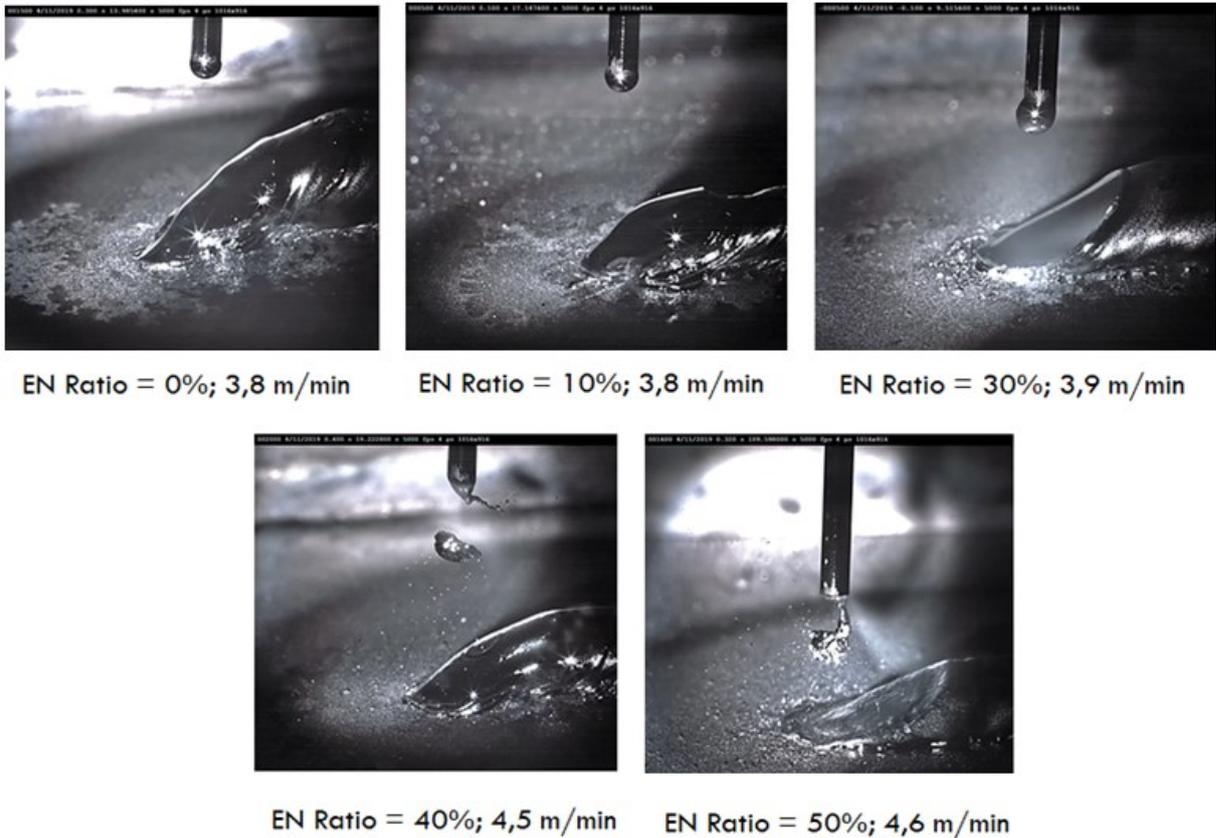
Figura 97 - Gráficos com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame variando conforme o EN Ratio).



De maneira geral, tanto altura de reforço (Figura 97.b) como ângulo de molhabilidade (Figura 97.c) aumentam conforme aumenta a EN Ratio. Estes resultados estão de acordo com o esperado para o processo MIG Pulsado CA aplicado ao alumínio.

Quanto à transferência metálica, novamente se tem a condição UGPP respeitada. Isto já era esperado, já que apenas a estratégia de permitir que a velocidade de alimentação de arame aumentasse conforme a EN Ratio não iria mudar o comportamento do sinérgico da fonte ou abordagem da fabricante para o caso do alumínio. Dito isto, cabe considerar uma situação que ocorreu tanto nos ensaios onde se manteve a velocidade de alimentação constante quanto quando foi permitido que o sinérgico da própria fonte a alterasse. Como se vê na Figura 98 (EN Ratio = 50%), as gotas destacadas simplesmente “implodem” na maior parte das vezes produzindo uma grande quantidade de respingos muito finos. Os quadros correspondentes aos EN Ratios de 40% e 50% apresentam este comportamento incomum. No primeiro caso (EN Ratio = 40%), a gota metálica é mostrada instantes após o destacamento e na iminência do colapso. O segundo caso (EN Ratio = 50%) apresenta o momento da explosão. A implosão da gota resulta na formação de respingos finos que acabam por aderir à peça de trabalho, mais precisamente nas adjacências do cordão de solda. Isto certamente é uma característica indesejável já que uma das propostas do processo pulsado (CC ou CA) é justamente coibir a formação de respingos. Mas antes de se considerar isto como uma falha na abordagem do sinérgico da fonte OTC, é necessária a consideração de que há elementos de liga que podem levar à este tipo de fenômeno durante a transferência como no caso do magnésio, composto constituinte do arame empregado neste trabalho (ER 5183). Ono et al. (2008) relatam explosão de gotas para um arame de Al-Mg (ER 5183) logo após o destacamento no processo Plasma-MIG. Este fenômeno foi atribuído ao superaquecimento da gota metálica. Tong et al. (2005) relatam o mesmo problema na soldagem MIG Pulsado CA com um arame ER 5356 e alegam que realmente ocorre superaquecimento da gota durante o pulso. Contudo, estes autores dão mais detalhes quanto a ocorrência das implosões. O que causa a explosão da gota é a vaporização do Mg no interior da gota metálica líquida formando bolhas que levam ao colapso da gota metálica. Como agravante, há a perda do elemento Mg, já que este vaporiza, além da possível perda de outros elementos de liga na explosão da gota.

Figura 98 - Imagens das filmagens de alta velocidade (Pulsado CA/ OTC DW-300, ensaio sobre chapa e velocidade de arame variando conforme o EN Ratio).



Por fim, foram realizadas medições no diâmetro das gotas destacadas a partir das filmagens de alta velocidade realizadas nestes ensaios. O objetivo desta análise, foi verificar as afirmações que consideram o aumento do diâmetro das gotas em função do aumento da EN Ratio como uma das causas prováveis da *gap bridge ability*, característica do processo. Houve dois fatores complicadores para a obtenção destes resultados. O primeiro foi o fato, já comentado, de que a gota tem tendência a implodir em determinado ponto de sua viagem através do arco voltaico. O segundo fator, está no fato de que a gota sofre deformação, provavelmente em função da pressão do arco. Então, como forma de contornar estes problemas, a medição foi realizada instantes antes do destacamento. Neste momento, não há indícios de ocorrência de implosão e o formato da gota metálica é próximo ao de um círculo. A ponte de ligação entre a

gota metálica e o eletrodo foi deixada de fora em todas as medições, considerando apenas a parte da gota que pode ser acomodado dentro de um círculo.

A Figura 99 mostra os dados para diâmetro da gota em forma de gráfico. Nota-se que para uma velocidade de arame constante, o diâmetro da gota aumenta de 1,3 mm em 0% até um máximo de 1,7 mm em 50% de EN Ratio, um aumento de apenas 0,4 mm. Os resultados não são muito diferentes para uma velocidade de arame variável. O volume das gotas aumenta de 2,1 mm³ para aproximadamente 3,6 mm³ com velocidade constante e de 2,1 mm³ para 3,1 mm³ com velocidade de alimentação variável. Diante destes resultados, é preciso fazer algumas considerações. É necessário se perguntar se este aumento é significativo a ponto de determinar o sucesso ou não de uma operação de soldagem, ou para auxiliar no preenchimento de *gap's* entre juntas sobrepostas. Ademais, uma parte do volume de material presente nas gotas é perdido na forma de respingos finos. Outra questão que se pode trazer é o aumento do diâmetro das gotas que significa um aumento da superfície de absorção que pode ser prejudicial, conforme já foi comentado anteriormente.

O gráfico da Figura 100 é nada mais do que uma informação adicional. Em (a) tem as medições de diâmetro de gota para a Série 1 de experimentos e (b) tem se as medições para a série 2. Este compara os diâmetros de gota reais com os diâmetros teóricos, e demonstra certa concordância entre ambos, principalmente no que concerne a Série 1.

De acordo com os resultados descritos neste item, é possível afirmar então que a vantagem real do processo CA está na diminuição do risco de perfuração no caso de sua aplicação em chapas finas. O processo pulsado CC também preenche *gap's* com eficiência razoável, porém, o risco de perfuração é maior. Cabe lembrar também que o desalinhamento da tocha em relação à junta pode levar ao insucesso da operação seja para o processo em CC ou CA. Desta forma o processo pulsado CA oferece a “ferramenta” da polaridade negativa para atenuar este problema. Combinado com o correto alinhamento da tocha de soldagem, o uso da polaridade negativa pode reduzir substancialmente o risco de perfuração, além de diminuir deformação nas chapas. Embora esteja fora do escopo deste trabalho, é possível conjecturar que, com os devidos estudos e experimentações, seja possível realizar cordões de solda de aparência e características geométricas satisfatórias com baixo risco de perfuração em chapas finas.

Figura 99 - Variação do diâmetro da gota e volume em função do aumento do EN Ratio para velocidade de alimentação de arame constante e variável.

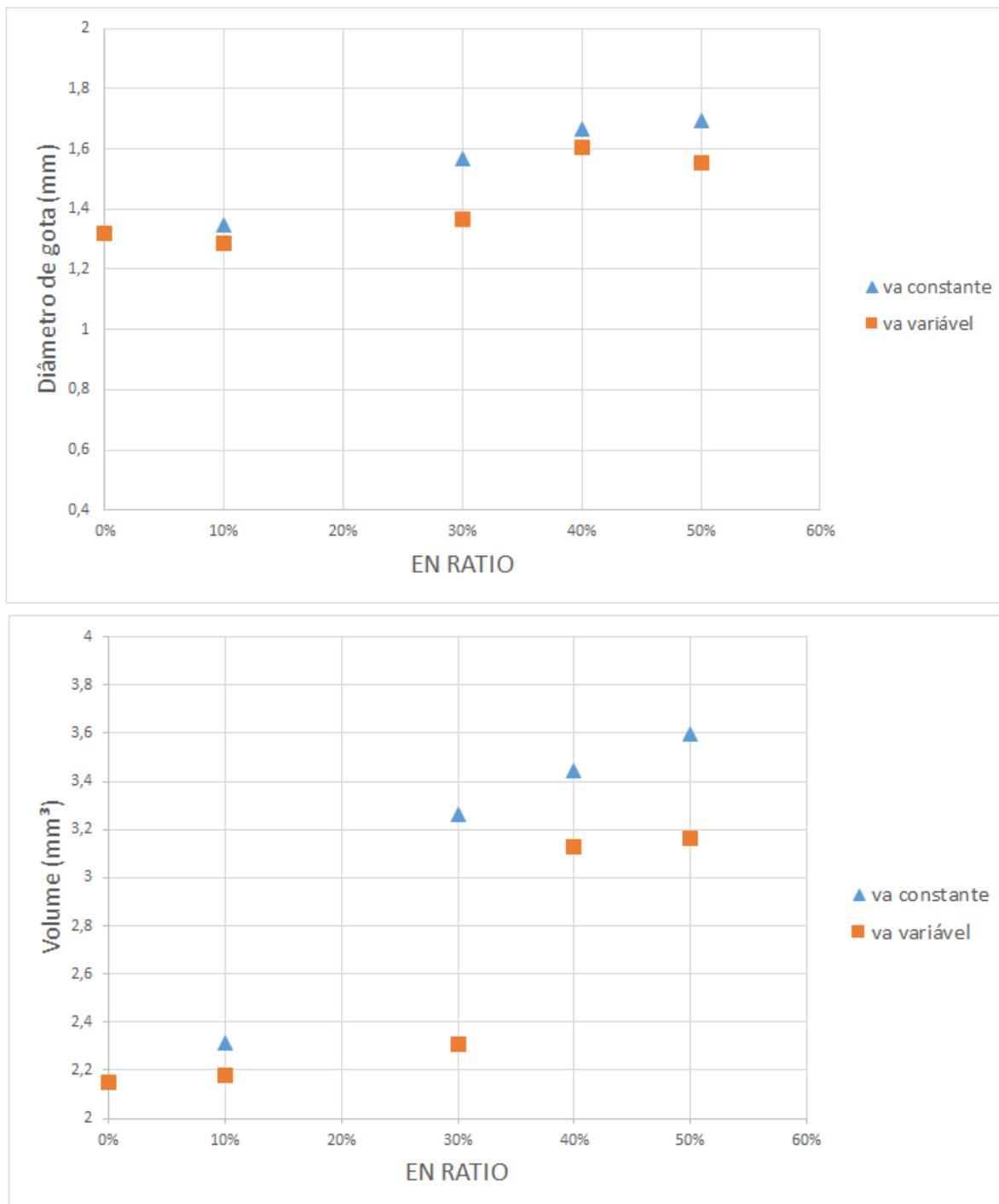
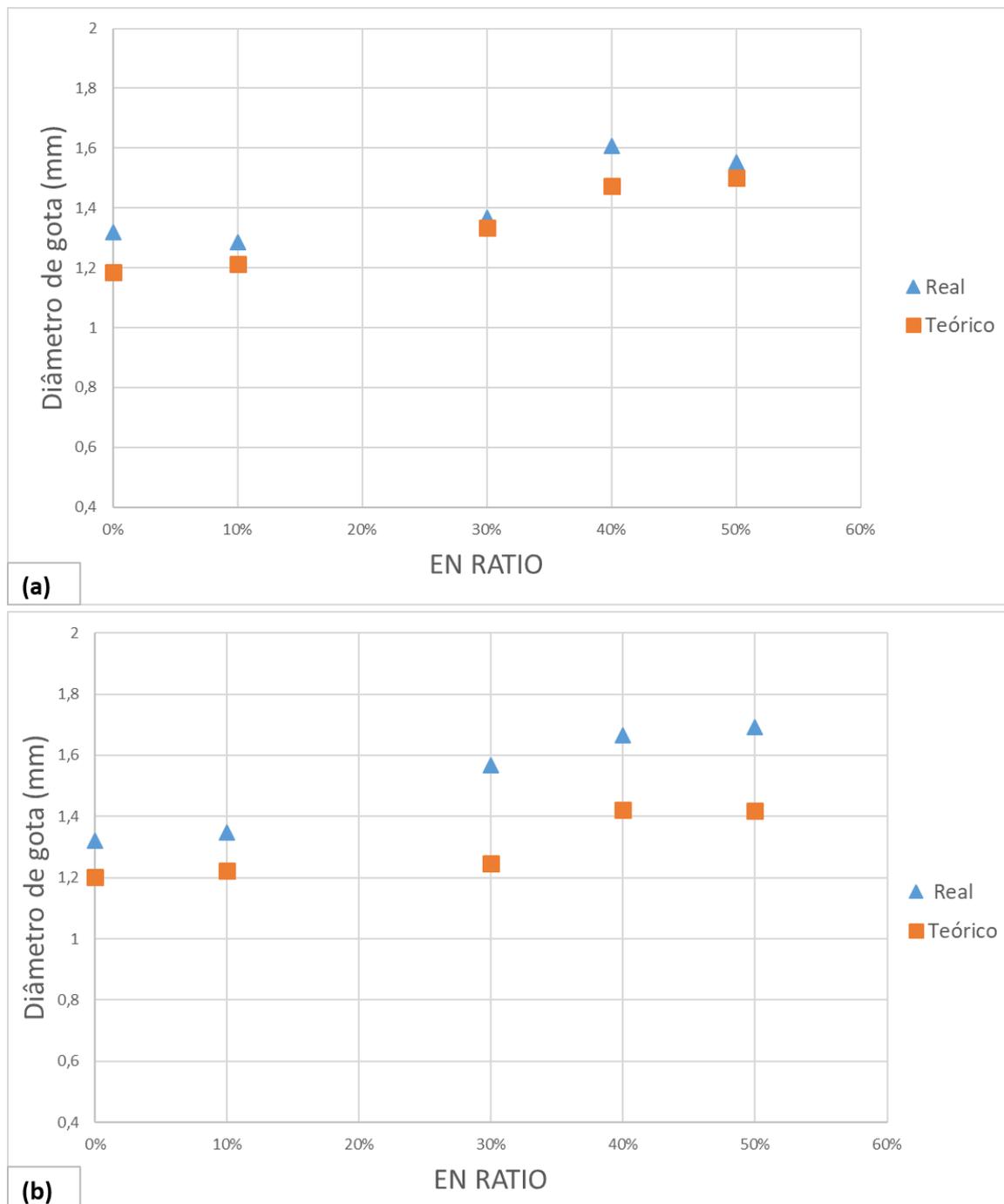


Figura 100 - Comparação entre os diâmetros de gota medidos e dos diâmetros calculados (teórico) para (a) Série 1 e (b) Série 2 de experimentos.



