

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA
DOS PARÂMETROS NO PROCESSO
DE SOLDAGEM GMAW- ARCO PULSADO**

ALEXANDER FISCHER
Setembro de 2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PRORAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA
DOS PARÂMETROS NO PROCESSO
DE SOLDAGEM GMAW- ARCO PULSADO

ALEXANDER FISCHER

Belo Horizonte, 29 de Setembro de 2011

Alexander Fischer

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA
DOS PARÂMETROS NO PROCESSO
DE SOLDAGEM GMAW- ARCO PULSADO**

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

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD
Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG

Co-Orientador: Prof. Dr.-Ing. Volkmar Schuler
Departamento de Engenharia Mecânica -
Hochschule Ulm, University of Applied Sciences,
Alemanha

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2011



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha-31270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 – Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA
DOS PARÂMETROS NO PROCESSO
DE SOLDAGEM GMAW- ARCO PULSADO**

ALEXANDER FISCHER

Tese defendida e aprovada em 29 de Setembro de 2011, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de - Processos de fabricação.

Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD - UFMG - Engenharia Mecânica – Orientador

Prof. Dr.-Ing. Volkmar Schuler - Hochschule Ulm - Engenharia Mecânica - Co-Orientador

Prof. Paulo José Modenesi, PhD - UFMG - Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Examinador

Prof. Dr. Cícero Murta D. Starling - UFMG - Engenharia de Materiais e Construção Civil- Examinador

Prof. Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa - IFMG/ Betim - Examinador

Dra. Ivanilza Felizardo - Rotech Tecnologia Robótica SA - Examinadora

Ao meu precioso pai,
que sempre me apoiou e incentivou
na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho e, em especial:

- Ao Professor Alexandre Queiroz Bracarense pela grande oportunidade, pela discussão de idéias, a dedicação para ensinar e pelo acolhimento;
- Ao Professor Dr.-Ing. Volkmar Schuler pela grande oportunidade, pela motivação e confiança em todos os momentos;
- Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro.

RESUMO

O processo MIG/MAG - Arco Pulsado descreve-se como o processo onde o modo de transferência do metal caracteriza-se por apresentar a transferência em queda livre com a alteração entre dois níveis da corrente da soldagem, sendo um nível baixo, conhecido como corrente de base e outro nível alto, conhecido como corrente de pulso ou pico. As vantagens do processo são: a transferência do metal sem formação de respingos e uma larga faixa de potência de soldagem. As desvantagens são o barulho excessivo (devido a frequência de pulsação), o custo muito mais alto do equipamento e a complexidade dos parâmetros.

No presente trabalho foi investigada a influência da polaridade do eletrodo na transferência do metal, o efeito da auto-correção na modulação da corrente de pulso – tensão de base (I_P-U_B), a influência dos parâmetros principais da pulsação e as limitações do processo. Para os ensaios foi utilizado o metal de base ASTM-A36, o metal de adição ER70S-6 e a mistura de gás de proteção 82% argônio e 18% CO_2 . A análise dos resultados foi feita pelas imagens capturadas com uma câmera de alta velocidade. As imagens capturadas foram sincronizadas com os valores de corrente e tensão de soldagem. As características geométricas foram analisadas pelas seções transversais de cordões. O diagrama de tensão-corrente (U-I) foi utilizado para apresentar as características do processo.

A variação da polaridade mostrou que, no modo arco pulsado, a transferência do metal só foi controlada com o eletrodo consumível no pólo positivo.

A modulação I_P-U_B mostrou um efeito de auto-correção suficiente para manter o comprimento do arco constante durante a soldagem. Como vantagem da modulação foi identificado que a corrente constante na fase de pulso provocou um estrangulamento uniforme da gota e a tensão constante na fase de base provocou o efeito de auto-correção.

O estudo dos principais parâmetros da pulsação apresentou como resultado que a tensão de base como uma ferramenta para manipular o comprimento do arco controlado; que o tempo de pulso atuou junto com a corrente de pulso, que o tempo da descida da corrente não influenciou na transferência do metal e que a frequência de pulsação foi dependente da velocidade de alimentação do arame.

O processo foi limitado por baixo (inferiormente) pela falta de penetração e instabilidade do arco na fase de base. Por cima (superiormente) ele foi limitado pela alta tensão na fase de base que provocou um comprimento do arco parecido como na fase de pulso.

Palavras- chave: arco pulsado; corrente pulsada; transferência do metal; modulação.

ABSTRACT

Pulsed gas metal arc welding describes the metal transfer mode involving oscillation (pulsing) of the welding current from a high pulse current in which level drop growth, necking of wire tip and detachment occur, and a low background current, which is applied to maintain the arc.

The advantages of the process are: metal transfer without spatter formation and a wide range of welding power. The disadvantages are: noise pollution (pulse frequency), the cost of the equipment is much higher and the process is slightly more complex as compared to standard GMAW because a number of variables are required to be controlled to achieve good results.

This study investigated the effect of the weld polarity on the metal transfer at the pulsed GMAW process, the effect of arc self-regulation with the current modulation mode I_P-U_B , the influence of the base parameters at the metal transfer and the limits of application.

Experiments were carried out on an automated GMAW platform. The base metal was mild steel ASTM-A36 with a thickness of 4mm and 2,5mm. The filler wire was ER70S-6 with a diameter of 1,2mm. It was used as shielding gas 82% argon with 18% CO_2 . During trials, a high speed camera was used to record the metal transfer process. During welding the arc voltage and the welding current were continuously measured and synchronized with the high speed images. The high speed camera used a sampling speed of 4000 frames per second (fps).

The study of the metal transfer with different electrode polarities showed that a controlled metal transfer was only possible when the electrode is connected to the positive pole.

The current modulation mode I_P-U_B demonstrated self regulation properties to maintain the arc length steady during welding. As advantages of this modulation mode were identified the constant droplet formation conditions during pulsing (constant current mode) and the self regulation effect during the base level (constant voltage mode).

The study of the base parameters showed, the arc length was regulated with the base voltage, pulse duration and pulse current influenced the droplet formation and pulse frequency was coupled directly with the wire feed speed.

At the low power level, the application of the pulsed GMAW process was limited by the lack of penetration and by the arc instability. At the high power level, the application was limited by the high base voltage, what provoked during the different phases similar arc lengths.

Keywords: Pulsed GMAW; Pulsed metal transfer; Current modulation mode.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xxi
LISTA DE EQUAÇÕES	xxiii
1 INTRODUÇÃO, OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO	24
1.1 Introdução.....	24
1.2 Objetivo	27
1.3 Organização do trabalho.....	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 O arco elétrico uma ferramenta para soldagem.....	29
2.1.1 Introdução arco elétrico	29
2.1.2 Fundamentos físicos do arco elétrico.....	29
2.2 Processo de soldagem com arame sólido sob proteção gasosa	30
2.2.1 Introdução soldagem com arame sólido sob proteção gasosa.....	30
2.2.2 Ignição do arco elétrico no processo GMAW	32
2.2.3 Gás de proteção, propriedades e misturas para soldagem	32
2.2.4 Forças na transferência do metal.....	37
2.2.5 Classificação da transferência do metal	40
2.2.5.1 Transferência do metal por curto-circuito	42
2.2.5.2 Transferência do metal por arco controlado pulsado.....	43
2.2.5.3 Transferência do metal por arco spray (aerossol).....	44
2.2.6 Problemas durante a operação do processo de soldagem MIG/ MAG.....	44
2.3 A tecnologia de soldagem com arco pulsado	45
2.3.1 Introdução tecnologia arco pulsado.....	46
2.3.2 Soldagem sinérgica com arco pulsado	47
2.3.3 Equipamento para Soldagem arco pulsado.....	48
2.3.3.1 Tipos de máquinas para soldagem com arco pulsado	48
2.3.3.2 Alimentador do arame e tocha de soldagem	51
2.3.4 Características das máquinas de soldagem para arco pulsado.....	53
2.3.5 Definição dos parâmetros do processo de arco pulsado.....	55