7 SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL COM MIG/MAG PULSADO CA

A metodologia e os resultados descritos neste capítulo correspondem a proposta constante no objetivo (4), descrito no capítulo 1 (Introdução), item 1.3. Este capítulo encerra os estudos deste trabalho tratando do processo MIG/MAG Pulsado e seus desenvolvimentos recentes no que concerne a soldagem com arame de aço inoxidável. Em chapas de menor espessura e em se tratando deste material, a aplicação da soldagem MIG/MAG Pulsado normalmente gera resultados melhores em comparação com o MIG/MAG convencional. Deste modo, fabricantes como a OTC, tem apostado não só no MIG/MAG Pulsado, mas também em sua versão como corrente alternada. Fontes como a OTC DW-300, empregada neste trabalho, apresentam uma forma de onda de corrente onde além de uma base negativa, se tem também um pulso negativo. Este pulso, segundo alguns artigos como de Jaskulski (2009), tem como objetivo garantir a estabilidade de arco em situações de EN Ratios mais altas (acima de 50%). Neste capítulo são apresentados resultados a respeito das formas de onda, da transferência metálica, do efeito da polaridade negativa na soldagem e uma comparação entre cordões de solda realizados com processo pulsado CA sem pulso na polaridade e com pulso na polaridade negativa para fins de comparação e análise. Para tornar possível esta análise, a metodologia a seguir foi desenvolvida.

7.1 METODOLOGIA

De maneira distinta ao que ocorreu no item anterior, os ensaios neste capítulo se limitaram apenas a soldagem sobre chapas. Por questões de disponibilidade e até mesmo de custo, os corpos de prova foram produzidos em aço ao carbono SAE 1020 com dimensões de 150 x 100 x 9,6 mm. Depois de realizado o ensaio, os corpos de prova foram reunidos e seccionados para retirada de amostras da região central de cada um. As amostras foram submetidas a ensaio macrográfico para análise posterior das características dimensionais de cada cordão. O ataque foi ácido nítrico 5% (Nital).

O arame empregado nos ensaios foi o ER 309LSi, Ø1,2 mm e sua composição química pode ser vista na Tabela 21. Deste modo então, se tem uma soldagem de aço inoxidável sobre chapas de aço carbono (soldagem dissimilar). Como não poderia deixar de ser, os corpos de

prova foram lixados para a retirada total da carepa de laminação ou quaisquer resquícios de ferrugem. Além disso, os corpos de prova foram limpos antes da soldagem com um pano umedecido em álcool caseiro para retirar qualquer resquício de limalha de ferro ou outro contaminante superficial proveniente da manipulação das peças.

Tabela 21 - Composição química do arame ER 309LSi.

Composição química				
Mn	C	Si	Ni	Cr
1.8 %	<0,03 %	0.8 %	13 %	24 %

Fonte: ESAB (2020)

O robô antropomórfico YASKAWA MOTOMAN modelo YR-UP6-A02 foi empregado como sistema de movimentação de tocha tal como nos ensaios anteriores. A velocidade de soldagem regulada foi de 36 cm/min para todos os ensaios. A tocha de soldagem foi mantida em um ângulo de 90° em relação a superfície da peça de trabalho e a DBCP foi de 25 mm. O gás de proteção foi 98%Ar + 2%O₂ a uma vazão de 17 l/min. Como se verá nos resultados mais adiante, em uma etapa de ensaios a velocidade de alimentação foi regulada em 6,0 m/min em todas as soldagens independentemente da EN Ratio. Em uma segunda etapa, a velocidade de alimentação de arame iniciou em 6,0 m/min e foi permitido que esta variasse de acordo com a EN Ratio ajustada. Com o aumento de EN Ratio, aumenta-se também a taxa de fusão e o sistema sinérgico da fonte utilizada aumenta automaticamente a velocidade de alimentação de arame para igualar a taxa de fusão. Este sistema está presente na fonte OTC DW-300 empregada novamente para estes ensaios, porém com sinérgico regulado para arames de aço inoxidável.

Utilizou-se novamente a câmera termográfica FLIR SC7200 F/3 para a captura das imagens termográficas. A configuração da câmera para estes ensaios está na Tabela 22. Conforme já comentado, na primeira etapa a velocidade de alimentação de arame foi mantida constante para as seguintes EN Ratios: 0%, 30%, 40%, 50%, 60%, 65%. Foram realizados dois cordões para cada EN Ratio com velocidade de alimentação de arame constante em 6,0 m/min. Na primeira série (Série 1) de seis experimentos, a câmera termográfica foi disposta acima do corpo de prova de modo que capturou imagens tais como a da Figura 101.a. Na segunda série (Série 2) de seis experimentos, a câmera termográfica foi disposta abaixo do corpo de prova (Figura 102), de modo a filmar o verso do corpo de prova tal como na imagem termográfica da Figura 101.b. Os parâmetros de pulsação para as EN Ratios testadas são dadas na Tabela 23.

Tabela 22 - Configurações da câmera termográfica reguladas no software de captura da própria câmera.

Parâmetro	Valor regulado
Tempo de captura	160 s
Taxa de captura	169 Hz
Emissividade	0,85
Temperatura ambiente	25°C
Transmissão	97%
Distância lente-peça	130 cm (acima) e 50 cm (abaixo)
Faixa de temperatura	5 à 300°C
Área da imagem	320 x 256 pixels

Tabela 23 - Tabela com parâmetros de pulsado OTC. Sendo que I_p = corrente de pulso; t_p = tempo de pulso; I_b = corrente de base; t_b = tempo de base; I_{nb} = corrente de base negativa; t_{nb} = tempo de base negativo; I_{np} = corrente de pulso negativo e; t_{np} = tempo de pulso negativo.

EN Ratio = 0%	EN Ratio = 30%	EN Ratio = 40%	EN Ratio = 50%	EN Ratio = 60%	EN Ratio = 60%
$I_p = 420$ A	$I_p = 428$ A	$I_p = 434$ A	$I_p = 448$ A	$I_p = 446$ A	$I_p = 446$ A
$t_p = 1,8$ ms	$t_p = 1,8$ ms				
$I_b = 40$ A	$I_b = 36$ A				
$t_b = 6,3$ ms	$t_b = 3,2$ ms				
	$I_{nb} = 41$ A				
	$t_{nb} = 5,9$ ms	$t_{nb} = 6,9$ ms	$t_{nb} = 10,2$ ms	$t_{nb} = 13,2$ ms	$t_{nb} = 18,7$ ms
	$I_{np} = 280$ A	$I_{np} = 304$ A	$I_{np} = 307$ A	$I_{np} = 333$ A	$I_{np} = 342$ A
	$t_{np} = 1,3$ ms	$t_{np} = 1,6$ ms	$t_{np} = 2,9$ ms	$t_{np} = 4,1$ ms	$t_{np} = 4,7$ ms

Figura 101 - (a) Imagem termográfica gerada por filmagem com a câmera termográfica localizada acima do corpo de prova. (b) Imagem termográfica gerada por filmagem com a câmera termográfica localizada abaixo do corpo de prova.

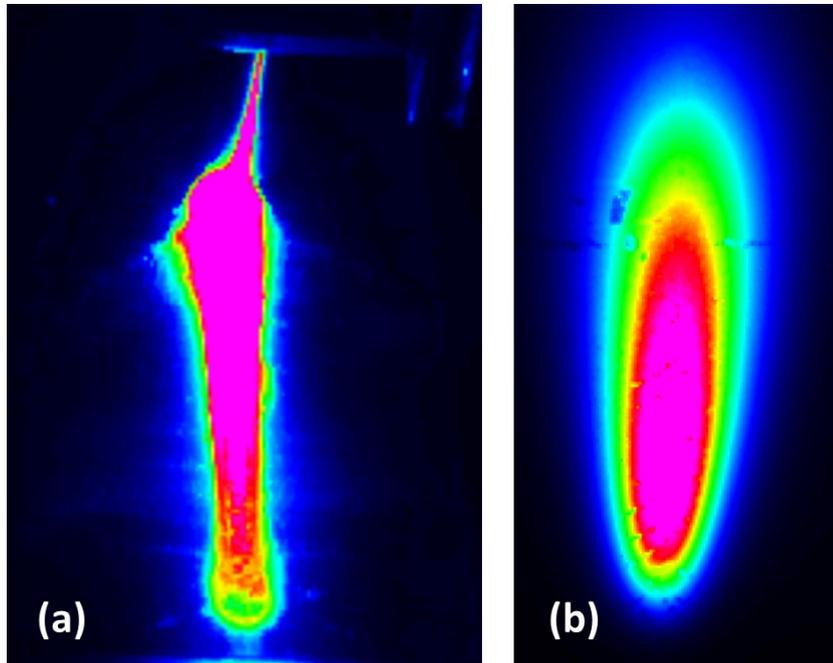


Figura 102 - Disposição da câmera termográfica em relação ao corpo de prova.



Na segunda etapa de ensaios, as mesmas EN Ratios foram testadas (0%, 30%, 40%, 50%, 60%, 65%). No entanto, conforme já comentado, iniciando de uma velocidade de alimentação de arame de 6,0 m/min (EN Ratio = 0%) foi permitido que o sistema sinérgico regulasse automaticamente a velocidade de alimentação de arame mais adequada de acordo seguindo o aumento EN Ratio, característica do sinérgico da fonte OTC DW-300. Este é o método empregado em todos os artigos consultados. A câmera termográfica foi utilizada da mesma maneira descrita no parágrafo anterior: na Série 1, filmagens com a câmera sobre o corpo de prova e na Série 2 com a câmera abaixo do corpo de prova (Figura 102) a fim de filmar o verso da chapa.

Para fins de praticidade, a filmagem de alta velocidade foi realizada separadamente, porém sob as mesmas condições de EN Ratio. No tocante a velocidade de alimentação de arame, se empregou a mesma estratégia já descrita nos parágrafos anteriores. O objetivo destas filmagens foi coletar informações a respeito do pulso negativo característico do sinérgico da OTC DW-300, além da análise da transferência metálica. A câmera de alta velocidade novamente foi a IDT Y4-D2. A câmera foi localizada de frente para a tocha de soldagem conforme mostrado na Figura 103. As configurações básicas da câmera de alta velocidade e do laser são mostradas na Tabela 24. Cabe a ressalva de que nestes ensaios os corpos de prova não foram cortados para ensaios macrográfico.

Figura 103 - Disposição da câmera de alta velocidade.



Tabela 24 - Configurações da câmera de alta velocidade reguladas no software de captura da própria câmera e do laser.

Parâmetro	Valor regulado
Iluminação	Laser HF Cavilux
Frequência de pulso do laser	5025 Hz
Laser (filtro) infravermelho	810 nm
Taxa de amostragem	50 kHz
Taxa de gravação	5000 Hz
Tempo de exposição	5 μ s
Abertura do diafragma	20
Área da imagem	1016 x 720 px

A última etapa destes ensaios consistiu de soldagens com duas fontes de soldagem. A primeira fonte, uma IMC Digiplus A7 foi empregada de modo a se conseguir um pulsado CA sem a presença do pulso na fase negativa. A outra foi a fonte OTC DW-300 cujo sistema sinérgico inclui o pulso durante a fase negativa. O objetivo foi fazer uma comparação dos resultados obtidos nos cordões de solda gerados em soldagens realizadas com as duas fontes e suas diferentes abordagens: sem pulso negativo, no caso da fonte da IMC e com pulso negativo no caso da fonte da OTC. Foram escolhidos os EN Ratios de 30%, 50% e 60%. Os parâmetros de pulsação para a IMC são mostrados na Tabela 25. Os parâmetros de soldagem para a fonte da IMC já foram mostrados para estes EN Ratios na Tabela 23. Também foram realizadas filmagens de alta velocidade para estes ensaios, mas neste caso em particular não foram feitas filmagens termográficas.

Tabela 25 - Parâmetros de pulsação empregados nos ensaios com a fonte Digiplus A7.

EN Ratio = 30%	EN Ratio = 50%	EN Ratio = 60%
$I_p = 390 \text{ A}$	$I_p = 390 \text{ A}$	$I_p = 390 \text{ A}$
$t_p = 3,0 \text{ ms}$	$t_p = 3,0 \text{ ms}$	$t_p = 3,0 \text{ ms}$
$I_b = 36 \text{ A}$	$I_b = 36 \text{ A}$	$I_b = 36 \text{ A}$
$t_b = 3,8 \text{ ms}$	$t_b = 4,4 \text{ ms}$	$t_b = 3,6 \text{ ms}$
$I_n = -113 \text{ A}$	$I_n = -113 \text{ A}$	$I_n = -113 \text{ A}$
$t_n = 5,1 \text{ ms}$	$t_n = 12,2 \text{ ms}$	$t_n = 18,4 \text{ ms}$
$v_a = 6,0 \text{ m/min}$	$v_a = 6,0 \text{ m/min}$	$v_a = 6,0 \text{ m/min}$

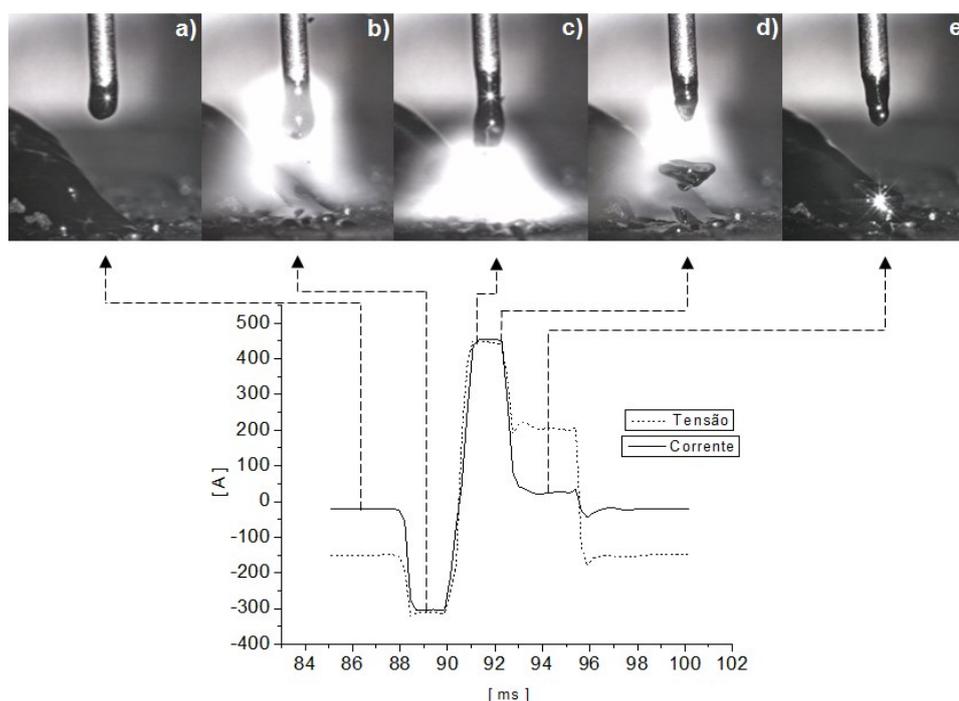
7.2 FORMA DE ONDA DE CORRENTE E TRANSFERÊNCIA METÁLICA

A Figura 104 foi montada a partir de quadros de filmagem em alta velocidade realizados na soldagem MIG/MAG Pulsado CA de aços inoxidáveis. Abaixo dos quadros está um diagrama de corrente e tensão com setas ligando cada fase do ciclo a um quadro em específico. A fonte empregada neste caso foi a OTC DW-300. No primeiro quadro (a) o processo se encontra na base negativa (I_{nb} , t_{nb}) com um valor de -41 A, com o objetivo apenas de manutenção do arco, tal como a corrente de base na polaridade positiva. No quadro (a) não é possível visualizar o arco, pois como o objetivo da filmagem foi registrar a transferência metálica, o laser foi regulado de maneira a diminuir ao máximo o efeito da emissão de luz proveniente do arco.

O quadro (b) corresponde ao pulso negativo (I_{np} , t_{np}) que supostamente visa aumentar a taxa de fusão do processo e garantir a manutenção do arco principalmente em *EN Ratios* muito elevados. De acordo com Jaskulski (2009), esta abordagem permite que se chegue a *EN Ratios* de até 80% com menor risco de extinção de arco. Outra função do pulso durante a polaridade negativa, citada por Kim e Chung (2016), está em garantir para o aço (ao carbono ou inoxidável) que o processo mantenha uma capacidade mínima de penetração de modo a se aproveitar apenas o aumento da taxa de fusão proporcionada pela polaridade negativa. Como se pode notar, a

corrente I_{np} ultrapassa -300 A e neste caso o arco é bastante visível. Fica evidente então a conhecida escalada do arco na direção da extensão livre do eletrodo causando fusão e influenciando na formação da gota metálica a ser destacada. Mesmo a uma corrente consideravelmente alta, não ocorre transferência metálica durante o pulso negativo.

Figura 104 - Forma de onda e transferência metálica para o processo MIG/MAG Pulsado CA (Fonte de soldagem OTC-DW 300).

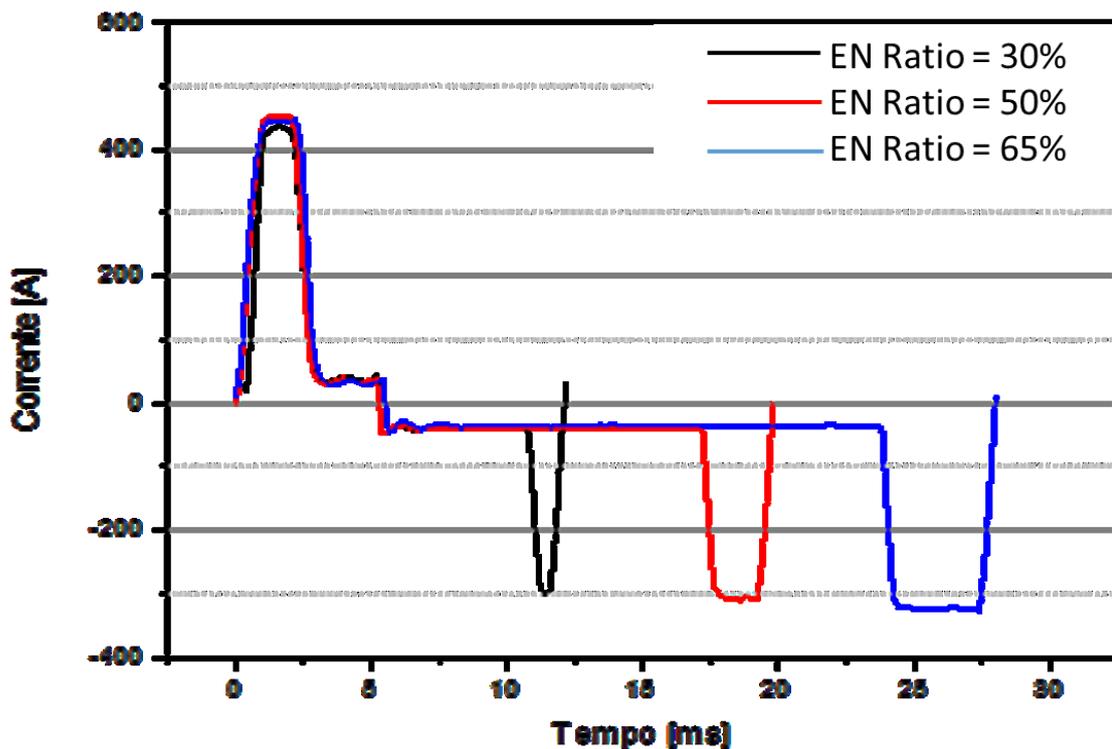


Em seguida, ocorre a mudança de polaridade do pulso negativo para o pulso positivo no quadro (c) cuja função é completar a formação da gota. Ao final da fase de pulso (I_p , t_p) a gota deve estar na iminência do destacamento. O quadro (d) corresponde ao final da fase de pulso onde ocorre o destacamento. Ainda no quadro (d), é notável a deformação na gota líquida, provavelmente causada pela pressão exercida pelo próprio arco voltaico. O quadro (e) corresponde a fase de base positiva (I_b , t_b). Logo após ocorre nova mudança de polaridade (do positivo para o negativo) e o ciclo se repete.

A Figura 105 é um diagrama de corrente vs. tempo para uma soldagem MIG/MAG Pulsado CA do aço inoxidável. Considerou-se uma velocidade de arame constante de 6,0 m/min e EN Ratios de 30%, 50% e 65%. Este gráfico mostra que a medida que a *EN Ratio* vai aumentando, o sistema sinérgico da fonte aumenta o período do ciclo. Nota-se também que os

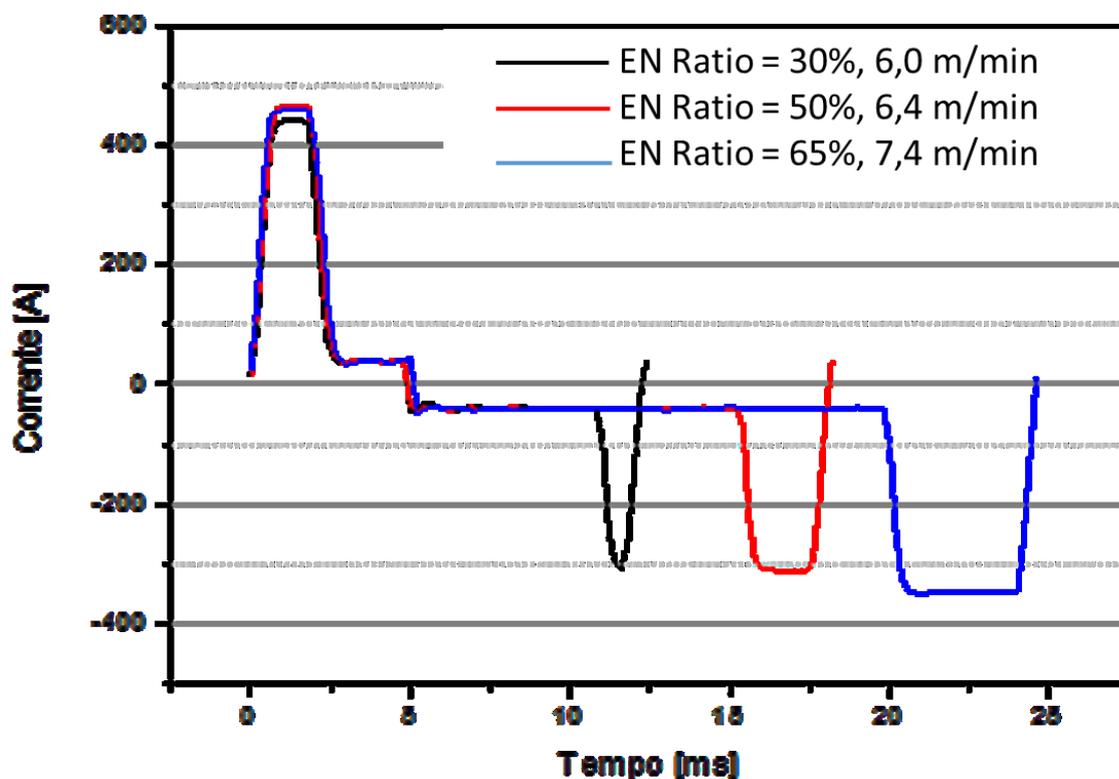
parâmetros I_p , t_p , I_b , t_n e I_{bn} sofrem mínima alteração. Já o tempo de base negativa (t_{nb}) e a corrente de pulso negativa (I_{np}) aumentam com a EN Ratio. Esta abordagem para o sinérgico é um indício de certa preocupação da fabricante com a estabilidade do arco, supondo que o pulso negativo também tenha esta atribuição. Pode também ser uma estratégia para aumentar a taxa de fusão do processo e, conseqüentemente, aumentar capacidade de produção. Levando em consideração o que foi alegado por Kim e Chung (2016), faz sentido pensar que a medida que aumenta a EN Ratio, maior deve ser a I_{np} a fim de compensar a diminuição da penetração de solda. Esta estratégia demonstra que a OTC está dando maior ênfase a característica de aumento da taxa de fusão trazida pela incorporação de uma fase negativa ao processo MIG/MAG Pulsado do que propriamente diminuição de penetração. A característica de menor penetração, de fato, tem sido pouco citada em artigos mais recentes.

Figura 105 - Forma de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) com velocidade de alimentação constante (6,0 m/min).



A Figura 106 mostra uma situação semelhante à da figura anterior. Neste caso, à medida que a *EN Ratio* foi aumentando, foi permitido que o sistema sinérgico da fonte fizesse ajustes aumentando automaticamente a velocidade de alimentação de arame. As velocidades de arame neste caso foram 6,0 m/min (*EN Ratio* = 30%), 6,4 m/min (*EN Ratio* = 50%) e 7,4 m/min (*EN Ratio* = 65%). O diagrama corrente vs. tempo não apresenta diferenças significativas em relação ao anterior (Figura 105) exceto pelo tempo de pulso negativo para a última regulagem que foi realmente maior.

Figura 106 - Forma de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300) com velocidade de alimentação de arame variando conforme a *EN Ratio*.

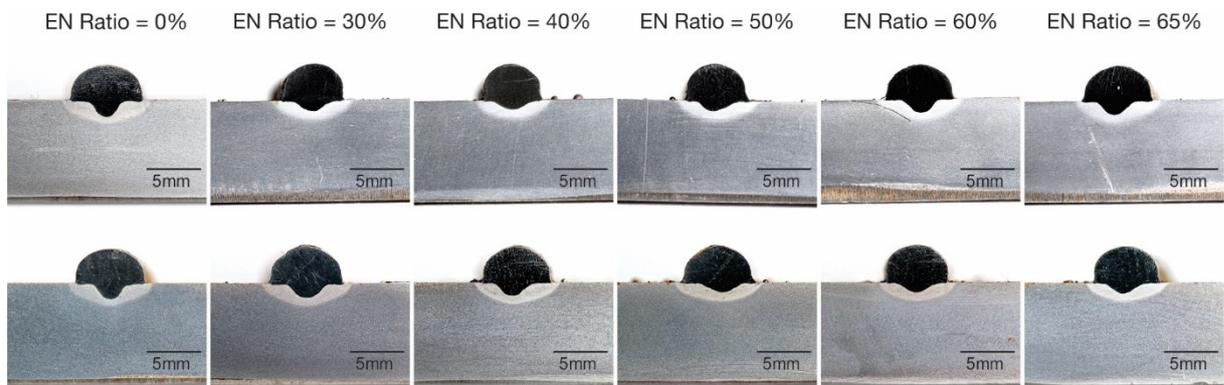


7.3 ANÁLISE MACROGRÁFICA

Este item apresenta os resultados das análises macrográficas realizadas para duas situações: soldagens realizadas com velocidade de alimentação de arame constante (6,0 m/min) e com alimentação de arame aumentando conforme aumenta a *EN Ratio* (característica do sinérgico da fonte IMC DW-300).

A Figura 107 apresenta as macrografias de duas séries de ensaios com EN Ratios variando de 0% a 65% e velocidade de alimentação de arame constante. A não ser pela presença de alguns respingos, não foram detectadas descontinuidades superficiais ou internas nos cordões de solda.

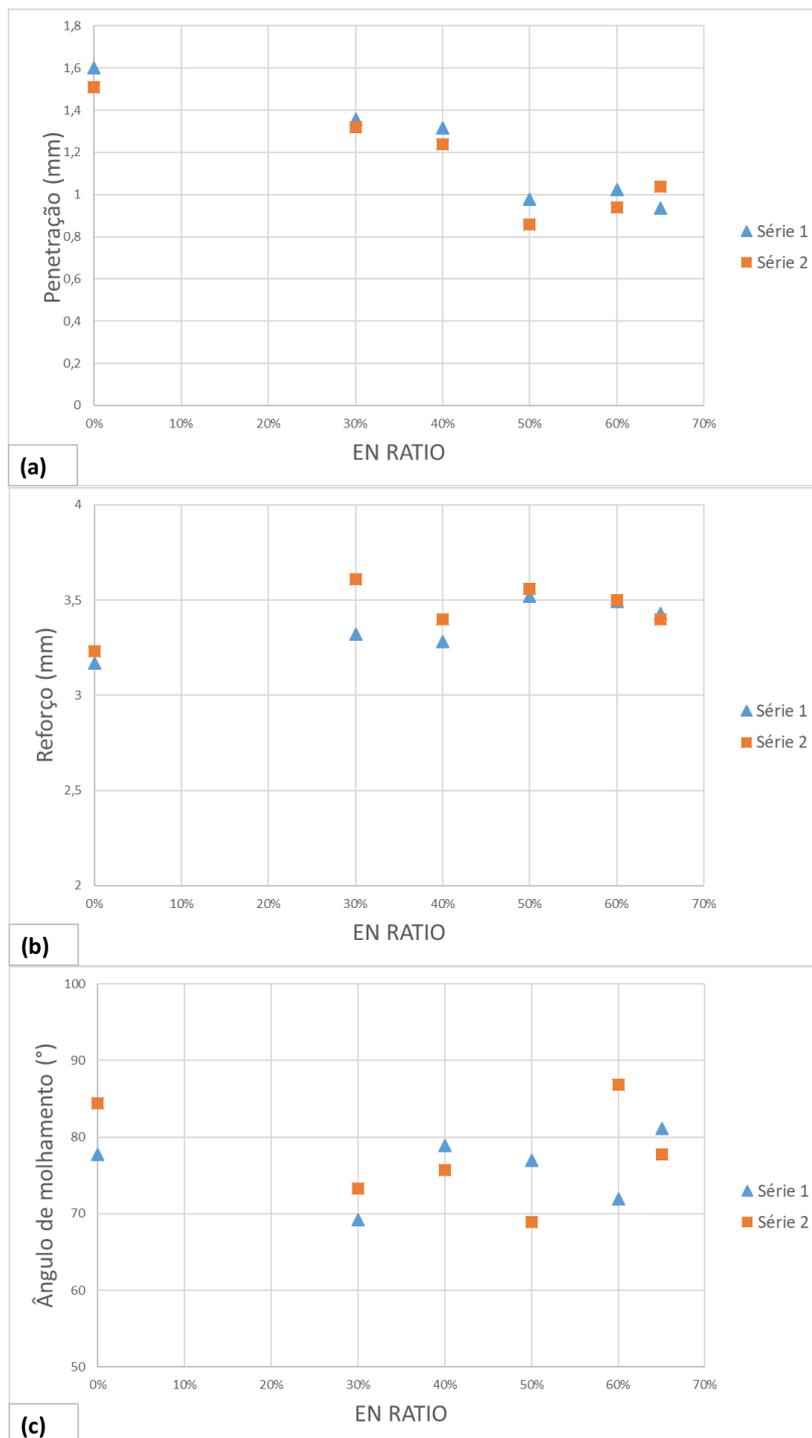
Figura 107 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Diferentes EN Ratios mas com velocidade de alimentação de alimentação constante (6,0 m/min).



A Figura 108.a apresenta as medições de penetração de solda para as duas séries de ensaios da Figura 107. Este resultado demonstra que para entre os percentuais de 0% e 50% de EN Ratio, a penetração diminui. No EN Ratio de 0% se tem uma penetração de solda de 1,6 mm para a série 1. Na EN Ratio de 50% tem-se uma penetração abaixo de 1 mm para a série 1 e próxima de 0,8 mm para a série 2. Este resultado está em concordância com a literatura publicada sobre este assunto até então. Entre as EN Ratios de 50% e 65% não há diferença apreciável nos valores de penetração de solda. Há na verdade, um aumento de penetração muito pequeno de 50% até 65% para a série de ensaios de número 2. A Figura 108.b apresenta o gráfico de *EN Ratio vs* altura de reforço para velocidade de arame constante. A análise deste gráfico não permite identificar uma tendência comum. Só é possível analisar por faixas de EN Ratio. Por exemplo, o menor reforço de fato ocorre para um EN Ratio de 0% (série 1) o que está de acordo com as características atribuídas ao processo pulsado CA. O maior reforço se deu na condição EN Ratio = 30% quando o esperado era que isto acontecesse no máximo de EN Ratio (65%). Há um aumento no reforço entre 40% e 50% que volta a diminuir de 50% até

65% o que novamente está em discordância com as características supostas para o processo pulsado CA.