2.4	Filmagem de alta velocidade no processo de soldagem	57
2.4.1	Introdução filmagem de alta velocidade	57
2.4.2	Propriedades das câmeras de alta velocidade	58
2.4.3	Sistemas com iluminação adicional de contraluz.....	59
2.4.4	Sistemas sem iluminação adicional	60
3	MATERIAIS E METODOLOGIA	61
3.1	Materiais usados	61
3.1.1	Metal de base	61
3.1.2	Metal de adição	62
3.1.3	Gás de proteção	63
3.2	Equipamento e técnicas de análise	64
3.2.1	Fonte de soldagem e o sistema de alimentação/ tocha.....	64
3.2.2	Sistema de soldagem mecanizado.....	67
3.2.3	Sistemas de aquisição de dados.....	68
3.2.3.1	Câmera de alta velocidade	68
3.2.3.2	Sistema de monitoração.....	70
3.2.3.3	Coordenação do processo de aquisição dos dados.....	71
3.2.4	Preparação das mostras macrográficas.....	73
3.2.5	Análise das imagens	74
3.3	Discussão dos parâmetros principais.....	76
3.3.1	Ponto de transmissão do corrente no de bico de contato.....	76
3.3.2	Frequência do processo.....	78
3.3.3	Modulação do processo	80
3.3.4	Velocidade de soldagem	82
3.3.5	Comprimento do arco	83
3.4	Procedimento experimental	85
3.4.1	Polaridade do eletrodo	85
3.4.2	Modulação I_P-U_B	86
3.4.3	Parâmetros principais da fase de base.....	87
3.4.4	Parâmetros principais da fase de pulso	87
3.4.5	Limites do processo	88

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
4.1	Variação da polaridade do eletrodo	89
4.1.1	Resultados dos ensaios da variação da polaridade	89
4.1.2	Discussão dos resultados da variação da polaridade	92
4.2	Modulação I_P-U_B	94
4.2.1	Resultados dos ensaios da modulação I_P-U_B	95
4.2.2	Discussão dos resultados modulação I_P-U_B	98
4.3	Parâmetros principais da fase de base	101
4.3.1	Resultados ensaios dos parâmetros da fase de base	101
4.3.2	Discussão resultados dos parâmetros da fase de base.....	108
4.4	Parâmetros principais da fase de pulso.....	111
4.4.1	Influência da variação do tempo da descida da corrente de pulso	112
4.4.1.1	Resultados da variação do tempo da descida.....	112
4.4.1.2	Discussão da variação do tempo da descida.....	117
4.4.2	Variação corrente de pulso com variação da tensão de base	119
4.4.2.1	Resultados da variação da corrente de pulso.....	119
4.4.2.2	Discussão sobre a variação da corrente de pulso.....	128
4.4.3	Variação do tempo de pulso	134
4.4.3.1	Resultados variação do tempo de pulso	134
4.4.3.2	Discussão sobre a variação do tempo de pulso.....	138
4.4.3	Variação da frequência de pulsação	141
4.4.3.1	Resultados variação da frequência de pulsação	141
4.4.3.2	Discussão variação da frequência de pulsação	147
4.5	Limite do processo	151
4.5.1	Resultados limite do processo	152
4.5.2	Discussão limite do processo.....	158
5	CONCLUSÃO	162
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	165
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Diagrama esquemático, curva característica estática do arco.....	30
FIGURA 2.2	Diagrama esquemático de temperatura de um arco MIG de alumínio com 250A sem consideração da influência do vapor do metal.....	30
FIGURA 2.3	Soldagem com arame sólido sob proteção gasosa (Representação esquemática)	31
FIGURA 2.4	Distância Bico de Contato-Peça (DBCP).....	31
FIGURA 2.5	Condutividade elétrica e condutividade térmica de alguns gases.....	34
FIGURA 2.6	a) concentração de corrente no arco com argônio, b) concentração de corrente no arco com CO ₂ e c) temperatura e coluna de corrente no arco com CO ₂	36
FIGURA 2.7	Forças na transferência do metal	37
FIGURA 2.8	Força da tensão superficial depende da quantidade de oxigênio no gás de proteção na uma solda de aço	38
FIGURA 2.9	Efeito Pinch a) dois fios onde passa a corrente na mesma direção e b) eletrodo de soldagem com efeito de estrangulamento.....	40
FIGURA 2.10	Coefficiente de Lorentz dependente da geometria das gotas	40
FIGURA 2.11	Transferência por curto-circuito	43
FIGURA 2.12	Diagrama de uma onda do tipo corrente pulsado e transferência do metal (esquemático)...	43
FIGURA 2.13	Transferência do metal no modo spray esquemático.....	44
FIGURA 2.14	Coefficiente de superfície por volume do arame	46
FIGURA 2.15	Interpolação entre 5 pontos de operação	48
FIGURA 2.16	Classificação das fontes transistorizadas	49
FIGURA 2.17	Comparação entre as seqüências dos módulos eletrônicos (Re= Rede, R= Retificador, Tr= Transformador, T= Transistor).....	50
FIGURA 2.18	Sistema de alimentação push-pull a) alimentador principal empurrando e b) alimentador puxando.....	51
FIGURA 2.19	Tocha refrigerada com água, esquemático com os componentes 1- Bico de contato, 2- Bocal de gás de proteção e 3- Entrada e saída da refrigeração	52
FIGURA 2.20	Curvas características de fontes de soldagem com a) corrente constante e (b) tensão constante combinado com curva característica estática do arco com diferentes comprimentos l_1 e l_2	53
FIGURA 2.21	Modulações de fontes de soldagem com arco pulsado com a) modulação $I_p - I_B$ e b) modulação $U_p - I_B$	55
FIGURA 2.22	Parâmetros principais do processo arco pulsado	55
FIGURA 2.23	a) quantidade de pixel com velocidade máxima de operação e frequência de 1000 quadros por segundo e b) quantidade menor de pixel com velocidade máxima de operação com frequência de 2000 quadros por segundo.....	59
FIGURA 2.24	Esquemático um sistema de filmagem com iluminação contraluz	60

FIGURA 3.1	Chapa com penetração completa da chapa e formação de um reforço não desejado	62
FIGURA 3.2	Bancada experimental com câmera de alta velocidade	64
FIGURA 3.3	a) esquema de 1- Dispositivo de soldagem com 2- Tocha de soldagem, 3- Corpo de prova, 4- Viga de fixação, 5- Ranhura e 6- Área de foco da câmera e b) área de foco com 7- O arame e 8- Chapa	67
FIGURA 3.4	a) câmera de alta velocidade com visto do sensor fotográfica CMOS e b) câmera de alta velocidade na posição de soldagem com lente Nikkor	68
FIGURA 3.5	Número de imagens por evento dependente da frequência de pulsação (câmera Redlake MotionPro10.000)	69
FIGURA 3.6	a) imagem com frequência de 4.000 fps e 256 x 124 pontos e b) imagem com frequência de 10.000 fps com 256 x 48 pontos	70
FIGURA 3.7	Ponto de aquisição da tensão no alimentador de arame	71
FIGURA 3.8	Exemplos de ondas de tensão e corrente com ruído do sinal.....	72
FIGURA 3.9	Exemplos de ondas de tensão e corrente com "filtro de Bessel" (Soldagens diferentes, com escalas diferentes).....	72
FIGURA 3.10	Sistema de coordenação dos ensaios	73
FIGURA 3.11	Esquema do perfil geométrico do cordão de solda. Onde: b=largura do cordão, p=penetração máxima da solda, r=altura de reforço.....	74
FIGURA 3.12	Programa MidasPlayer® para a sincronização das imagens e parâmetros	75
FIGURA 3.13	Programa ImageJ V1.44p.....	75
FIGURA 3.14	Variação do ponto de transmissão da corrente no bico de contato.....	76
FIGURA 3.15	a) ponto de transmissão na entrada, b) ponto de transmissão no meio e c) ponto de transmissão na saída	76
FIGURA 3.16	Bico de contato modificado para os testes	78
FIGURA 3.17	Transformação do cilindro (arame) em uma gota	78
FIGURA 3.18	a) relação da frequência e da velocidade de alimentação para $d_{AR}=1,0\text{mm}$ e b) relação da frequência e da velocidade alimentação para $d_{AR}=1,2\text{mm}$	80
FIGURA 3.19	a) esquematicamente modulação U_P-U_B e b) esquematicamente modulação I_P-U_B	81
FIGURA 3.20	Esquematicamente condições regulares e irregulares na velocidade de soldagem com tocha fixa e chapa deslocada	82
FIGURA 3.21	Comprimento do arco a) muito curto, b) comprimento ideal e c) comprimento muito longo	83
FIGURA 3.22	Esquematicamente a formação de duas gotas voando no arco causado pelo comprimento do arco muito longo	84
FIGURA 3.23	Esquematicamente corpo de prova para variação da distância entre bico de contato e corpo de prova	86