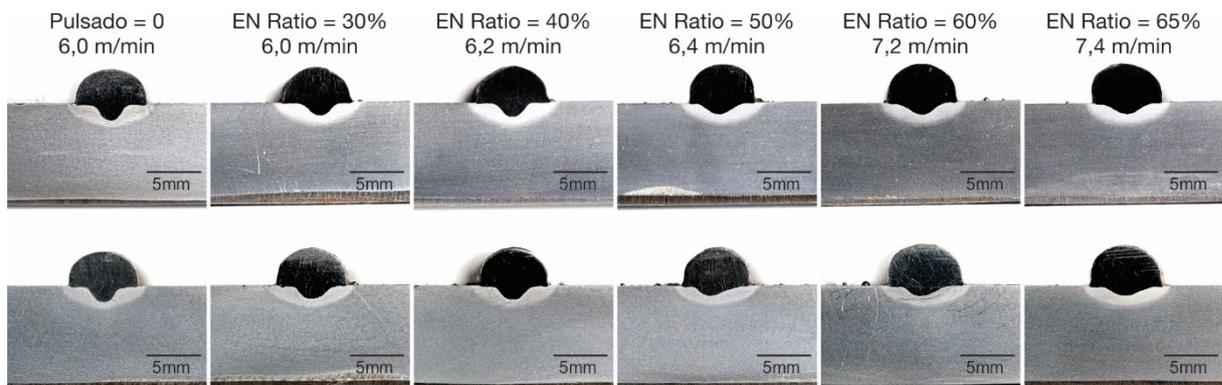
Figura 108 - Gráfico com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame constante).



A Figura 108.c relaciona EN Ratio com o ângulo de molhamento do cordão de solda. O ângulo de molhamento é um indicativo da convexidade do cordão de solda, valor que deveria aumentar conforme aumenta a porcentagem de polaridade positiva (EN Ratio). Entre 0% e 30% ocorre justamente o contrário. Na série 2, por exemplo, em 0% se tem um ângulo de molhamento de aproximadamente 85° que diminui para 72° em 30% de EN Ratio. Os demais ângulos assinalados no gráfico correspondentes aos EN Ratios de 40, 50, 60 e 65% não mostram tendência definida.

As macrografias da Figura 109 correspondem as macrografias da série 1 e 2 para os cordões realizados na etapa onde foi permitido que a fonte aumentasse automaticamente a velocidade de arame conforme se aumentava a ação da polaridade negativa EN Ratio. Novamente, exceto por alguns respingos sobre as superfícies adjacentes ao cordão de solda, não se observou nenhuma descontinuidade superficial ou interna.

Figura 109 - Macrografias para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Com velocidade de alimentação de arame variando com a EN Ratio.

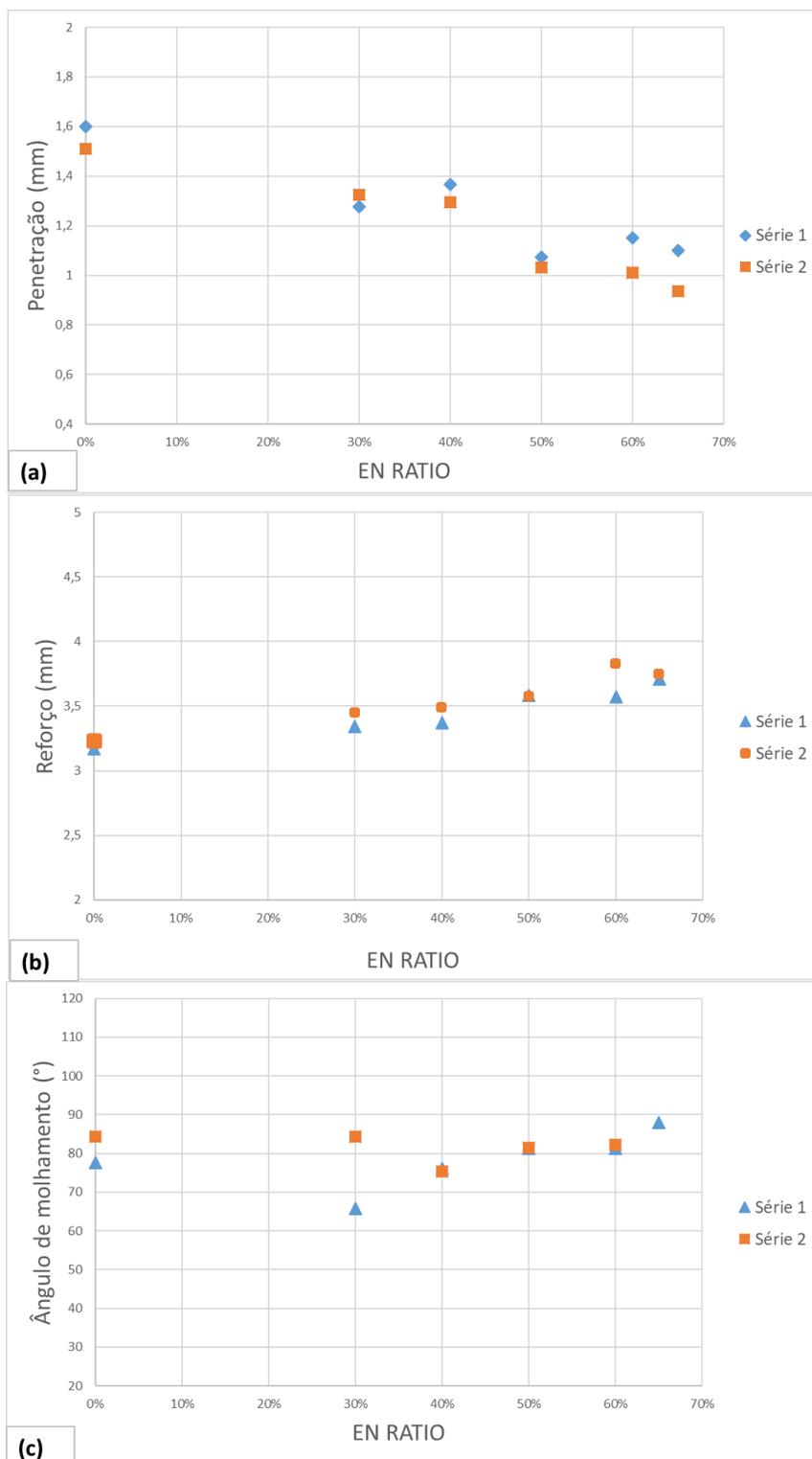


A Figura 110.a apresenta os resultados de penetração de solda para a etapa onde a velocidade de alimentação de arame aumenta conforme aumenta a EN Ratio. O gráfico apresenta resultados que se adequam melhor ao que se espera do processo MIG/MAG Pulsado CA. A série 2 por exemplo, demonstra que, à medida que a EN Ratio aumenta, diminui a penetração de solda. Em EN Ratio = 0% se tem uma penetração pouco acima de 1,5 mm, passando por 1,1 mm em 50% e chegando a aproximadamente 0,9 mm em 65%. O que pode

ter acontecido no caso da série 2 e mesmo na série 1, está no fato de que nestes ensaios foi permitido que a velocidade de alimentação de arame fosse mantida constante. Em 0% a velocidade de alimentação de arame é de 6,0 m/min enquanto em 65% esta foi de 7,4 m/min. O aumento gradual de material sendo depositado à medida que se aumentou a EN Ratio, pode ter servido como uma espécie de “escudo” ou mesmo aumentar a superfície de dissipação que de outra forma agiria de forma mais eficiente sobre a chapa. O resultado foi uma diminuição de penetração a medida que EN Ratio aumentava. Isto mostra que há uma diferença de resultados quando se leva em conta se a velocidade de alimentação de arame se manterá constante para todos os ensaios ou aumentará conforme aumenta EN Ratio (característica normal do sinérgico da OTC). Os trabalhos no contexto deste trabalho e analisados até então, não levaram em conta este fator.

O gráfico da Figura 110.b mostra uma tímida tendência ao aumento da altura do reforço à medida que a EN Ratio aumenta. Este resultado é, provavelmente, devido ao aumento de velocidade de alimentação de arame característico do sinérgico da fonte. Quanto ao ângulo de molhamento, o gráfico da Figura 110.c mostra maior dispersão, sendo que a tendência de aumento em função da EN Ratio é mais clara apenas para a série 1 a partir da EN Ratio de 30%.

Figura 110 - Gráfico com os resultados de (a) penetração de solda, (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento para os ensaios com a OTC DW-300 (ensaio sobre chapa e velocidade de alimentação de arame variável).



7.4 ANÁLISE TERMOGRÁFICA

Este item apresenta a análise termográfica das soldagens para velocidade de alimentação arame constante e variável conforme a porcentagem de *EN Ratio*. Lembrando que as filmagens termográficas foram realizadas em duas situações: com a câmera termográfica disposta acima da chapa, filmando a formação do cordão de solda durante a soldagem (Série 1) e com a câmera filmando o verso da chapa (Série 2).

Relata-se primeiramente a situação onde a velocidade de alimentação de arame foi mantida constante. A Tabela 26 apresenta valores médios e eficazes para corrente e tensão, e valores para velocidade de arame e potência. Notavelmente, tanto os valores de corrente média quanto eficaz diminuíram gradativamente a medida que *EN Ratio* aumentaram. A corrente média, por exemplo, passou de 118 A em 0% para 103 A em 65% de *EN Ratio*. No que tange os valores de tensão média e eficaz, estes se mantiveram praticamente constantes, com exceção dos valores de tensão para a *EN Ratio* de 0%. Isto é bom do ponto de vista experimental, pois o comprimento de arco teve pouca ou nenhuma relação com os resultados, pelo menos na faixa entre 30% e 65% de *EN Ratio*.

Tabela 26 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação constante e filmagem em cima da peça. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P).

<i>EN Ratio</i>	0%	30%	40%	50%	60%	65%
I_m (A)	118	113	113	110	106	103
I_{ef} (A)	184	180	177	174	170	168
U_m (V)	25,1	22,7	22,6	22,8	22,4	22,3
U_{ef} (V)	26,3	24,6	24,8	24,8	24,4	24,3
v_a(m/min)	6,2	6,3	6,2	6,2	6,3	6,2
P (W)	4067	3739	3761	3715	3552	3521

A Figura 111 mostra o gráfico de resfriamento para os valores de temperatura coletados com a câmera termográfica disposta acima da chapa. Fica claro neste gráfico que a situação onde a chapa levou mais tempo para resfriar foi quando a *EN Ratio* foi de 0%. Este resultado está dentro do esperado para o processo MIG/MAG Pulsado CA. A temperatura média para *EN Ratio* = 0% foi de 176,2°C e em *EN Ratio* = 65% foi de 165 °C no intervalo de tempo

considerado para o ensaio (150 s). Comparando as situações na faixa entre 30% e 65% de EN Ratio no gráfico, não se tem diferença significativa no comportamento das curvas de resfriamento, sendo a diferença realmente notável apenas entre o valor mínimo e máximo de EN Ratio.

No que concerne a filmagem no verso da chapa, a Tabela 27 apresenta valores médios e eficazes para corrente e tensão e os valores medidos para velocidade de alimentação de arame e potência. Neste ensaio a diferença entre as correntes médias foi de apenas 8 A, enquanto para correntes eficazes a diferença ficou em 11 A. De fato, estas diferenças são consideravelmente baixas levando em conta que o objeto de estudo é o MIG/MAG Pulsado CA, processo que envolve mudanças de polaridade, transferência metálica através do arco e instabilidades ocasionais decorrentes de curtos-circuitos. Novamente o valor de tensão foi mais alto quando o EN Ratio foi 0%, embora se tenha tentado manter o mesmo comprimento de arco para todos os ensaios. Entre os EN Ratios de 30% e 65%, a variação de tensão média foi de 1,2 V, praticamente irrelevante em se tratando de processo MIG/MAG.

Figura 111 - Resfriamento das soldagens sobre chapa com MIG/MAG Pulsado CA para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (OTC DW-300). Filmagem em cima da peça.

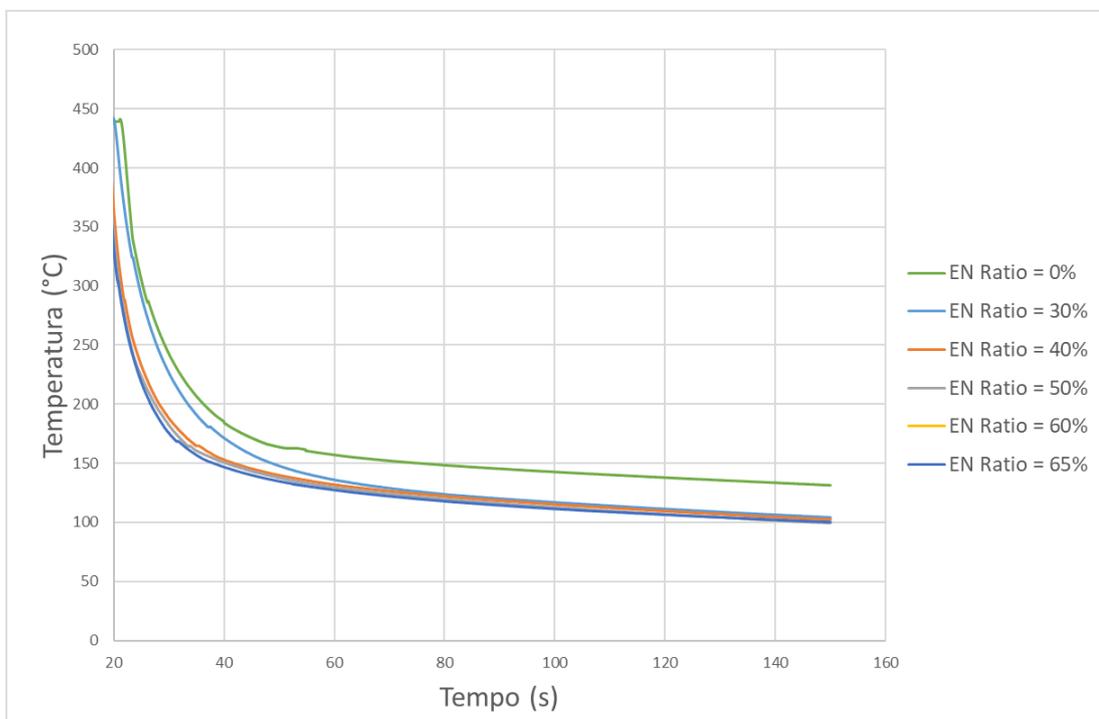
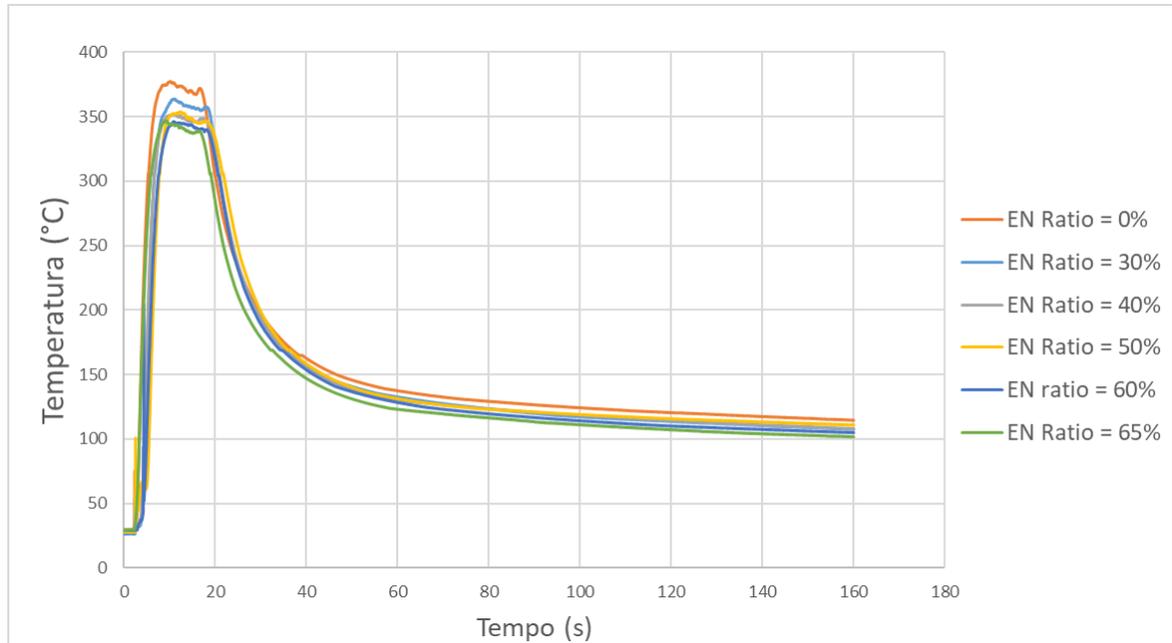


Tabela 27 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e Potência (P). Filmagem no verso da peça.

EN Ratio	0%	30%	40%	50%	60%	65%
I_m (A)	118	117	114	112	112	110
I_{ef} (A)	184	180	178	174	174	173
U_m (V)	25,1	22,9	23,1	23	22,8	21,9
U_{ef} (V)	26,3	24,7	24,8	24,7	24,7	23,6
v_a(m/min)	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3	6,3
P (W)	4067	3825	3807	3717	3580	3515

As curvas de resfriamento coletadas com a câmera disposta sob a chapa (Figura 112) mostram que o resfriamento mais lento ocorre para a condição de EN Ratio = 0%, com temperatura média de 158°C ao logo dos 160 segundos de ensaio. A segundo resfriamento mais lento ocorre para o EN Ratio de 30% com temperatura média de 150°C. A menor temperatura média ocorre para a EN Ratio de 65% com 142°C. Esses resultados estão dentro do esperado para o processo pulsado CA, embora se deva admitir que as curvas praticamente se sobrepõem na maior parte do tempo considerado para o ensaio.