FIGURA 3.24	Esquemáticamente a variação da característica da subida da corrente liberada pela fonte de soldagem	88
FIGURA 3.25	Variação da velocidade de alimentação com a frequência do processo com tempo de pulso e tempo da descida da corrente definida	88
FIGURA 4.1	Seqüência representante do ensaio com pólo positivo no eletrodo	89
FIGURA 4.2	Diagrama U-I do processo pulsado com pólo positivo no eletrodo.....	90
FIGURA 4.3	Diagrama U-I do processo com pólo negativo no eletrodo (Valores negativos foram transformados em valores positivos).....	91
FIGURA 4.4	Seqüência cinco pulso consecutivo no pólo negativo.....	91
FIGURA 4.5	a) eletrodo positivo na fase de base e b) eletrodo negativo na fase de base	92
FIGURA 4.6	a) eletrodo positivo na fase de subida da corrente de pulso com a forma de arco cônico, 71A / 25V e 250A / 27V e b) eletrodo negativo na fase de subida da corrente com forma de arco esférica -72A /-24V e -261A / -27V.....	93
FIGURA 4.7	Comprimento do arco em 10 diferentes momentos com DBPD=12mm	95
FIGURA 4.8	Diagrama U-I com DBCP=12mm, tensão média de 27V e corrente média de 228A.....	95
FIGURA 4.9	Comprimento do arco em 10 diferentes momentos com DBPD=7mm.....	96
FIGURA 4.10	Diagrama U-I com DBCP=7mm, tensão média de 25,9 V e corrente média de 236A.....	96
FIGURA 4.11	Transferência do metal de quatro diferentes pulsos em diferentes momentos da solda com formação de uma gota adicional.....	97
FIGURA 4.12	Comprimento do arco em 10 diferentes momentos com DBPD=17mm	97
FIGURA 4.13	Diagrama U-I com DBCP=17mm.....	98
FIGURA 4.14	Arco (fase de pulso) com a) DBCP=12mm, b) DBCP=7mm e c) DBCP=17mm	98
FIGURA 4.15	Comparação das ondas da corrente dos diferentes ensaios	99
FIGURA 4.16	Comparação características geométricas	100
FIGURA 4.17	Comparação tensão média, corrente média e aporte térmico	100
FIGURA 4.18	Variação da tensão de base no diagrama U-I	101
FIGURA 4.19	Medição do comprimento do arco (4mm) em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 27V	102
FIGURA 4.20	Diagrama U-I com tensão de base de 27V	102
FIGURA 4.21	Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 26V (3,8mm)	103
FIGURA 4.22	Diagrama U-I com tensão de base de 26V	103
FIGURA 4.23	Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 25V (3,5mm)	104
FIGURA 4.24	Diagrama U-I com tensão de base de 25V	104

FIGURA 4.25	Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 24 V (3,2 mm)	105
FIGURA 4.26	Diagrama U-I com tensão de base de 24V	105
FIGURA 4.27	Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 23V (2,9 mm)	106
FIGURA 4.28	Diagrama U-I com tensão de base de 23V	106
FIGURA 4.29	Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 21V (2,0 mm)	107
FIGURA 4.30	Diagrama U-I com tensão de base de 21V	107
FIGURA 4.31	Redução do comprimento do arco de 4mm (27V) até 2mm (21V)	108
FIGURA 4.32	Comparação da solda a) comprimento do arco de 4mm (27V) com falta de material lateral e b) comprimento do arco 3,2mm (24V)	108
FIGURA 4.33	Variação da corrente de base.....	109
FIGURA 4.34	Variação da corrente de pulso dos diferentes ensaios com maior variação no 27V e menor variação no 21V	109
FIGURA 4.35	Tensão média e corrente média dos ensaios	110
FIGURA 4.36	Aporte térmico com a variação da tensão de base.	110
FIGURA 4.37	Análise das seções transversais	111
FIGURA 4.38	Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 2,5ms	112
FIGURA 4.39	Comprimento do arco (4,7mm) em 10 diferentes momentos com tempo de descida de 2,5ms.....	112
FIGURA 4.40	Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 2ms.....	113
FIGURA 4.41	Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 2,0ms.....	113
FIGURA 4.42	Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 1,5ms	114
FIGURA 4.43	Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 1,5ms.....	114
FIGURA 4.44	Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 1ms.....	115
FIGURA 4.45	Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 1ms	115
FIGURA 4.46	Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 0,5ms	116
FIGURA 4.47	Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 0,5ms.....	116
FIGURA 4.48	Comparação dos comprimentos do arco entre 2,5ms e 0,5ms.....	117
FIGURA 4.49	Comparação das ondas da corrente com a variação do tempo de descida da corrente de pulso (Valores reais)	118

FIGURA 4.50	Comparação da tensão / corrente média e aporte térmico com a variação do tempo de descida da corrente	118
FIGURA 4.51	Comparação largura, penetração e diluição dos ensaios	118
FIGURA 4.52	Diagrama U-I com corrente de pulso de 430A / 26V	120
FIGURA 4.53	Medição do comprimento do arco (2,2mm) em 10 momentos	120
FIGURA 4.54	Seqüência típica, tensão e corrente, ensaios 430A / 26V, combinado com imagens da câmara	121
FIGURA 4.55	Diagrama U-I com corrente de pulso de 470A / 26V	122
FIGURA 4.56	Comprimento do arco (2,8mm) com corrente de pulso de 470A/ 26V	122
FIGURA 4.57	Seqüência típica, tensão e corrente, ensaios 470A / 26V, combinado com imagens da câmara	123
FIGURA 4.58	Diagrama U-I com corrente de pulso de 510A / 26V	123
FIGURA 4.59	Comprimento do arco (3,2 mm) com corrente de pulso de 510A/ 26V	124
FIGURA 4.60	Diagrama U-I com corrente de pulso de 550A / 26V	124
FIGURA 4.61	Comprimento do arco (3,8mm) com corrente de pulso de 550A/ 24V	125
FIGURA 4.62	Diagrama U-I com corrente de pulso de 550A / 24V	125
FIGURA 4.63	Comprimento do arco (3,0mm) com corrente de pulso de 550A/ 24V	126
FIGURA 4.64	Diagrama U-I com corrente de pulso de 550A / 22V	126
FIGURA 4.65	Comprimento do arco (2,2mm) com corrente de pulso 550A e tensão de base de 22V	127
FIGURA 4.66	Diagrama U-I com corrente de pulso de 570A / 20V	127
FIGURA 4.67	Comprimento do arco (2,2mm) com corrente de pulso de 570A / 20V	128
FIGURA 4.68	Comparação das ondas da corrente com variação da corrente de pulso com os parâmetros principais constante	128
FIGURA 4.69	Comparação dos comprimentos dos arcos com variação das correntes de pulso e variação da tensão de base	129
FIGURA 4.70	Comparação das faixas de variação do corrente de pulso dos diferentes ensaios com os diferentes comprimentos dos arcos	130
FIGURA 4.71	Comparação da potencia das diferentes soldagens e comprimentos dos arcos com a) corrente de pulso=470A, tensão de base=26V (2,8mm), b) corrente de pulso=550A e tensão de base=26V (3,8mm) e c) corrente de pulso=550V e tensão de base=22V (2,2mm)	131
FIGURA 4.72	Esquemáticamente o processo de estrangulamento com diferentes correntes de pulso	132
FIGURA 4.73	Comparação das correntes médias com variação da corrente de pulso e variação da tensão de base	132
FIGURA 4.74	Comparação da largura e penetração com variação da corrente de pulso	132

FIGURA 4.75	Comparação do reforço e diluição com variação da corrente de pulso	133
FIGURA 4.76	Comparação da tensão média com variação do comprimento do arco	133
FIGURA 4.77	Comparação do aporte térmico com variação do comprimento do arco	133
FIGURA 4.78	Tensão e corrente dos ensaios, $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$	134
FIGURA 4.79	Medição do comprimento do arco (3,2mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$	135
FIGURA 4.80	Tensão e corrente dos ensaios, $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$	135
FIGURA 4.81	Comprimento do arco (5,0mm) com $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$	136
FIGURA 4.82	Seqüência de um pulso com $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$	136
FIGURA 4.83	Tensão e corrente dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B=23V$	137
FIGURA 4.84	Comprimento do arco (3,4mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B=23V$	137
FIGURA 4.85	Comparação comprimentos dos arcos com a) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, b) $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$ e c) $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B=23V$	138
FIGURA 4.86	Comparação tensão e corrente dos ensaios	138
FIGURA 4.87	Comparação tensão e corrente dos ensaios no diagrama U-I	139
FIGURA 4.88	Comparação tensão média e corrente média	139
FIGURA 4.89	Comparação aporte térmico.....	140
FIGURA 4.90	Comparação largura, penetração e diluição.....	140
FIGURA 4.91	Comprimento do arco (5,2mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, $F_p= 105Hz$	141
FIGURA 4.92	Corrente e tensão com as imagens da transferência do metal do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 26V$, $F_p= 105Hz$	142
FIGURA 4.93	Comprimento do arco (3,7mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 22V$, $F_p=105Hz$	143
FIGURA 4.94	Corrente e tensão com as imagens da transferência do metal do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=22V$, $F_p=105Hz$	143
FIGURA 4.95	Comprimento do arco (3,7mm) com $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=21,5V$, $F_p=135Hz$	144
FIGURA 4.96	Corrente e tensão com as imagens da transferência do metal do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 21,5V$, $F_p=135Hz$	144
FIGURA 4.97	Comprimento do arco (4,0mm) com $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=24V$, $F_p=105Hz$	145
FIGURA 4.98	Corrente e tensão do ensaio com as imagens da transferência do metal com $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 24V$, $F_p=105Hz$	145
FIGURA 4.99	Comprimento do arco (3,9mm) com $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B= 23V$, $F_p=135Hz$	146
FIGURA 4.100	Corrente e tensão sincronizadas com as imagens da transferência do metal dos ensaos com $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B= 23V$, $F_p= 135Hz$	146