Figura 112 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (IMC) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame constante (OTC DW-300). Filmagem no verso da peça.



A Tabela 28 traz os valores médios e eficazes para uma soldagem com a velocidade de arame variando conforme aumenta a EN Ratio. A diferença entre os maiores e menores valores de corrente, sejam médios ou eficazes, foram bastante baixas (5 A para valores médios e 7 A para valores eficazes). Novamente se tem os valores de tensão destoante apenas para a situação de EN Ratio = 0%. Entre os demais ensaios a diferença nos valores de tensão média e eficaz foi de 0,7 V em ambos os casos. As velocidades de alimentação de arame não foram constantes, começando em 6,0 m/min no EN Ratio = 0% chegando a 7,6 m/min em 65%. Isto foi proposital, seguindo a estratégia desenvolvida para este ensaio.

A Figura 113 traz o gráfico de temperatura vs tempo para filmagens realizadas em cima da chapa. Neste caso, os resultados foram contrários ao esperado para o MIG/MAG Pulsado CA, sendo que o resfriamento mais lento foi para a situação de maior EN Ratio (65%) com temperatura média de 200,3°C no intervalo de tempo considerado para o ensaio. As curvas de resfriamento correspondentes aos ensaios com os demais EN Ratios mostram grande sobreposição sendo que as temperaturas médias mensuradas tiveram valores bastante próximos: de 177,7°C para EN Ratio = 30%, 178,2°C para EN Ratio de 40%, 179,7°C para EN Ratio de

50% e 180,8°C para EN Ratio de 60%. Contrariando as expectativas, a temperatura média mais baixa (176,2°C) e o resfriamento mais rápido foi para a EN Ratio de 0%.

Tabela 28 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação variável conforme a EN Ratio. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P). Filmagem em cima da peça.

EN Ratio	0%	30%	40%	50%	60%	65%
I_m (A)	120	115	116	115	117	120
I_{ef} (A)	181	179	180	178	182	185
U_m (V)	25,2	22,7	22,8	23,3	23,4	22,9
U_{ef} (V)	25,9	24,8	24,8	25,2	25,5	24,9
v_a(m/min)	6,2	6,3	6,3	6,5	7,3	7,6
P (W)	4058	3809	3851	3882	4042	3992

A Tabela 29 apresenta os valores médios e eficazes para uma soldagem com velocidade de arame aumentando conforme a EN Ratio. Nesta série de ensaios a câmera foi instalada sob a chapa de teste. Semelhante ao que aconteceu no ensaio anterior, não há uma variação apreciável para os valores de corrente e tensão à medida que EN Ratio aumenta. A exceção, se é que é possível considera-la assim, fica novamente para a EN Ratio de 0% e, mesmo assim, a diferença entre o valor de tensão média correspondente a esta situação (25,2 V) e o menor valor registrado (23,4 V) é de apenas 1,8 V. Para todos os efeitos, se considerou este valor como destoante neste caso.

Figura 113 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (IMC) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variável (OTC DW-300). Filmagem em cima da peça.

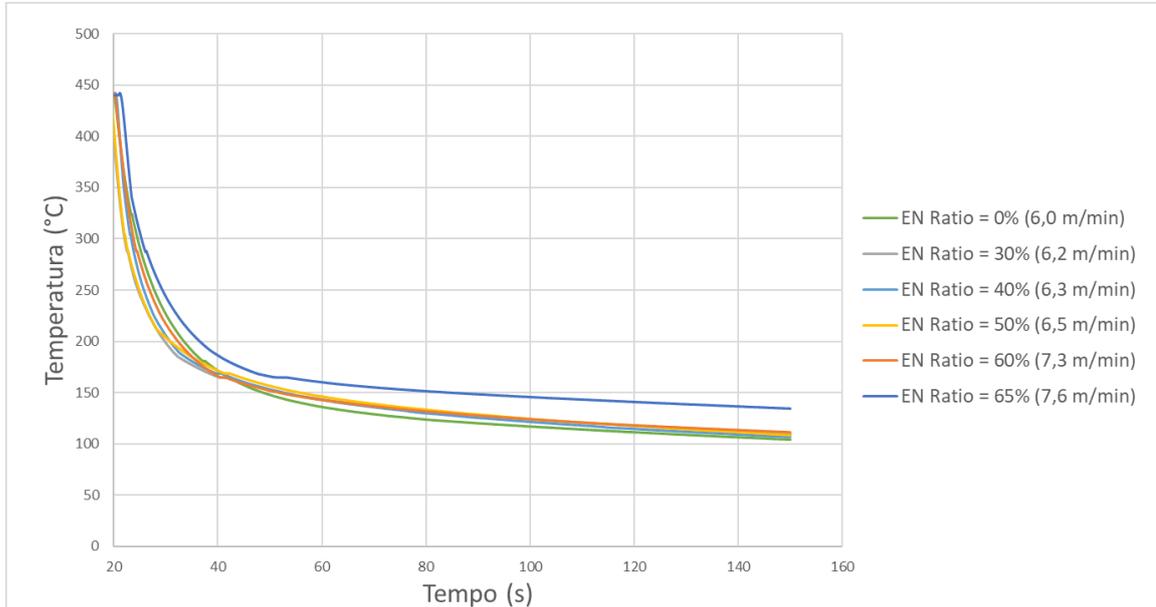


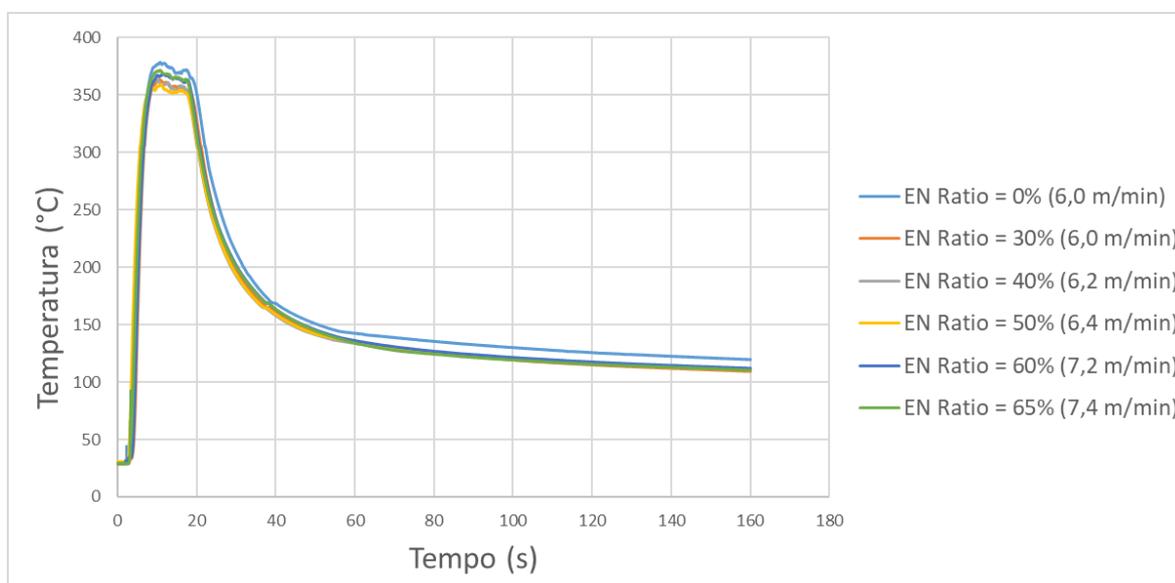
Tabela 29 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA (OTC DW-300). Velocidade de alimentação variável conforme a EN Ratio. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P). Filmagem no verso da peça.

<i>EN Ratio</i>	0%	30%	40%	50%	60%	65%
I_m (A)	120	115	116	113	121	119
I_{ef} (A)	181	178	178	175	184	182
U_m (V)	25,2	23,4	23,5	24,2	23,7	23,8
U_{ef} (V)	25,9	25,8	25,8	25,8	25,5	25,7
v_a(m/min)	6,2	6,3	6,3	6,3	6,4	7,3
P (W)	4058	3836	3886	3884	4108	4075

O gráfico da Figura 114 corresponde as curvas de resfriamento para os ensaios com a câmera termográfica sob a chapa. A maior temperatura média foi para a condição de EN Ratio = 0% (162,8 °C). Deve-se admitir novamente que há grande sobreposição das curvas para todas

a condições ensaiadas sendo as temperaturas médias de 151,8°C (30%), 153,3°C (40%), 153,2°C (50%), 154,3°C (60%) e 153,8°C (65%). Isto é um indício de que quando se regula apenas a *EN Ratio* sem maior preocupação em restabelecer o valor original de velocidade de alimentação de arame, deixando que o sistema sinérgico da fonte OTC faça os ajustes normalmente programados, não há uma grande diferença no que concerne a imposição de calor sobre a chapa para as EN Ratios entre 30% e 65%.

Figura 114 - Resfriamento das soldagens sobre chapa sobrepostas com MIG/MAG Pulsado CA (IMC) para diferentes EN Ratios e velocidade de alimentação de arame variável.



7.5 COMPARAÇÃO ENTRE SOLDAGENS COM FORMA DE ONDA SEM PULSO NO NEGATIVO E FORMA DE ONDA COM PULSO NEGATIVO

A proposta da análise descrita neste item, é fazer uma comparação dos cordões de solda resultantes de soldagens com a fonte OTC DW-300 e a fonte IMC Digiplus A7. A primeira fonte emprega um sistema sinérgico com uma base negativa e um pulso negativo, conforme comentado no item 4.4.2. A segunda, permite a regulagem de parâmetros de soldagem manualmente, porém a forma de onda não possui pulso negativo. Mesmo com as diferenças, foi possível realizar cordões de soldas em condições suficientemente próximas para fins de comparação.

A Tabela 30 refere-se a soldagens realizadas com a fonte IMC Digiplus A7 e mostra os resultados das aquisições de dados realizadas via SAP para corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P). Foram realizados dois cordões de solda para cada valor de EN Ratio (30%, 50%, 60%). Verifica-se que não há uma grande variação nos valores de tensão, corrente e potência a medida que o EN Ratio aumenta. Mesmo nos valores de corrente eficaz a variação foi de 14 A; 163 A para um EN Ratio de 30% até 149 A para uma EN Ratio de 60%. A variação de corrente média foi de apenas 3 A, praticamente desprezível. A maior potência foi 3,6 kW em 30% e 3,4 kW para 60%.

Tabela 30 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA sem pulso negativo (IMC Digitplus A7). Velocidade de alimentação constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P).

EN Ratio	30% (1)	30% (2)	50% (1)	50% (2)	60% (1)	60% (2)
I_m (A)	119	117	119	119	120	119
I_{ef} (A)	161	161	153	153	149	149
U_m (V)	24,1	24,4	24,9	24,8	24,9	25,3
U_{ef} (V)	25,2	25,5	26,1	26	26	26,6
v_a(m/min)	6	6	6	6	6	6
P (W)	3574	3606	3495	3457	3405	3431

A mesma análise é realizada a seguir para os valores apresentados na Tabela 31 para as soldagens realizadas com a fonte OTC DW-300. Neste caso a variação de corrente média é um pouco maior: 114 A com EN Ratio de 30% e até 100 A em 60%. A variação de corrente eficaz foi menor ficando em 11 A. Como a velocidade de alimentação de arame foi a mesma (6,0 m/min) e se procurou manter um comprimento de arco constante, é provável que o pulso negativo permita que se mantenha uma taxa de fusão que demandaria maior corrente quando do uso de uma forma de onda que não use esta abordagem (como no caso da IMC Digiplus A7). Sendo a corrente um fator determinante para as características geométricas do cordão de solda, isto pode ser benéfico na soldagem de chapas de menor espessura. Vale ressaltar que a diferença é de 20 A entre a maior corrente obtida nas soldagens correspondentes a Tabela 30 (sem pulso

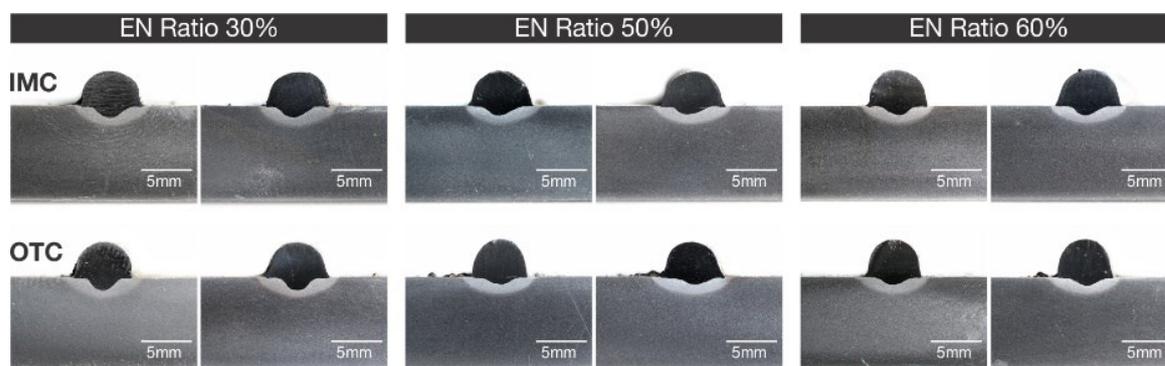
negativo) e a menor corrente apresentada na Tabela 31 (com pulso negativo). Ou seja, de relevância menor em muitas situações, mas que eventualmente pode fazer diferença na soldagem de chapas de menor espessura, passes de raiz, soldagens fora de posição ou mesmo soldagens de reparo em tubulações, por exemplo. Dito isto então, as figuras seguintes mostram análises macrográficas das situações apresentadas até aqui.

Tabela 31 - Valores Médios e Eficazes para MIG/MAG Pulsado CA com pulso negativo (OTC DW-300). Velocidade de alimentação constante. Corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), velocidade de alimentação de arame (v_a) e potência (P).

EN Ratio	30% (1)	30% (2)	50% (1)	50% (2)	60% (1)	60% (2)
I_m (A)	114	113	107	109	100	102
I_{ef} (A)	178	177	171	173	165	167
U_m (V)	22,9	23,1	23,2	22,9	22,7	22,7
U_{ef} (V)	24,8	24,9	25	24,6	24,6	24,5
v_a(m/min)	6	6	6	6	6	6
P (W)	3713	3704	3612	3587	3410	3457

A seguir se tem a comparação entre os cordões de solda resultantes das soldagens realizadas com as duas fontes. A Figura 115 mostra os resultados de duas séries de ensaios com a fonte IMC Digiplus A7 e fonte OTC DW-300. Em nenhum dos casos foi detectado algum tipo de descontinuidade, tanto internamente quanto superficialmente. Há sim, algumas diferenças nas características geométricas dos cordões de solda. Isto é abordado nas figuras seguintes.

Figura 115 - Macrografias referentes aos ensaios comparativos realizados com as fontes IMC (Digiplus A7) OTC (DW-300).