FIGURA 4.101	Comparação dos comprimentos dos arcos na fase de subida da corrente com os diferentes parâmetros	147
FIGURA 4.102	Comparação da transferência das gotas com 85Hz, 105Hz, 105Hz, 135Hz.....	148
FIGURA 4.103	Comparação da tensão e corrente média com os parâmetros 1) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, $F_p=85Hz$, 2) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, $F_p=105Hz$, 3) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=22V$, $F_p=105Hz$ e 4) $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=22V$, $F_p=135Hz$	149
FIGURA 4.104	Comparação do aporte térmico	149
FIGURA 4.105	Largura, penetração e diluição com variação da frequência	149
FIGURA 4.106	Comparação da transferência do metal com $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=26V$, $F_p=85Hz$, b) $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=24V$, $F_p=105Hz$ e c) $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B=23V$, $F_p=135Hz$	150
FIGURA 4.107	Medição do comprimento do arco (2,4mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=34V$, $F_p=160Hz$	151
FIGURA 4.108	Corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=34V$, $F_p=160Hz$	152
FIGURA 4.109	Diagrama U-I com 160Hz e corrente de pulso de 430A	152
FIGURA 4.110	Medição do comprimento do arco (3,0mm) com $I_p=470A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=30V$, $F_p=210Hz$	153
FIGURA 4.111	Diagrama U-I com a frequência de 210Hz.....	153
FIGURA 4.112	Corrente e tensão dos ensaios com $I_p=470A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=30V$, $F_p=210Hz$	154
FIGURA 4.113	Transferência do metal com a frequência de 210Hz	154
FIGURA 4.114	Comprimento do arco (2.9mm) com $I_p=540A$, $t_p=1,85ms$, $U_B=26V$, $F_p=270Hz$	155
FIGURA 4.115	Diagrama U-I com a frequência de 270Hz.....	155
FIGURA 4.116	Corrente e tensão dos ensaios com $I_p=540A$, $t_p=1,85ms$, $U_B=26V$, $F_p=270Hz$	156
FIGURA 4.117	Medição do comprimento do arco (3.9mm) com a velocidade de alimentação do arame de 3m/min e $I_p=430A$, $t_p=2,9ms$, $U_B=19V$, $F_p=63Hz$	156
FIGURA 4.118	Diagrama U-I com velocidade de alimentação do arame de 3m/min.....	157
FIGURA 4.119	Medição do comprimento do arco (3.5mm) com a velocidade de alimentação do arame de 2m/min e $I_p=350A$, $t_p=2,8ms$, $U_B=18V$, $F_p=54Hz$	157
FIGURA 4.120	Diagrama U-I do ensaio com velocidade da alimentação do arame de 2m/min.....	158
FIGURA 4.121	Arco na fase de pulso e na fase de base com intensidades parecidas	159
FIGURA 4.122	Arco na fase de pulso e na fase de base com intensidades diferentes.....	159
FIGURA 4.123	Transferência do metal com a frequência 270Hz	160
FIGURA 4.124	Relação entre fase de pulso e fase de base	160
FIGURA 4.125	Corrente e tensão do ensaio com uma velocidade de 3m/min com a frequência de 63Hz	161
FIGURA 4.126	Comparação características geométricas dos ensaios com 2 e 3m/min.....	161

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Propriedades dos diferentes gases	33
TABELA 2.2	Corrente de transição para arames de aço	35
TABELA 2.3	Formas de transferência IIW	41
TABELA 2.4	Classificação da transferência metálica	42
TABELA 2.5	Classificação da transferência metálica avançada	42
TABELA 3.1	Propriedades principais do S235 e ASTM A36.....	61
TABELA 3.2	Composição química do metal de base S235 e ASTM A36.....	61
TABELA 3.3	Composição química especificados dos arames G4Si1 e ER70S-6	63
TABELA 3.4	Propriedades mecânicas	63
TABELA 3.5	Propriedades principais da fonte DALEX VARIO MIG 400 L(W)-B	65
TABELA 3.6	Parte importante do conjunto de parâmetros de soldagem	66
TABELA 3.7	Parâmetros de gravação com a câmera e lente	70
TABELA 3.8	Parâmetros soldagem com variação do ponto de transmissão	77
TABELA 3.9	Resultados dos ensaios com variação do ponto de transmissão	77
TABELA 4.1	Parâmetros principais dos ensaios da modulação	94
TABELA 4.2	Análise da corrente e tensão dos ensaios DBCP=12mm	95
TABELA 4.3	Análise da corrente e tensão dos ensaios DBCP=7mm	96
TABELA 4.4	Análise da corrente e tensão dos ensaios DBCP=17mm	98
TABELA 4.5	Variação do valor do stickout.....	99
TABELA 4.6	Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 27V	102
TABELA 4.7	Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 26V	103
TABELA 4.8	Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 25V	104
TABELA 4.9	Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 24V	105
TABELA 4.10	Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 23V	106
TABELA 4.11	Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 21V	107
TABELA 4.12	Comparação fator de subida	110
TABELA 4.13	Análise da corrente e tensão dos ensaios com 2,5ms	113

TABELA 4.14	Análise da corrente e tensão dos ensaios com 2,0ms	114
TABELA 4.15	Análise da corrente e tensão dos ensaios com 1,5ms	115
TABELA 4.16	Análise da corrente e tensão dos ensaios com 1ms	116
TABELA 4.17	Análise da corrente e tensão dos ensaios com 0,5ms	117
TABELA 4.18	Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 430A/26V	120
TABELA 4.19	Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 470A/26V	122
TABELA 4.20	Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 510A/26V	124
TABELA 4.21	Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A/26V	125
TABELA 4.22	Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A/24V	126
TABELA 4.23	Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A/22V	127
TABELA 4.24	Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 570A/20V	128
TABELA 4.25	Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$	135
TABELA 4.26	Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$	136
TABELA 4.27	Análise da corrente e tensão dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B=23V$	137
TABELA 4.28	Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, $F_p=105Hz$	142
TABELA 4.29	Análise da corrente e tensão dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=22V$, $F_p=105Hz$	143
TABELA 4.30	Análise da corrente e tensão dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=21,5V$, $F_p=135Hz$	145
TABELA 4.31	Análise da corrente e tensão com $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=24V$, $F_p=105Hz$	146
TABELA 4.32	Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B=23V$, $F_p=135Hz$	147
TABELA 4.33	Comparação tensão média, corrente média e apporto térmico dos ensaios com 510A	150
TABELA 4.34	Corrente e tensão dos ensaios com $V_A=10$ m/min, $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=34V$, $F_p=160Hz$	153
TABELA 4.35	Corrente e tensão dos ensaios com $V_A=10$ m/min, $I_p=470A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=30V$, $F_p=210Hz$	154
TABELA 4.36	Corrente e tensão dos ensaios com $V_A=10$ m/min, $I_p=540A$, $t_p=1,85ms$, $U_B=26V$, $F_p=270Hz$	156
TABELA 4.37	Corrente e tensão média dos ensaios com $V_A=3m/min$	157
TABELA 4.38	Corrente e tensão média dos ensaios com $V_A=2m/min$	158

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ρ	Densidade do material [kg/m ³]
ρ_V	Densidade do vapor [kg/m ³]
μ_0	Permeabilidade magnética do espaço livre
ΔI	Varição da corrente [A]
ΔU	Varição da tensão [V]
A_{REF}	Área de reforço [mm ²]
A_{PEN}	Área de penetração [mm ²]
A_p	Área projetada da gota [m ²]
C_a	Coefficiente de arraste do sistema
D	Diluição [%]
d_{AR}	Diâmetro do arame [mm]
E_s	Aporte térmico [J/ cm]
F_g	Força gravitacional [N]
F_{γ_s}	Força superficial [N/m]
F_{em}	Força eletromagnética [N]
F_a	Força de arraste [N]
F_v	Força de reação [N]
$F_L(\beta)$	Coefficiente do Lorentz
f	Frequência de pulso (Hz), Frequência de pulsação (Hz),
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
I	Corrente de soldagem [A]
I_m	A corrente média [A]
I_p	Corrente de pulso na fase de pulso [A]
I_B	Corrente na fase de base [A]
l, l_1 e l_2	Comprimento dos arcos [mm]
m_0	Massa vaporizada por volume por ampère [g]
R_G	Raio da gota [m]
R_C	Resistência de contato [Ω]
R_{GA}	Relação entre diâmetro do arame e o diâmetro da gota
r_a	Raio do arame [m]
T	Duração da sequência (ms)
t_p	Tempo de pulso [ms]
t_B	Tempo de base [ms]
t_{BP}	Tempo de subida [ms]
t_{PB}	Tempo de descida [ms]
U	Tensão de Soldagem [V]
U_B	Tensão na fase de base [V]
U_p	Tensão de pulso na fase de pulso [V]
V_f	Velocidade do gás de proteção [m/sec]

V_A	Velocidade de alimentação do arame [m/ min]
V_S	Velocidade de Soldagem [m/ min]
Ar	Argônio
CA	Ciclo ativo
CCD	Charge-Coupled Device)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CV	Tensão constante
CI	Corrente constante
CMT	Cold Metal Transfer®
CO ₂	Dióxido de carbono
DBCP	Distância bico de contato-peça
Fps	Frames por second magens por segundo
GMAW	Gas Metal Arc Welding
He	Hélio
MIG	Metal-Inert Gas
MAG	Metal-Active Gas
O ₂	Oxigenio
P-GMAW	Pulsed Gas Metal Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
STT	Surface Tension Transfer

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 2.1	Teoria Equilíbrio Estático de Forças	37
EQUAÇÃO 2.2	Força gravitacional	38
EQUAÇÃO 2.3	Força tensão superficial	38
EQUAÇÃO 2.4	Força de arraste	39
EQUAÇÃO 2.5	Força de reação.....	39
EQUAÇÃO 2.6	Força de Lorentz.....	39
EQUAÇÃO 2.7	Força de Lorentz Amson	40
EQUAÇÃO 2.8	Ciclo ativo	56
EQUAÇÃO 2.9	Corrente média, retangular	56
EQUAÇÃO 2.10	Corrente média, não retangular	56
EQUAÇÃO 2.11	Aporte térmico.....	57
EQUAÇÃO 3.1	Variação da tensão, medição no bico de contato	72
EQUAÇÃO 3.2	Variação da tensão, medição no arame.....	72
EQUAÇÃO 3.3	Diluição	74
EQUAÇÃO 3.4	Comprimento do cilindro	79
EQUAÇÃO 3.5	Volume do cilindro é igual do volume da gota.....	79
EQUAÇÃO 3.6	Frequência de pulsação.....	79
EQUAÇÃO 3.7	Relação entre diâmetro do arame e o diâmetro da gota	79
EQUAÇÃO 3.8	Frequência de pulsação com a relação entre diâmetro do arame e o diâmetro da gota	79

1 INTRODUÇÃO, OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO

1.1 Introdução

A soldagem é uma tecnologia já há muito tempo conhecida. Muito cedo na história, 3600 anos antes de Cristo [1], o ser humano desenvolveu técnicas para unir materiais e com isso aumentar a utilidade de produtos e ferramentas. A possibilidade de unir metal se transformou em um conhecimento importante para o desenvolvimento humano. A relevância desta tecnologia está até hoje presente no mundo. Tomando-se a Alemanha como exemplo, sabe-se que no ano 2003 o valor agregado pela aplicação da tecnologia de soldagem representou 3,4% da produção total neste país, o que gerou 19 bilhões de Euros por ano. Na Alemanha, 455 mil pessoas trabalham nessa atividade, ou seja, a cada 23 trabalhadores, 1 têm seu emprego relacionado aos processos de soldagem [2].

A soldagem se tornou mundialmente reconhecida por ser tecnologia chave para a engenharia mecânica, especialmente para a indústria naval, ferroviária e automotiva [3]. Para a fabricação de componentes de uma construção com alto nível de segurança e economicamente viável, muitas vezes só é possível se for utilizada a tecnologia de soldagem ou brasagem. Diversas técnicas são usadas para unir componentes metálicos, mas a soldagem e a brasagem são empregadas em 55% dos casos [4].

Grande parte deste sucesso deve-se ao processo de soldagem com eletrodo consumível sob proteção gasosa, chamado em inglês de Gas Metal Arc Welding (GMAW) [5] ou também comumente conhecido como soldagem “Metal-Incert Gas” (MIG) e soldagem “Metal-Active Gas” (MAG). O processo MIG/MAG é um dos processos de soldagem a arco mais aplicados devido às suas vantagens como a alta produtividade, a alta flexibilidade das posições de soldagem, excelente qualidade dos cordões e possibilidade de aplicação para soldagem e brasagem de vários materiais com diferentes propriedades físicas.

Em países com indústrias de tecnologia de ponta não é mais possível realizar a produção com soldagem sem utilizar o processo MIG/MAG [6].

Para atender às altas exigências de qualidade, produtividade, custo de fabricação, segurança do trabalho e adequado funcionamento das peças, a soldagem está se tornando cada vez mais mecanizada e automatizada [7].

A tendência pela automação é ainda mais enfatizada pela falta de soldadores qualificados no mercado, além do aumento do custo de mão de obra em todos os países [8]. Por causa da falta de soldadores qualificados no mercado de trabalho brasileiro, soldadores são trazidos de fora [9]. No Brasil, pequenas e médias empresas estão saindo de uma produção manual para uma produção automatizada, uma vez que buscam aumento na produção e melhoria na qualidade das peças produzidas. Especialmente para os fornecedores de peças para a indústria automobilística brasileira, que está crescendo a cada ano, a pressão pela produtividade está aumentando e chegando ao mesmo nível dos países mais industrializados do que Brasil [10]. A indústria automobilística brasileira tem potencial para aumentar ainda mais as exportações, mas com a condição de diminuir o custo de produção [11]. A demanda por equipamentos de alto nível e processos de alta tecnologia está crescendo a cada ano.

Para utilizar as vantagens da automação no processo de soldagem, soldar com uma alta qualidade e de forma contínua é necessário ter conhecimento profundo dos fundamentos da tecnologia, como por exemplo, dos efeitos da transferência do metal. A seleção cuidadosa dos parâmetros é fundamental para a segurança do processo de produção e para a redução dos custos gerados pelo retrabalho das peças.

Tem-se como exemplos de fatores importantes para a reprodutibilidade do processo MIG/MAG automatizado, as fontes de soldagem e a possibilidade da alteração dos parâmetros do processo pelas fontes.

O desenvolvimento, nos últimos 30 anos, das máquinas de soldagem, que passaram a ser eletrônicas, o que possibilita influir nas características do processo através dos módulos eletrônicos e não pelos componentes de energia das fontes de soldagem convencionais, levou à uma manipulação e variação dos parâmetros quase sem limitação.

A evolução dos componentes semicondutores aplicados no controle de fluxo de grandes potências provocou uma verdadeira revolução na fabricação das fontes de soldagem [12]. Este desenvolvimento facilitou a variação dos parâmetros.

Quase todos os fornecedores de fontes de soldagem criam novas formas de controle da transferência de metal no processo MIG/MAG, que são utilizadas em diversas aplicações especiais. Exemplos entre os processos de soldagem em baixa potência são Cold Metal Transfer® (CMT) [13] da empresa Fronius (Áustria), ColdArc® [14] da empresa EWM (Alemanha), Surface Tension Transfer® (STT) [15] da LincolnElectric (Estado Unidos).

Nos processos em alta potência tem-se ForceArc® da empresa EMW [16] e DeepArc®, da Empresa Merkle (Alemanha) [17].

Estas novas formas são ferramentas que podem melhorar as condições de automação do processo de soldagem, mas também complicar o procedimento da aplicação, por causa da possibilidade de variação dos parâmetros. Funcionários qualificados e o conhecimento profundo do processo são cada vez mais importantes para o sucesso desta tecnologia.

Mais uma tendência no desenvolvimento dos processos de soldagem é a otimização dos processos conhecidos com as novas ferramentas: as fontes eletrônicas e os novos métodos de análise. Um processo bem conhecido é o processo de transferência do metal pela corrente pulsada ou também conhecida pelo nome de arco pulsado.

O interesse no processo MIG/MAG com arco pulsado (P-GMAW) aumentou nos últimos anos [18, 19].

O desenvolvimento da tecnologia à arco pulsado foi feito no início da década de 60 na Inglaterra no Instituto de Soldagem (TWI- The Welding Institute), que tinha como objetivo soldar alumínio com gás de proteção argônio [20].