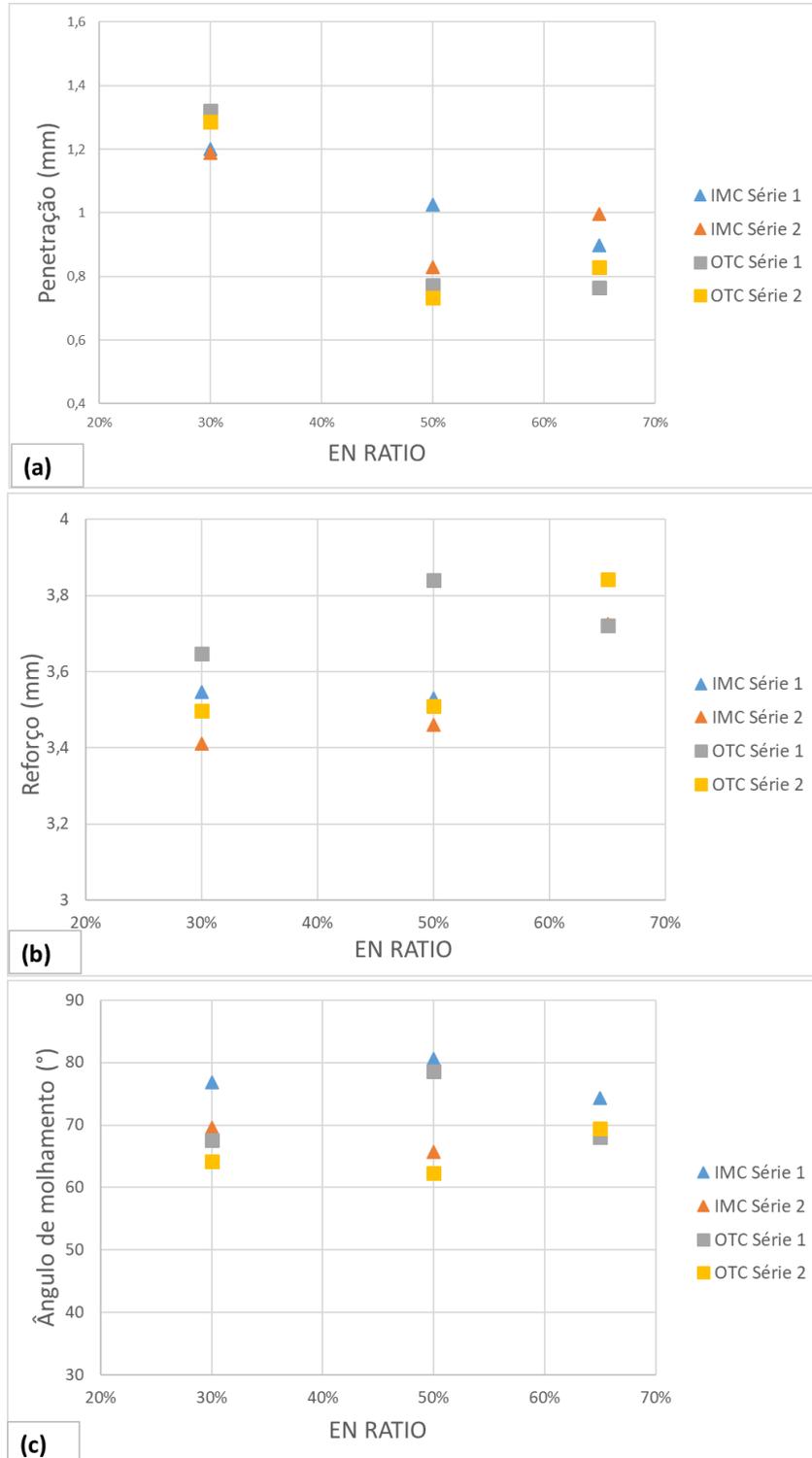


A Figura 116.a mostra o gráfico EN Ratio vs Penetração de solda tanto para a fonte da IMC (sem pulso negativo) quanto para o OTC (com pulso negativo). Comparando os cordões realizados com EN Ratio de 30% com os realizados em 50%, os resultados de ambas as fontes mostram que de fato ocorre uma diminuição de penetração a medida que a atuação da polaridade negativa aumenta. A maior penetração obtida foi de 1,3 mm (com pulso negativo, EN Ratio = 30%) e a menor foi de 0,7 (sem pulso negativo, EN Ratio = 50%). Este resultado corrobora o que é dito convencionalmente sobre o processo MIG/MAG Pulsado CA neste aspecto. Já quando se compara os cordões realizados com EN Ratio de 50% com os realizados em 60%, têm-se alguns casos onde há um aumento de penetração. Por exemplo, o cordão realizado com a IMC (série 2, conforme a legenda do gráfico), em 50% se tem uma penetração pouco acima de 0,8 mm. Com a mesma fonte, em 60% se tem uma penetração de 1,0 mm. Esperava-se neste caso uma pequena diminuição de penetração (como de fato ocorre para o cordão de solda realizado como a IMC Série 1). No entanto, há um pequeno aumento que, de fato, deve ser irrelevante na prática de soldagem exceto em situações “limite”. Estes resultados levam a crer que a melhor situação quando se quer uma penetração menor, sem a que se diminua a taxa de fusão, é quando o EN Ratio está em 50% com ou sem pulso negativo. Outro ponto a ser destacado, está no fato de que, embora a fonte da OTC incorpore um pulso negativo no seu formato de onda, nas EN Ratios de 50% e 60% a maior penetração foi para a fonte da IMC cujo formato de onda não incorpora o pulso negativo. Este resultado contraria as afirmações de Kim e Chung (2006).

Uma funcionalidade para o pulso negativo, que pode ser considerada de caráter mais prático, está na questão da inversão de polaridade. Com EN Ratios de 30% e 50% a soldagem com a fonte IMC (forma de onda sem pulso no negativo) transcorre de maneira satisfatoriamente estável, ou seja, não ocorreram extinções de arco durante os ensaios ou mesmo durante testes preliminares com os parâmetros já definidos. Já para um EN Ratio de 60%, ocorreram extinções de arco com certa frequência o que dificultou a realização dos ensaios nesta condição. Por exemplo, esta limitação não permitiu que se empregasse um EN Ratio de 70%, o que seria mais interessante do ponto de vista experimental. Com a fonte OTC (forma de onda com pulso) não ocorreram extinções de arco nem durante os ensaios ou durante os ensaios preliminares. Este fato endossa as afirmações de Jaskulski (2009) que alega que o pulso negativo facilita o emprego de porcentagens maiores de EN Ratio.

Outra questão que vem à tona está no fato de que, para a mesma fonte OTC, a forma de onda para MIG/MAG pulsado CA do alumínio não possui pulso na polaridade negativa, apenas base negativa delimitada por (I_{nb} e t_{nb}). Isso pode estar relacionado a camada de óxidos na superfície do alumínio (alumina) que pode facilitar a emissão de elétrons tanto na polaridade positiva (a peça de trabalho é o catodo) quanto na polaridade negativa (o eletrodo é o catodo). Contudo seria prematuro atribuir peremptoriamente a estabilidade de arco na OTC DW-300 somente ao pulso negativo. Podem existir artifícios eletrônicos cuja ação nem sempre é detectável na aquisição dos valores de corrente e tensão.

Figura 116 - Resultados de (a) penetração de solda; (b) altura de reforço e (c) ângulo de molhamento. Comparação “com pulso negativo” vs “sem pulso negativo”.



O gráfico da Figura 116.b mostra a relação entre EN Ratio e a altura do reforço do cordão de solda. Neste caso é possível identificar que os reforços são mais altos no *EN Ratio* de 60% na a maioria das situações. A única exceção está no cordão soldado com a fonte OTC na série 1 com EN Ratio de 50% que tem altura de reforço pouco acima de 3,8 mm.

A Figura 116.c apresenta a relação entre EN Ratio e ângulo de molhamento. O ângulo de molhamento é um indicativo da convexidade de um cordão de solda. Neste caso, não há uma tendência clara e não é possível afirmar muito com alguma margem de segurança. O cordão de solda mais convexo corresponde a condição EN Ratio = 50% na fonte IMC (forma de onda sem pulso negativo).

8 CONCLUSÕES

Antes de partir diretamente para as conclusões separadas por capítulo (4, 5, 6 e 7), cabe novamente alertar que o objetivo deste trabalho não foi analisar o desempenho de fontes de soldagem e sim conceitos trazidos principalmente por fabricantes estrangeiros. Os resultados obtidos e relatados no decorrer do texto e neste capítulo são para as condições experimentais e situações empregadas neste trabalho.

Referente ao capítulo 4:

- No que concerne os ensaios que avaliaram a funcionalidade dos sistemas *Wave Control* (Lincoln) e *Arc Control* (OTC) para o processo MIG/MAG Pulsado, com base nas imagens e demais dados coletados é possível concluir que ambos falham na proposta de tornar o arco mais constricto ou rígido como afirmam as fabricantes. No sistema Lincoln *Wave Control* essa afirmação é mais evidente, pois o aumento do comprimento de arco que ocorre à medida que se aumenta a frequência de pulso elimina sua funcionalidade. O emprego do *Wave Control* provavelmente seria de pouca ou nenhuma utilidade em situações onde, de fato, um arco mais constricto viria a calhar, como na soldagem de um passe de raiz por exemplo.
- No caso do OTC *Arc Control*, se identificou um melhor controle do comprimento de arco, ou seja, o sistema faz alterações no tempo de base e corrente de base de modo que a frequência de pulso é alterada, mas não a corrente média, o que evita alguns problemas. Contudo, não é possível afirmar que o arco fica mais constricto ou rígido conforme se aumenta o valor do controle como a fabricante alega. Ou então esta mudança no formato do arco é tão sutil que não pode ser detectada com as filmagens realizadas neste trabalho.

Referente ao capítulo 5:

- Os ensaios seguintes foram conduzidos para analisar as formas de onda de corrente (denominadas como avançadas) apresentadas por três fabricantes renomadas em comparação com uma forma de onda retangular básica. Os ensaios empregaram um arame de aço ao carbono largamente utilizado na indústria. Os resultados mostraram que as fabricantes têm considerado o destacamento de gota na base, considerado por

publicações científicas como mais “suave” em comparação com o destacamento no pulso.

- A fabricante OTC e Lincoln (forma de onda “*Crisp*”) utilizam uma abordagem que gera o destacamento e “múltiplas gotas por pulso” (MGPP) sem maiores consequências negativas no que diz respeito a estabilidade do processo ou geração de respingos.
- A aparência superficial dos cordões de solda foi avaliada e não foram identificadas irregularidades no cordão ou mesmo respingos na superfície da peça soldada. Este resultado aconteceu tanto para formas de onda que utilizam a abordagem “uma gota por peça” (UGPP) quanto MGPP. Todavia, é preciso ressaltar que os cordões de solda foram realizados sobre chapa, situação bastante favorável neste caso.
- As macrografias analisadas também não mostraram descontinuidades e as diferenças entre as características geométricas mensuradas foram bastante pequenas.

Referente ao capítulo 6:

- Quanto ao MIG/MAG Pulsado CA aplicado ao alumínio, os ensaios focaram na soldagem de juntas sobrepostas formadas por chapas de 1 mm e na questão da *gap bridge ability*. Constatou-se que o êxito da soldagem é bastante dependente do posicionamento correto da tocha de soldagem independentemente do emprego de processo pulsado CC ou CA. Mesmo pequenos erros no posicionamento da tocha causaram desde má formação do cordão de solda, passando por mordeduras na chapa superior da junta até perfuração da chapa inferior.
- Não há melhoria perceptível na capacidade de preenchimento quando do emprego do processo CA, porém este se mostrou mais adequado para este tipo de aplicação pois o risco de perfuração diminuiu durante os ensaios, além das marcas no verso da peça serem consideravelmente menos acentuadas quando do uso de CA. Estes resultados sugerem que, se bem explorado e com um procedimento de soldagem adequado, o processo CA pode ser utilizado com êxito na soldagem de juntas sobrepostas de alumínio.
- As filmagens termográficas, de modo geral, mostram que a imposição de calor sobre a peça diminui à medida que se emprega uma EN Ratio maior, embora esta diminuição seja pequena.
- Realizou-se soldagem sobre chapa com o objetivo de avaliar o efeito da polaridade negativa nas características geométricas do cordão de solda além de avaliar se aumento

no diâmetro de gota poderia ser relevante na suposta capacidade aprimorada de preenchimento de juntas do processo CA. Quanto a este último, não parece ser relevante o aumento de diâmetro de gota a ponto de fazer diferença no preenchimento de junta.

- Quanto ao efeito da polaridade negativa sobre os cordões de solda, os resultados demonstraram concordância com as afirmações contidas na maioria dos artigos científicos. Ou seja, a medida que se aumenta a EN Ratio, diminui a penetração de solda e aumentam a altura do reforço e o ângulo de molhabilidade. Outro resultado que endossa afirmações contidas na literatura é de que, a partir de um EN Ratio de 30%, não há efeitos apreciáveis sobre a geometria do cordão de solda. Quanto a taxa de fusão, com um EN Ratio de 30%, a velocidade de alimentação de arame, sugerida pelo sistema sinérgico da OTC, foi de 4,6 cm/min e com um EN Ratio de 50% esta foi de 5,3 m/min. Nas condições do ensaio, houve um aumento da taxa de fusão de 13%, um aumento até razoável considerando que os efeitos da polaridade negativa no alumínio são considerados bastante baixos após 30% de EN Ratio.

Referente ao capítulo 7:

- Finalmente, se tem a avaliação da soldagem MIG/MAG Pulsado CA com arame de aço inoxidável. O sinérgico da fonte OTC DW-300 apresenta um pulso na corrente negativa que tem como vantagem funcional permitir o uso de EN Ratios acima de 50% com estabilidade de arco satisfatória (risco mínimo de extinção de arco). Considerando os resultados derivados destes ensaios, outras pretensas funções para o pulso negativo, como aumento da taxa de fusão e controle de penetração na soldagem de aços, mostraram-se pouco funcionais.
- A taxa de fusão aumenta de 6,0 m/min na EN Ratio de 30% para 6,4 m/min em 50%, um aumento de apenas 6%, menos da metade do que se conseguiu para a mesma faixa na soldagem pulsado CA do alumínio.
- Embora as correntes de pulso negativo sejam consideravelmente altas, não há transferência metálica durante esse período, fato confirmado na análise das filmagens de alta velocidade.

- Quanto a penetração de solda, cordões de solda soldados com uma fonte IMC Digiplus A7 (sem pulso negativo) tiveram maior penetração de solda do que os cordões de solda realizados com a OTC DW-300 (com pulso negativo).
- Quanto ao efeito da polaridade negativa sobre as características geométricas do cordão de solda, a diminuição de penetração é mais evidente quando se permite que o sinérgico da fonte DW-300 ajuste a velocidade de alimentação de arame conforme o aumento de EN Ratio. A maior deposição de material pode ter servido como um “escudo” evitando que uma parcela do calor gerado pelo arco chegasse a poça de fusão além de aumentar a dissipação de calor. Na análise termográfica, novamente se tem uma tendência geral a diminuição de imposição de calor a medida que a EN Ratio aumenta. Mas é preciso fazer a ressalva de que alguns resultados foram um pouco diferentes do esperado.

9 TRABALHOS FUTUROS

- Em todos os ensaios com resultados descritos neste trabalho, apenas questões relativas ao processo de soldagem MIG/MAG Pulsado foram objeto de estudo. Questões ligadas a metalurgia de soldagem não foram abordadas por não fazerem parte do escopo do trabalho e tornariam os capítulos muito longos e, por conseguinte, o trabalho como um todo. Acredita-se que a abordagem de aspectos metalúrgicos pode não só completar esse trabalho, mas também avaliar seus resultados por um ponto de vista completamente novo. Como exemplos de aspectos relacionados a metalurgia cita-se: uma avaliação da presença de porosidades nos cordões de solda no alumínio, perda de elementos de ligas vaporizados durante a transferência metálica e consequências no cordão de solda, ensaios de tração em juntas sobrepostas para o alumínio (abordando a questão da *gap bridge ability* de um novo ponto de vista) e avaliação das consequências da utilização de MGPP para o aço carbono aumentando a área de absorção de gases.
- Observou-se nas filmagens de alta velocidade, o fenômeno do *stick-slip* durante as soldagens com MIG/MAG Pulsado, questão que também poderia ser avaliada como parte de um trabalho futuro.
- O desenvolvimento de uma metodologia para parametrização do processo pulsado baseada no EN Ratio também pode ser um trabalho interessante já que a fonte da OTC DW-300 emprega esta abordagem em seu sistema sinérgico.
- Para um estudo mais aprofundado do processo MIG/MAG Pulsado é interessante se considerar tanto o calor contido na gota e aquela desenvolvida na peça. Um estudo mais aprofundado nestas questões também completaria este trabalho e traria à tona mais resultados para serem comparados com a literatura técnica atual sobre o processo pulsado.
- É recomendável uma avaliação de desempenho das formas de onda que utilizam a abordagem MGPP para o MIG/MAG Pulsado, aplicando estas a juntas de aço ao carbono soldadas em condições mais próximas da realidade (soldagem de passes de raiz, soldagens fora de posição, preenchimento de juntas etc.).

10 REFERÊNCIAS

AIRGAS. **Lincoln Electric® Power Wave® 455M**. 2020. Disponível em: <https://www.airgas.com/product/Welding-Products/Welders-%26-Accessories/Multi-Process-Welders/p/LINK2375-1>. Acesso em: 10 jan. 2020.

ALBERTAZZI, Armando; PINTO, Tiago. **Sistemas Ópticos**. Florianópolis: UFSC, 2017. 104 slides, color. Apresentação para a disciplina Fundamentos de Visão Computacional.

ALBERTAZZI, Armando; PINTO, Tiago. **Sistemas Ópticos**. Florianópolis: UFSC, 2017. 104 slides, color. Apresentação para a disciplina Fundamentos de Visão Computacional.

AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding (M. Amin). **Metal Construction**, [s.i.], p.272-278, 1983.