No modo de transferência pulsada, a corrente oscila entre dois níveis, um nível baixo, a corrente de base, e um nível alto, a corrente de pulso. Com uma escolha certa dos parâmetros realiza-se uma transferência do metal com uma gota por pulso quase sem respingos sobre uma grande faixa de potência e com a possibilidade de controlar o tamanho das gotas e aporte térmico na peça. A pulsação é feita pela comutação entre dois pontos de operação na fonte de soldagem. Esta comutação é conhecida como modulação de corrente. O ponto de operação é o ponto de intersecção entre a curva característica da fonte e a curva característica do arco.

No início da aplicação do processo arco pulsado, o grande número de parâmetros ajustáveis e a interação entre os mesmos, complicou a aplicação prática.

Apenas com a introdução da tecnologia de regulagem sinérgica de fontes de soldagem viabilizou-se para a tecnologia arco pulsado a possibilidade da aplicação prática [21].

A tecnologia de regulagem sinérgica facilitou a escolha dos parâmetros sobre uma relação gravada entre os diferentes parâmetros de soldagem.

Estes parâmetros são programados e testados pelo fornecedor da máquina e o usuário final só tem possibilidade de modificar os parâmetros em uma faixa pequena que não influencia

o processo de forma significativa. Ele é totalmente dependente do fornecedor e da tática de regulação.

No Brasil existem vários fornecedores de máquinas de soldagem. Em aplicações não mecanizadas e automatizadas, máquinas fabricadas no Brasil dominam o mercado. A maioria das máquinas são simples e não tem o processo de arco pulsado implantado. No mercado de fontes de soldagem para aplicações automatizadas, os equipamentos importados dominam.

Só existe um fornecedor no Brasil que fabrica máquinas com a tecnologia arco pulsado para processos automatizados. A aplicação do processo de arco pulsado no Brasil ainda é incipiente.

A motivação desta tese é apresentar as propriedades e a capacidade do processo arco pulsado na área de soldagem. Especialmente no Brasil, a tecnologia de soldagem ao arco pulsado MIG/MAG ainda é pouco aplicada na indústria, o que pode ser explicado pela falta de conhecimento dos operadores e a complexidade do processo, também a falta de fornecedores de fontes fabricadas no Brasil.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivos:

- Apresentar a influência da polaridade na soldagem com a tecnologia arco pulsado com corrente contínua;
- Apresentar a modulação I_P-U_B do processo arco pulsado com controle na fase de pulso pela corrente e com controle na fase de base pela tensão;
- Apresentar a influência dos principais parâmetros da fase de pulso, da fase de base, da frequência de pulsação na geometria do cordão da solda - largura, penetração, reforço;
- Apresentar os limites do processo para soldar em baixa potência e em alta potência.

1.3 Organização do trabalho

A presente tese está estruturada, em seis capítulos principais.

[Capítulo 1] Introdução, Objetivo e Organização – é descrita uma visão geral do trabalho com a introdução sobre a importância e possibilidades do processo de soldagem MIG/MIG pulsado, a forma de organização do trabalho e os objetivos a serem alcançados.

[Capítulo 2] Revisão Bibliográfica – são discutidos e descritos assuntos relacionados a: fundamentos de soldagem MIG/MAG, classificação da transferência do metal, influência de gás de proteção, a tecnologia de soldagem com arco pulsado e a tecnologia da filmagem de alta velocidade.

[Capítulo 3] Materiais e Metodologia – são relatados aspectos, considerados importantes, sobre os procedimentos dos ensaios e o método da pesquisa.

[Capítulo 4] Resultados e Discussão – apresenta os resultados dos ensaios e as análises dos dados obtidos.

[Capítulo 5] Conclusão – são apresentadas as conclusões do trabalho.

[Capítulo 6] Sugestões para Trabalhos Futuros – são apresentadas as sugestões para pesquisas futuras sobre o tema estudado e temas correlatos.

Finalmente, estão incluídas as Referências Bibliográficas, onde foram inseridas as referências citadas para a realização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O arco elétrico - uma ferramenta para soldagem

2.1.1 Introdução arco elétrico

Depois do desenvolvimento de fontes elétricas no início do século XIX, a primeira observação do fenômeno do arco elétrico com condições controladas foi pelo químico inglês Sir Humphrey Davy e ao mesmo tempo pelo russo W.W. Petrov. A primeira aplicação útil do arco elétrico foi como fonte de luz. Somente depois de quase 100 anos, o arco foi usado como uma fonte de calor suficiente para fundir e unir metais. As primeiras patentes para aplicações de soldagem foram registradas por Bernados e Alexander em 1885 [22].

Atualmente, o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, pois apresenta uma combinação ótima de características, incluindo uma concentração adequada da energia para fusão localizada do metal de base, facilidade de controle e baixo custo relativo ao equipamento [23].

2.1.2 Fundamentos físicos do arco elétrico

Um arco elétrico é uma forma especial de descarga de eletricidade entre dois eletrodos sustentados através de um gás ou vapor ionizado a alta temperatura. O eletrodo com pólo positivo se chama ânodo e o eletrodo com pólo negativo se chama cátodo [24].

O tipo de corrente mais usada no processo de GMAW é a corrente contínua, com eletrodo consumível conectado ao pólo positivo (ânodo) da máquina e a peça de trabalho no pólo negativo (cátodo). Neste caso, a área do cátodo é muito maior do que do ânodo. Isto provoca a típica forma cônica ou de sino do arco. O transporte da eletricidade dentro do gás ionizado só é possível se a quantidade das cargas elétricas (elétrons e íons) foi suficiente. Por causa da maior mobilidade dos elétrons, estes são responsáveis pela maior parte do transporte da corrente. A emissão dos elétrons acontece no cátodo. Diversos mecanismos podem operar e ser responsáveis para a emissão deles. Pela diferença de potencial, os elétrons são acelerados para o ânodo [25]. A relação entre tensão e corrente com um comprimento constante do arco é conhecida como característica estática. A curva característica no processo GMAW é uma função do comprimento do arco, composição do gás de proteção e material do eletrodo.

O diagrama mostrado na Figura 2.1 divide a curva característica em duas partes, a de Ayrton e a de Ohm. Para a soldagem só a parte de Ohm é usada. As curvas I , I_1 e I_2 apresentam diferentes comprimentos do arco (distância entre os eletrodos) [26].

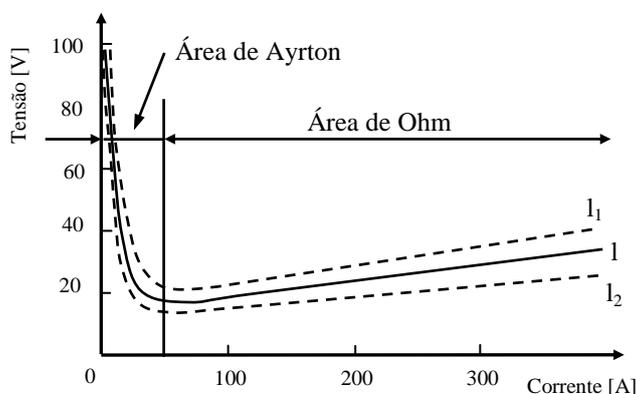


FIGURA 2.1 Diagrama esquemático, curva característica estática do arco [26]

Quanto à temperatura, o perfil transversal do arco elétrico formado no processo GMAW tem diferentes áreas de temperaturas e é dependente da composição do gás de proteção usado. A temperatura máxima na alma do arco pode chegar à 20.000K, como se observa na Figura 2.2 [27].

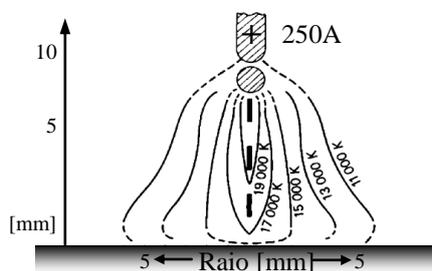


FIGURA 2.2 Diagrama esquemático de temperatura de um arco MIG de alumínio com 250A sem consideração da influência do vapor do metal [27]

2.2 Processo de soldagem com arame sólido sob proteção gasosa

2.2.1 Definição de soldagem com arame sólido sob proteção gasosa

Soldagem com arame sólido sob proteção gasosa ou, em inglês, Gas Metal Arc Welding (GMAW) é o nome para o processo de soldagem em que, um arco elétrico, em um gás de proteção ionizado, é estabelecido entre um eletrodo consumível (metal de adição), o qual está sendo alimentando continuamente, e uma peça de trabalho (metal de base).

O arco elétrico é a fonte de calor usada para fundir uma pequena parte do metal de base e do metal de adição (eletrodo consumível). O metal sendo transferido, o arco e a poça de fusão são protegidos contra oxidação sob um gás de proteção adicional [28,29]. A Figura 2.3 ilustra esquematicamente o processo [30].