AMIN, M. Synergic pulse MIG Welding. **Metal Construction**, [s.i.], v. 13, n. 6, p.349-353, 1983.

ANG, Tom. **Fundamentals of Photography**. Londres: Octopus Publishing Group Ltd, 2016. 352 p. Revisado e Atualizado por: Vincent Burgeon.

ARCLINE PP. TIG quality at MIG productivity in aluminium welding. [s.i]: Linde, 2017. 12 p. Disponível em: https://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/welding_safety_products/arcline_pp/index.html. Acesso em: 04 jan. 2020.

ARIF, Nabeel; CHUNG, Hyun. Alternating current-gas metal arc welding for application to thick plates. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 222, p.75-83, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.041>.

ARIF, Nabeel; CHUNG, Hyun. Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 214, n. 9, p.1828-1837, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.034>.

ASM Handbook: Corrosion. [s.i]: American Society for Metals, 1992. Vol. 1.

ASM Handbook: Welding Brazing and Soldering. [s.i]: American Society for Metals, 1993. Vol. 6.

ASM Handbook: Properties and Selection: Irons Steels and High Performance. [s.i]: American Society for Metals, 1993.

ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. [s.i]: American Society for Metals, 1990. Vol. 2.

AWS. Welding Handbook: Welding Processes. American Welding Society, 1991. Vol. 2, 955 p.

BERNARDI, Rafael Albino. **Investigações de ordem operacional e implementação de tecnologias para soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos**. 2018. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

BRUCKNER, Jergen. Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to Aluminum. **Welding Journal**, Miami, v. 84, n. 6, p.38-40, 2005. Disponível em: <<https://app.aws.org/wj/2005/06/038/>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC: Controle da Qualidade Total no Estilo Japonês**. 9. ed. Nova Lima: Editora Falconi, 2014. 286 p.

CAO, R. et al. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 213, n. 10, p.1753-1763, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.004>.

CIDRAL, Beline. **O que preciso saber na hora de comprar uma câmera digital?** 2011. Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2010/12/o-que-preciso-saber-na-hora-de-comprar-uma-camera>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

CIRINO, Luciano Machado. **Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CIRINO, Luciano Machado; DUTRA, Jair Carlos. A influência do tempo de atuação da polaridade positiva na soldagem TIG CA do alumínio. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 14, p.131-139, fev. 2009.

DUTRA, J. C. **Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG**. 1989. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

DUTRA, J. Carlos; CIRINO, L. Machado; SILVA, R. Henrique Gonçalves e. AC-GTAW of aluminium – new perspective for evaluation of role of positive polarity time. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [s.l.], v. 15, n. 7, p.632-637, out. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/136217110x12813393169570>.

DUTRA, J.C.; OLLÉ, L. F.; KIRST, E. R. Uma Contribuição ao Estudo da Seleção de Variáveis na Soldagem MIG/MAG Pulsada. **Anais do Congresso Regional Latino-Americano de soldagem**, v. 2, p. 925-942, Rio de Janeiro. ABS, 1992.

DUTRA, Jair Carlos et al. A new approach for MIG/MAG cladding with Inconel 625. **Welding In The World**, [s.l.], v. 60, n. 6, p.1201-1209, 26 jul. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-016-0371-3>.

DUTRA, Jair Carlos et al. New methodology for AC-pulsed GMAW parameterization applied to aluminum shipbuilding. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.99-107, 3 abr. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-015-0351-3>.

DUTRA, Jair Carlos; MARQUES, Cleber; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e. Consonâncias e dissonâncias interpretativas no inter-relacionamento das variáveis da corrente pulsada.

Soldagem & Inspeção, [s.l.], v. 17, n. 3, p.201-209, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242012000300004>.

DUTRA, Jair Carlos; MARQUES, Cleber; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e. Consonâncias e dissonâncias interpretativas no inter-relacionamento das variáveis da corrente pulsada. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 17, n. 3, p.201-209, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242012000300004>.

DUTRA, Jair Carlos; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; MARQUES, Cleber. Características de fusão e potência de soldagem com a transferência MIG - CMT versus MIG convencional. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.12-18, mar. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242013000100003>.

DUTRA, Jair Carlos; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; MARQUES, Cleber. **Melting and welding power characteristics of MIG–CMT versus conventional MIG for aluminium 5183**. Taylor & Francis Online. Welding International, Out. 2014.

ESAB. **OK Autrod 309LSi: especificações e downloads**. Especificações e Downloads. 2020. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-309lsi.cfm>. Acesso em: 10 jan. 2020.

ESAB. **OK Autrod 5183: especificações e downloads**. Especificações e Downloads. 2020. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/aluminium-wires/ok-autrod-5183.cfm>. Acesso em: 10 jan. 2020.

ESSERS, W. G.; VAN GOMPEL, M. R. M.. Arc control with Pulsed GMAW Welding. **Welding Journal**, Miami, v. 6, p.26-32, jun. 1984.

ESSERS, W.G.; WALTER, R. Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding. **Welding Journal**, v. 60, n. 2, p. 37s-42s, fev. 1981.
Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

FLIR (Ed.). **FLIR SC7000 LWIR Series: Infrared Cameras for Research & Science**. [s.i.], 2012. 2 p.

FLIR. **The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals**: The ultimate resource guide for using infrared in the research and development industry. Boston: Flir, 2015. Disponível em: <for R&D Professionals>. Acesso em: 17 abr. 2017.

FOLTS, James A.; LOWELL, Ronald P.; ZWAHLEN JUNIOR, Fred C. **Manual de Fotografia**. São Paulo: Cengage Learning Edições Ltda, 2011. 412 p. Revisão Técnica: Denise Camargo.

FRONIUS (Ed.). **CMT: Cold Metal Transfer**: Processo de solda MIG / MAG com arco voltaico em curto circuito. 2017. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.>. Acesso em: 01 maio 2017.

FRONIUS. **CMT ADVANCED**. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/competencias/processos-de-soldagem/cmt-advanced>. Acesso em: 10 jan. 2020.

FUERSCHBACH, P.W. Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum. **Welding Journal**, v. 77, n. 07, p. 76s-85s, fev. 1998.

GHOSH, P. K.; AGARWAL, Banshi Prasad; KULKARNI, Shrirang G.. High deposition pulsed current GMAW can change current scenario of thick wall pipe welding. In: ASME 2009 PRESSURE VESSELS AND PIPING DIVISION CONFERENCE, 2009., 2009, Prague. **Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference**. Prague: Pvp2009, 2009. p. 1 - 6.

GUGELMIN, Felipe. **Supercâmeras: imagens além da visão humana**. 2010. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/video/6863-supercameras-imagens-alem-da-visao-humana.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamental of Physics**. 9. ed. Hoboken, Nj: Wiley, 2010. 1136 p.

HARWIG, D. D. **Arc Behavior and Metal Transfer in VP-GMAW Process**. 2003. 153 f. PhD Dissertation, Cranfield University – School of Industrial and Manufacturing Science.

HECHT, Eugene. **Optics**: Global Edition. 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2017. 722 p.

HECHT, Eugene. **Ótica**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2002. 790 p. Tradução de: José Manuel N. V. Rebordão.

HEMA. **Câmera ICAM-HD4**. Apresenta Especificações Básicas Sobre o Equipamento. Disponível em <http://www.hema.de/fileadmin/upload/pdf/seelector_ICAM_HD4_en0913.pdf>. Acesso em 15 de dez. 2015.

IDT. **Câmera Y4-S2**. Especificações Básicas Sobre o Equipamento. Disponível em <<http://www.crijolanta.com.pl/produkty/idt/y4-s2.pdf>>. Acesso em 17 de dez. 2015.

IDT. **Specification Sheet: Y Model 4-S2**. 2013. Especificações Básicas Sobre o Equipamento. Disponível em: <<http://www.crijolanta.com.pl/produkty/idt/y4-s2.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

IDT. **Y Series Cameras: Y Models**. 2017. Disponível em: <<https://idtvision.com/products/cameras/y-series-cameras/>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

IMC. **Digiplus A7: manual de instruções**. Manual de Instruções. 2020. Disponível em: https://www.imc-soldagem.com.br/media/com_eshop/attachments/manual_Digiplus%20ACPO_8aEd.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

ITC. **Termografia Nível 1**: Manual do Curso. Sorocaba: Infrared Training Center, 2013. Rev 1.1.

JAESCHKE, Birger. SpeedPulse – eine produktivitäts- und effizienzsteigernde Weiterentwicklung des MSG-Impulsschweißens. **Schwissen Und Schneiden**, Düsseldorf, v. 61, n. 9, p.548-553, 2009.

JASKULSKI, Krzysztof. **Robotyzacje OTC z wykorzystaniem niskoenergetycznych metod spawania**. 2010. Disponível em: <https://docplayer.pl/14052107-Robotyzacje-otc-z-wykorzystaniem-niskoenergetycznych-metod-spawania.html>. Acesso em: 10 jan. 2020.

JOSEPH, A. et al. Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.311-318, jun. 2005. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/174329305x40624>.

JOSEPH, Andy et al. Variable polarity (AC) arc weld brazing of galvanized steel. In: IIW INTERNATIONAL CONFERENCE, 56., 2003, Bucharest. **Proceedings of 56th IIW International Conference**. Bucharest: Iiw, 2003. p. 1 - 10.

KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J.. Advanced gas metal arc welding processes. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 67, n. 1-4, p.655-674, 30 set. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5>.

KANEKO, Y.; YAMANE, S.; OSHIMA, K. Numerical Simulation of MIG Weld Pool in switchback welding. **Welding In The World**, [s.l.], v. 53, n. 11/12, p.333-341, 2009.

KIM, Kyungnam; CHUNG, Hyun. Wire melting rate of alternating current gas metal arc welding. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 90, n. 5-8, p.1253-1263, 20 set. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9384-8>.

KIM, Y. S.; EAGAR, T. W. Metal transfer pulsed current gas metal arc welding. **Welding Journal**, Miami, v. 7, p.279-287, jul. 1993.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2. Ed. Wiley-Interscience, 2003.

LABORATÓRIO DE SOLDAGEM E ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. **Introdução à Física do Arco Voltaico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Apostila de autoria do Profº. Paulo J. Modenesi. Disponível em < <http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/> >. Acessado em 15/10/2008.

LABSOLDA. **Sistema de Aquisição Portátil**. Apresenta Manual do Equipamento. Disponível em <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/sap_4.php>. Acesso em 15 de dez. 2015.

LANCASTER, J.F. **The Physics of Welding**. 2. ed. Pergamom Press, 1986. 335 p.

LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I – Control of Electrode Melting Rate. **Welding Journal**, n. 08, p. 343s-353s, ago. 1958.

LINCOLN. **Gas Metal Arc Welding - Product and Procedure Selection**. Apresenta informações sobre processo MIG/MAG e suas variantes. Disponível em <http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcLA-75/c4200.pdf>. Acesso em 16 de dez. 2015.

LINCOLN. Power Wave[®] 455/STT Operator's Manual. 43p. 2013.

LUMENERA. **High-Speed Imaging**: An in-depth look at USB 3.0 cameras & technical specifications. 2007. Disponível em: <<https://www.lumenera.com/media/wysiwyg/documents/casestudies/USB3whitepaper.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

MARQUES, Cleber. **Análise De Técnicas e Efeitos Físicos da Alimentação Dinâmica do Arame no Processo de Soldagem MIG/MAG com Vistas ao Desenvolvimento de um Sistema Flexível Nacional**. 2014. 40 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MARQUES, Cleber. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem Mig Automática de Ligas de Alumínio**. 2013. 101 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MATHERS, G. **The Welding of Aluminium and its Alloys**. 1. ed. Cambridge: CRC Press, 2002. 233 p.

MATSUDA, Fukushida et al. Pulsed GMAW: One-drop-transfer and process parameter. **Transactions Of Jwri**, Osaka, p.187-192, dez. 1984.

MECHANICSYSTEM. **DW-300+**. 2020. Disponível em: <http://otc-daihen.pro/en/produto/maszyny-spawalnice/dw-300/>. Acesso em: 10 jan. 2020.

MODENESI, J. P. **Introdução à Física do Arco Voltaico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Apostila de autoria do Prof^o. Paulo J. Modenesi. 2003. Disponível em <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/introduo-a-fisica-do-arco-eletrico.pdf>. Acesso em 05/01/2020.

MODEST, Michael F. **Radiative Heat Transfer**. 2. ed. Amsterdan: Academic Press, 2003. 807 p.

MOTOMAN. UP6 Manipulator Manual. Jan. 1999

OGAWA, Y. High speed imaging technique Part 1 – high speed imaging of arc welding phenomena. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [s.i.], v. 16, n. 1, p.33-43, jan. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/136217110x12785889549903>.

OLIVARES, Erick Alejandro González et al. Estudo da Técnica Tig Keyhole por Meio do Análise Comparativo entre Duas Tochas de Alta Produtividade. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.262-274, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2003.02>.

OLSHAUSEN, Bruno A. **Aliasing: Sensory Processes**. 2000. Disponível em: <<http://redwood.berkeley.edu/bruno/npb261/aliasing.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2000.

ONO, Kohei et al. Development of a plasma MIG welding system for aluminium. **Welding International**, [s.l.], v. 23, n. 11, p.805-809, nov. 2009. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09507110902836945>.

OTC. Owner's Manual for Digital Inverter DW300. Fev. 2012, 103p.

OTC. OTC Japanese Company em: <http://www.otcdaihenasia.com/>. Acesso em: 10 jan. 2020.

PAES, Luiz Eduardo dos Santos. **Soldagem TIG Orbital – Uma Contribuição para a Mudança de Paradigma de Produtividade.** 2017. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PALANI, P.K.; MURUGAN, N. Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, p. 1-10, Jul. 2005.

PARK, Hyoung Jin et al. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding. **Materials Transactions**, [s.l.], v. 50, n. 9, p.2314-2317, 2009. Japan Institute of Metals. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.m2009105>.

PARK, Hyoung Jin et al. The arc phenomenon by the characteristic of *EN Ratio* in AC pulse GMAW. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 66, n. 5-8, p.867-875, 18 ago. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4371-1>.

PHAN, Huy Le et al. Influence of the magnesium content on cathode spot behavior in AC TIG welding of aluminum alloy. **Quarterly Journal Of The Japan Welding Society**, [s.l.], v. 37, n. 4, p.181-186, 2019. Japan Welding Society. <http://dx.doi.org/10.2207/qjjws.37.181>.

PRAVEEN, P.; KANG, M. J.; PRASAD, Y. K. D. V. Behaviour of metal transfer modes in pulsed gas metal welding of aluminum. In: **ADVANCED MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGIES CONFERENCE, 2006.**, 2006, Las Vegas. **Proceedings of 2006 Advanced Materials Processing Technologies Conference.** Eua: Qut Eprints, 2006. p. 1 - 8.

PRAVEEN, P.; KANG, M. J.; YARLAGADDA, P. K. D. V. Arc voltage behavior of one drop per pulse mode in GMAW-P. **Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering**, [s. l.], p.389-392, 2006. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.569.9654&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

QUINN, T. P. Process sensitivity of GMAW: Aluminum vs. Steel. **Welding Journal**, Miami, v. 4, n. 81, p.55-60, abr. 2002.

RAJASEKARAN, S. et al. Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gas metal arc welding. **Welding Journal**, Miami, v. 6, p.254-269, jun. 1998.

RIFFEL, Kauê Correa. **Avanços Tecnológicos do Processo TIG: Técnicas Inovadoras de Alimentação de Arame e Procedimentos Automatizados como Contribuição para a União de Tubos Internamente Cladeados**. 2018. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade

RUDY, J. F. Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal T. **Asme 1982 International Gas Turbine Conference And Exhibit: Volume 2: Aircraft Engine; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery**, Londres, v. 2, n. 1, p.1-4, abr. 1982. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2276342&resultClick=1>>. Acesso em: 01 maio 2017.

SARRAFI, R; LIN, D; KOVACEVIC, R. Real-time observation of cathodic cleaning during variable-polarity gas tungsten arc welding of alum. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s.l.], v. 223, n. 9, p.1143-1157, 2 jun. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1243/09544054jem1355>.

SCOTTI, Américo; MONTEIRO, Lindbergh Souza. Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 17, n. 3, p.271-277, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242012000300011>.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Valdimir. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento Melhor Desempenho**. São Paulo: Artliber, 2008. 283 p.

SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; RIFFEL, Kauê Correa; OKUYAMA, Marcelo Pompermaier; DALPIAZ, Giovani. Effect of dynamic wire in the GTAW process. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 269, p.91-101, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.033>.

SOUZA, Daniel; REZENDE, André Alves de; SCOTTI, Américo. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 14, p.192-198, ago. 2009.

STREET, J. A. **Pulsed Arc Welding**. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 1990. 57 p.