O equipamento principal é composto por uma máquina de soldagem, um alimentador de arame com um reservatório de metal de adição, uma tocha de soldagem e cilindros de gás de proteção. Dependendo do metal de base, são usados gases inertes ou gases ativos. Conseqüentemente é possível diferenciar o processo GMAW em soldagem com proteção gasosa inerte - MIG, sigla do inglês Metal Incert Gas e soldagem com proteção gasosa ativa – MAG, sigla do inglês Metal Active Gas [23, 31].

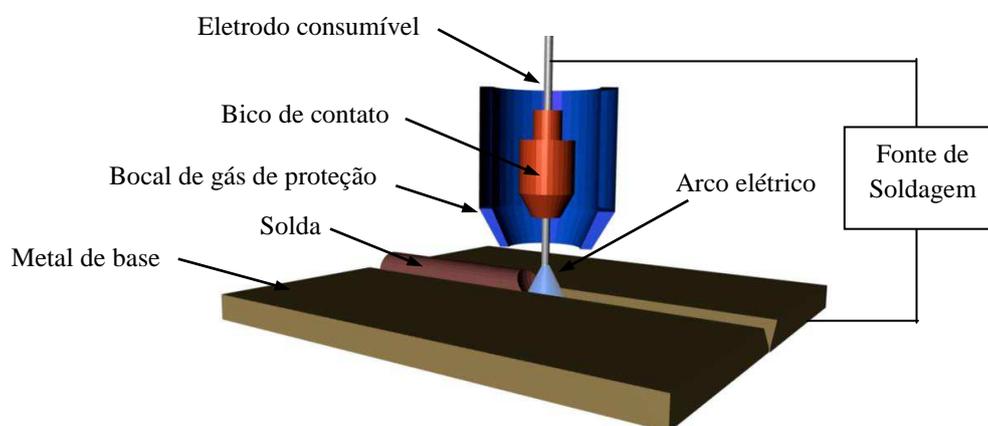


FIGURA 2.3 Soldagem com arame sólido sob proteção gasosa (Representação esquemática) [30]

A distância entre a extremidade do bico de contato e a extremidade do arame em contato com o arco é definida como stickout (Figura 2.4). Como é difícil de fazer a medição deste comprimento com o arco aberto, toma-se o stickout como sendo a distância da extremidade do bico de contato à peça, que também é chamada de distância bico de contato-peça (DBCP) [23].

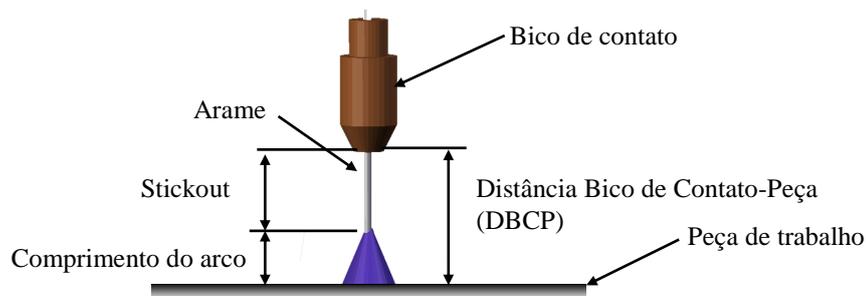


FIGURA 2.4 Distância Bico de Contato-Peça (DBCP)

2.2.2 Ignição do arco elétrico no processo GMAW

A ignição do arco no processo GMAW é um momento importante, especialmente no processo na soldagem automatizada. A demora ou a instabilidade da abertura pode provocar defeitos. Farson et al. [32] apresentaram dois tipos característicos de abertura do arco, a explosiva e a suave.

A maneira mais comum, por causa da simplicidade do equipamento necessário, é a ignição tipo explosiva com um curto-circuito. O arame é alimentado na direção da peça de trabalho até tocar a superfície. Com o toque, um curto-circuito é gerado. A corrente no circuito de soldagem sobe e, por causa do efeito Joule, a temperatura do arame (na parte do arame entre bico de contato e peça de trabalho) sobe até uma parte do arame explode, vaporiza e ioniza o gás de proteção para criar um arco elétrico. Esse procedimento pode se repetir várias vezes até um arco estável ser gerado [33]. A desvantagem é que a cada vez que ocorre a explosão do arame, um pedaço dele sai da área do arco em forma de respingo [34].

A outra maneira de ignição, a suave, é mais utilizada na soldagem automatizada (soldagem com robô) por causa do um sistema de alimentação do arame ser especial. Adicionalmente, a tocha de soldagem precisa ser equipada com mais um alimentador no punho. O arame é alimentando com uma velocidade baixa na direção da peça de trabalho até tocar na superfície. A máquina de soldagem observa o toque e troca a direção de alimentação, puxando o arame. A máquina usa uma tensão para ionizar o gás de proteção entre arame e a peça de trabalho. A distância aumenta, portanto o comprimento do arco, até chegar a um valor da tensão programado. O arco é estabelecido e o processo de soldagem pode iniciar. Finalmente, a máquina de soldagem troca os parâmetros de ignição para os parâmetros de soldagem [35].

A ignição do arco é influenciada pelas características físicas dos gases de proteção.

2.2.3 Gás de proteção, propriedades e misturas para soldagem

Entre outras, a função primária do gás de proteção é proteger o material fundido do arame, a poça de fusão e o arco elétrico, contra elementos da atmosfera, como, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, os quais provocam efeitos nocivos, como formação de poros, defeitos de fusão, excesso de óxidos, inclusões e trincas. Com o gás de proteção é possível manipular e otimizar o processo de soldagem para determinadas aplicações, por exemplo, pelo aumento da velocidade de soldagem [36, 37]. Por causa disto, a escolha do gás de proteção é importante

para o processo de soldagem. Os gases influem em várias características do arco, na transferência do metal, na penetração e perfil do cordão da solda, no aspecto superficial da solda, na escolha da velocidade de soldagem e nas propriedades mecânicas da solda [38, 39].

Para escolher os gases de proteção para o processo de soldagem, é importante conhecer as suas propriedades físicas tais como densidade, potencial de ionização ou dissociação e condutividade térmica e elétrica [40]. A Tabela 2.1 apresenta várias propriedades de diferentes gases.

TABELA 2.1 Propriedades dos diferentes gases [41]

Gás	Característica	Densidade [g/l]	Potencial de ionização [eV/Molécula]	Energia de dissociação [eV/Molécula]
Hélio (He)	Inerte	0,17	24,6	-
Argônio (Ar)	Inerte	1,66	15,8	-
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Ativo	1,85	14,4	4,3
Hidrogênio (H ₂)	Ativo	0,08	13,6	4,5
Oxigênio (O ₂)	Ativo	1,85	13,6	5,1

A densidade do gás de proteção tem influência na taxa da vazão de gás de proteção, afetando a posição de soldagem. Gases de alta densidade precisam uma maior vazão de gás de proteção na posição de soldagem sobre cabeça para garantir uma proteção do arco e da poça de fusão eficiente.

A ignição e a estabilidade do arco são fortemente influenciadas pelo potencial de ionização dos gases de proteção, que é a diferença de potencial necessária para remover um elétron de um átomo de gás, tornando este um íon. Gases com baixo potencial de ionização têm seus átomos mais facilmente transformados em íons.

A energia de dissociação é a energia qual está liberada na recombinação. Quando gases moleculares são ionizados eles têm íons livre. Estes íons podem voltar a recombinar-se para dar origem ao composto original e liberar energia adicional sob a forma de calor [42].

A condutividade térmica e elétrica do gás de proteção são propriedades físicas importantes. Elas influenciam significativamente a transferência metálica, as características geométricas e a microestrutura do perfil de penetração na soldagem GMAW [43]. A condutividade térmica está relacionada com a capacidade de transferência do calor gerado pelo arco para o metal de base. Ela varia em função da temperatura. Gases de alta condutividade térmica transferem mais calor para o metal de base, mas podem aumentar a resistência do arco e, portanto, provocar um aumento na tensão do arco. A Figura 2.5 apresenta a condutividade elétrica e condutividade térmica dos diferentes gases em função da temperatura.