SUBRAMANIAN, S. et al. Experimental approaches to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW. **Welding Journal**, Miami, v. 5, p.166-172, maio 1999.

SUTTON, Mark. **Shoot like a Pro with Formula One Photographer**. 2015. Disponível em: <<http://www.singaporegp.sg/on-track/F1-Insights/shootlikeapro>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

TALKINGTON, J. **Variable Polarity Gas Metal Arc Welding**. 1998. 113 f. MSc Dissertation, The Ohio State University.

TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USHIO, M. Quality and Productivity in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using Alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 6, n. 4, 2001.

TONG, H; NAKATA, K; TANAKA, M; USHIO, M; MITA, T. Mechanism of welding fume suppression during AC-pulsed MIG welding of Al–Mg alloys. **Welding International**, [s.l.], v. 19, n. 7, p.509-523, jul. 2005. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2005.3441>.

TUTTLE, W. Understanding Aluminum Welding. **Welding Journal**, Miami, v. 2, n. 2, p.43-46, fev. 1991.

UEGURI, S.; HARA, K.; OMURA, H. Study of Metal Transfer in Pulsed GMA Welding: Metal transfer is analyzed to determine optimum waveform for spatter free welding. **Welding Journal: Welding Research Supplement**, Miami, v. 54, n. 8, p.242-250, 1985.

UEYAMA, T.; TONG, H.; HARADA, S; PASSMORE, R.; USHIO, M. AC Pulsed GMAW Improves Metal Joining. **Welding Journal**, v. 84, n. 2, p. 40-46, fev. 2005.

VENKATRAMAN, B et al. Thermography for Online Detection of Incomplete Penetration and Penetration Depth Estimation. In: **ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON NDT**, 12., 2006, Awckland, New Zealand. [s.i]: A-pcndt, 2012. p. 1 - 5.

VERSLUIS, M. How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles. **Science** [s.i.], v. 289, n. 5487, p.2114-2117, 22 set. 2000. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.54>.

VERSLUIS, Michel. High-speed imaging in fluids. **Experiments In Fluids**, [s.i.], v. 54, n. 2, p.1458-1513, fev. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-013-1458-x>.

VILARINHO, Louriel O. et al. Methodology for parameter calculation for VP-GMAW. **Welding Journal**, Miami, v. 88, p.92-98, abr. 2009.

VILARINHO, Louriel O.; SCOTTI, Américo. An alternative algorithm for synergic pulsed GMAW of aluminum. **Australasian Welding Journal**, Australia, v. 45, p.36-44, jan. 2000.

WIKIHOW. **Como Escolher uma Velocidade de Obturador**. 2007. Disponível em: <<http://pt.wikihow.com/Escolher-uma-Velocidade-de-Obturador>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

WILSON, Mike. TIP TIG: new technology for welding. **Industrial Robot: An International Journal**, [s.l.], v. 34, n. 6, p.462-466, 23 out. 2007. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/01439910710832057>.

WU, C S; A CHEN, M; LU, y F. Effect of current waveforms on metal transfer in pulsed gas metal arc welding. **Measurement Science And Technology**, [s.l.], v. 16, n. 12, p.2459-2465, 31 out. 2005. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/12/009>.

YARMUCH, M.A.R.; PATCHETT, B.M. Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum. **Welding Journal**, v. 86, n. 02, p. 196s-200s, jul. 2007.

APÊNDICE 1

As informações apresentadas neste apêndice têm como objetivo demonstrar as técnicas para filmagem termográfica empregadas neste trabalho. A primeira seção trata de um ensaio realizado com auxílio da câmera termográfica para determinar a temperatura em um condutor quando submetido a passagem de corrente. A técnica empregada no ensaio e para posterior análise é a mesma empregada para os ensaios relatados neste trabalho, inclusive o processo de calibração. A segunda seção trata mais especificamente da localização de áreas de interesse para medição com o *software* Altair.

Seção 1. Ensaio de uma cordoalha de cobre estanhado

1.1 Objetivos

Verificar a resistência de uma cordoalha de cobre estanhado a passagem de corrente 300 A por cinco minutos.

1.2 Equipamentos

- Câmera termográfica FLIR SC7200 F/3;
- *Software* para filmagem e análise FLIR Altair;
- Pirômetro Fluke 568 e;
- Fonte de soldagem IMC DIGIPLUS A7.

1.3 Ensaio

No projeto de um manipulador interno para soldagem de passes de raiz em tubulações, se fez necessário determinar a temperatura máxima que atinge uma cordoalha formada por quatro malhas de cobre estanhado (Figura 1.1) quando submetida a correntes elétricas na ordem de 300 A. A cordoalha da Figura 1.1 foi instalada nos terminais de uma fonte de soldagem DIGIPLUS A7 por meio de dois cabos-terra. A câmera termográfica FLIR SC7200 F/3 foi posicionada a aproximadamente 40 cm do alvo (Figura 1.2), sendo o foco da câmera regulado para esta distância.

Figura 1.1 – Cordoalha alvo do ensaio.



Em seguida tratou-se de determinar experimentalmente a emissividade do material constituinte das malhas da cordoalha. Uma fita isolante da 3M³⁰, que tem emissividade conhecida de 0,95, foi colada na cordoalha para a filmagem de calibração (Figura 1.3). A cordoalha então foi submetida à uma corrente elétrica de 300 A por 5 minutos. Então usou-se a medição em duas áreas de interesse; sobre a fita isolante (1) e diretamente na cordoalha (2). Como a emissividade da fita isolante é bem conhecida, a temperatura na área sobre a fita é suficientemente confiável. A emissividade da área colocada sobre a cordoalha foi então ajustada até que as temperaturas fossem aproximadamente iguais. Assim a emissividade do material da cordoalha foi definida em 0,65. A fidelidade das medições ainda foi aferida por meio de um pirômetro de contato.

Com o valor de emissividade regulada, então partiu-se para o ensaio propriamente dito, que consistia em filmar termograficamente a cordoalha sendo submetida a uma corrente de 300 A por 5 minutos. O primeiro ensaio (1) realizado com a cordoalha ainda com quatro malhas, no segundo ensaio foi retirada uma malha (2) e assim por diante. Os resultados são mostrados na Tabela 1.1.

³⁰ Recomendação do fabricante da câmera.

Figura 1.2 -Câmera termográfica posicionada a 40 cm do alvo.

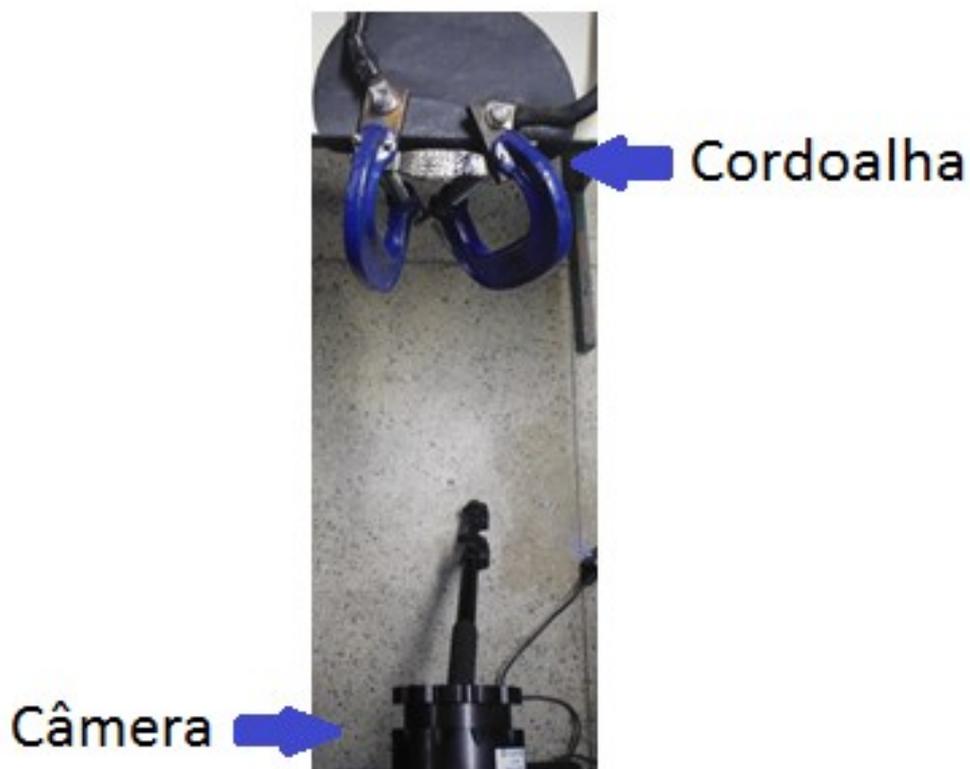
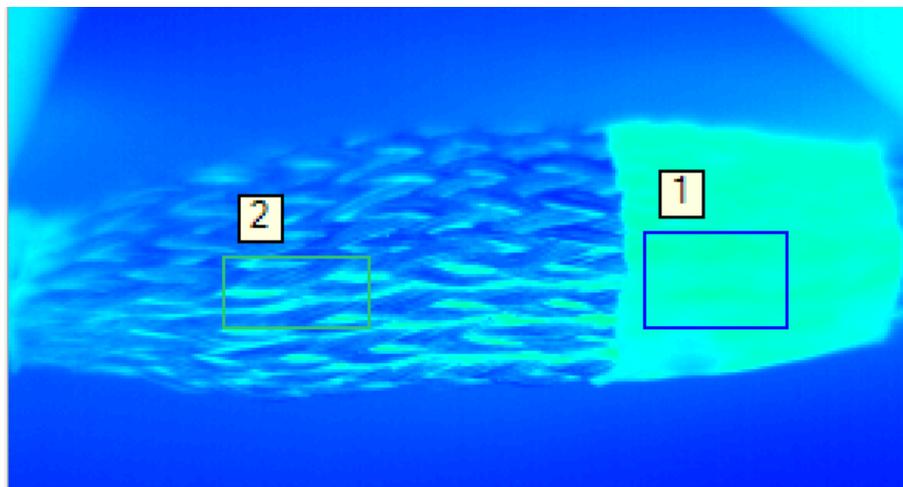


Tabela 1.1 - Resultado dos ensaios com a cordoalha. Os valores apresentados são para a área de interesse 2.

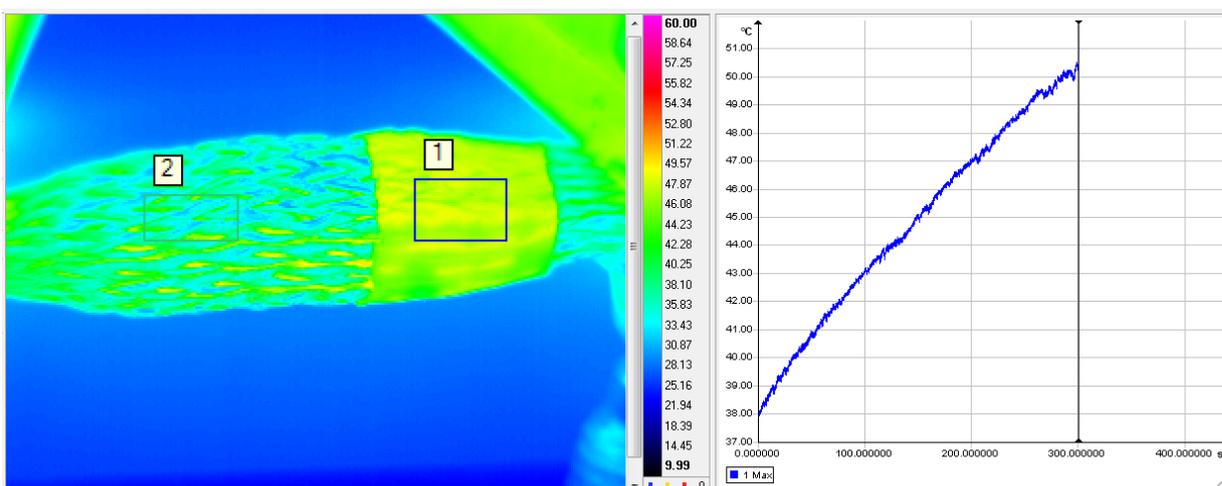
Ensaio	Número de malhas	Temperatura Máx. (°C)	Temperatura Mín. (°C)	Temperatura Méd. (°C)
1	4	62,9	38,5	47,2
2	3	60,6	38,5	46,2
3	2	69,2	39,8	49,8
4	1	104,4	59,1	77,0

Figura 1.3 – Imagem térmica da cordoalha de aço no início da calibração da emissividade do material. A área de interesse 1 está sobre a fita isolante de emissividade conhecida enquanto a área de interesse 2 está sobre a malha da cordoalha a qual se quer determinar a emissividade.



A Figura 1.4 a imagem térmica do ensaio 1 acompanhado do gráfico de temperatura vs. tempo.

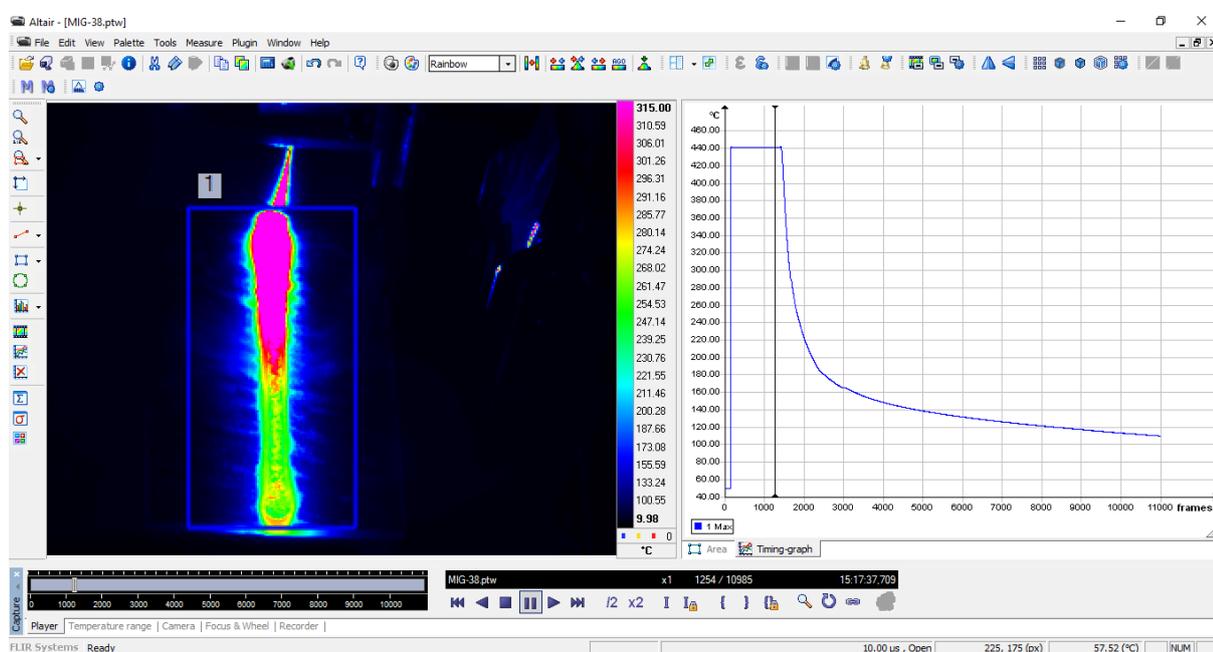
Figura 1.4 – Imagem térmica e gráfico de temperatura máxima vs. tempo (área de interesse 1) para o ensaio 1 (com 4 malhas).



Seção 2. Área de interesse nos ensaios

A Figura 2.1 mostra a tela do *software* Altair e a análise de uma soldagem sobre chapa de aço com MIG/MAG Pulsado com arame de aço inoxidável. Na parte esquerda da Figura 2.1 se tem a imagem da soldagem capturada durante o ensaio com a área de interesse delimitada pela área marcada com o número 1. A parte direita corresponde ao gráfico de tempo vs temperatura, onde os valores de temperatura correspondem a maior temperatura desenvolvida dentro da área de interesse.

Figura 2.1 – Tela do software Altair para montagem de gráficos de temperatura vs tempo.



Depois desta análise, o programa permite exportar os dados brutos para uma planilha de cálculos, onde os gráficos constantes neste trabalho foram montados

Além da construção de gráficos, outros recursos do programa permitem a determinação das temperaturas máximas, mínimas e médias em determinado instante para uma área de interesse, a construção de outros tipos de gráficos como histogramas, por exemplo e mudar a localização ou forma da área de interesse ou sua localização.

Todas as análises realizadas com o Altair e apresentadas neste trabalho foram, basicamente realizadas desta maneira. Embora a área de interesse pudesse ser um pouco diferente para cada situação, em todas procurou-se incluir toda a extensão do cordão de solda.