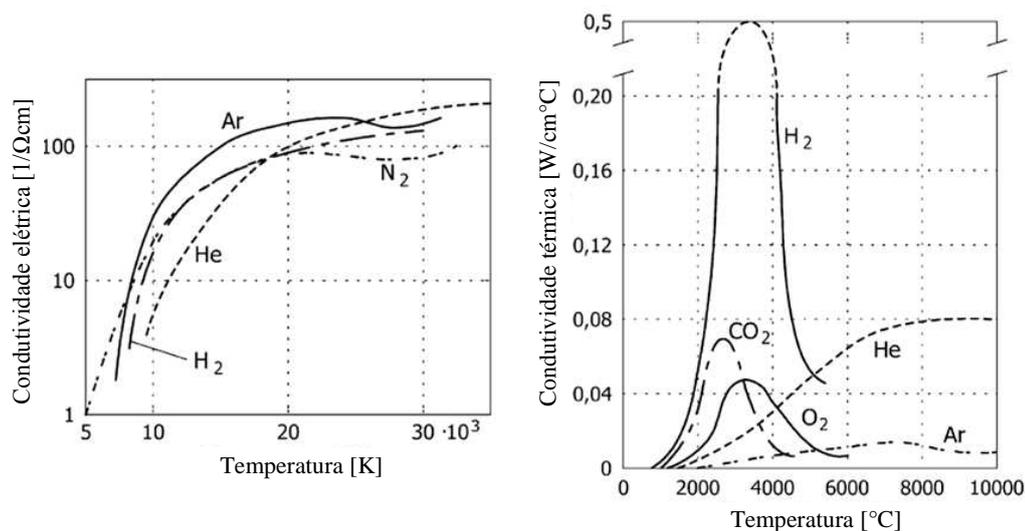


FIGURA 2.5 Condutividade elétrica e condutividade térmica de alguns gases [44]

Os gases utilizados no processo MIG/MAG podem ser inertes, ativos ou misturas de gases inertes com gases ativos. Normalmente são usadas misturas de dois ou três gases (argônio, hélio, dióxido de carbono ou oxigênio) com uma grande porcentagem de argônio [45].

A aplicação de soldagem define o gás de proteção necessário. Os gases inertes, que não reagem com metal de adição e de base são usados para metais não ferrosos, por exemplo, para soldagem de alumínio e magnésio. Gases ativos, os quais reagem com metal de adição e de base, são usados, por exemplo, na soldagem e brasagem de aço comum e aço inoxidável.

Gases inertes utilizados no processo MIG são o argônio e o hélio ou misturas deles. Por causa das propriedades físicas e da disponibilidade e custo no mercado, o argônio é o gás de proteção inerte mais utilizado.

O argônio (Ar) é um gás não tóxico. Pela facilidade de liberar elétrons, representado por seu baixo potencial de ionização (15,8eV/Molécula), o argônio possibilita um arco muito estável em baixas correntes e permite uma ignição do arco fácil. Ele possibilita a transferência por spray em correntes mais baixas e forma um cordão com penetração estreita no centro, conhecida como penetração em dedo (finger). O baixo potencial de ionização e baixa condutividade térmica provocam também desvantagens como baixa energia no arco e, portanto, menor penetração e aparecimento de mordeduras. Argônio puro é desvantajoso na soldagem de aços. Misturas à base de argônio com gases ativos, como dióxido de carbono ou oxigênio são mais aplicadas.

O gás hélio (He) é mais leve que o ar, o que exige, em relação ao argônio, uma maior vazão de gás de proteção para garantir a proteção adequada na posição de soldagem plana. Por causa do preço no mercado, raramente hélio puro ou gases com percentagem com mais de 70% hélio são utilizadas na soldagem. Misturas de argônio com 15%, 30% ou 50% de hélio são mais usadas. A adição de hélio no gás de proteção aumenta a condutividade térmica e o potencial de ionização. Assim, para manter um arco com mesmo comprimento tensões mais altas são necessárias. Soldas feitas com misturas de hélio apresentam um perfil mais arredondado e uma penetração maior. Nas aplicações de soldagem MAG as misturas de gás de proteção com base argônio, hélio e dióxido de carbono são mais comuns.

Dióxido de carbono (CO_2) e misturas com ele são muito usados no processo de soldagem MAG. O menor custo em relação aos gases inertes e a característica de boas condições de penetração estimulam o seu uso, mas usar CO_2 puro pode provocar maiores custos depois de soldagem, provocados pela necessidade de limpeza de respingos mais intensos e da instabilidade do arco [46]. Dióxido de carbono é um gás oxidante acima de 600°C , embora seja relativamente inerte na temperatura ambiente. Assim é um gás ativo nas temperaturas de soldagem, o que faz com que, durante a soldagem, ocorra maior oxidação dos elementos de liga. Nas altas temperaturas do arco, o dióxido de carbono dissocia endotermicamente em monóxido de carbono (CO) e oxigênio livre (O) e recombina na poça de fusão exotermicamente. O oxigênio forma óxidos que são liberados da poça de fusão, na forma de escória ou carepa e de inclusões. A quantidade e a composição da escória são dependentes da combinação gás de proteção e arame. Nas combinações comuns, a composição da escoria é de óxido de manganês e silício com característica de vidro, que se localiza sobre a superfície do cordão e que deve ser removida antes de outros processos, como a pintura da peça [47].

A baixa condutividade elétrica do CO_2 provoca um arco instável e um modo de transferência do metal para a poça de fusão mais violento com uma alta quantidade de respingos. A quantidade de CO_2 na mistura de gás de proteção muda a corrente de transição como apresentado na Tabela 2.2 [48].

TABELA 2.2 Corrente de transição para arames de aço [48]

Diâmetro do arame [mm]	Composição do gás de proteção		
	Ar+5%CO2	Ar+15%CO2	Ar+20%CO2
0,8	140A	155A	160A
1,0	180A	200A	200A
1,2	240A	260A	275A
1,6	280A	280A	280A

Com o aumento da quantidade de CO_2 na mistura de gás de proteção, a corrente de transição aumenta e dificulta a transferência do metal. A condutividade elétrica do dióxido de carbono aumenta com a temperatura e uma coluna com alta condutividade elétrica está formada no centro do arco, a qual transporta uma grande quantidade de corrente, como apresentado na Figura 2.6c.

Com o aumento da quantidade do CO_2 a concentração de elétrons na ponta do eletrodo aumenta e forma um arco pontual, com uma maneira diferente do que com argônio. A Figura 2.6a apresenta o arco com argônio e a Figura 2.6b o arco com gás de proteção dióxido de carbono. Altas quantidades de CO_2 atuam contra a transferência do metal.

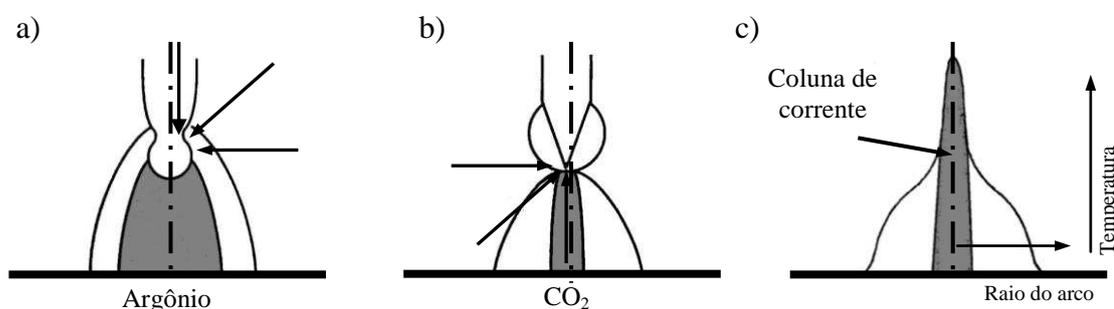


FIGURA 2.6 a) concentração de corrente no arco com argônio, b) concentração de corrente no arco com CO_2 e c) temperatura e coluna de corrente no arco com CO_2

Na soldagem MAG também misturas de argônio e oxigênio são utilizadas. Oxigênio puro não é usado como gás de proteção. Ele é duas a três vezes mais oxidante do que dióxido de carbono. A adição de oxigênio no gás de proteção melhora as características do arco elétrico e aumenta a molhabilidade da poça de fusão pela redução da tensão superficial do metal de solda. A adição de 1 a 8% de oxigênio melhora a estabilidade do arco elétrico, aumenta a taxa de deposição, abaixa a corrente de transição para o modo spray e reduz a formação de respingos. Com o aumento de O_2 no gás de proteção, aumentam também as perdas de elementos de liga [47].

O fluxo do gás é dependente de vários fatores, como por exemplo, diâmetro do bocal, posição de soldagem, densidade do gás, distância entre bico de contato e peça de trabalho, velocidade de soldagem e valor da corrente de soldagem. Deve ser adequado, evitando o escoamento turbulento, e não deve haver orifícios que permitam entrada de ar no fluxo. Normalmente em soldagem MIG/MAG a vazão do gás de proteção fica entre 12 l/min e 22 l/min [37].

2.2.4 Forças na transferência do metal

No arco elétrico, tanto no lado do eletrodo quanto da peça de trabalho, agem várias forças. A transferência do metal é controlada por estas forças. Forças que podem atuar são: a força da gravidade (F_g), a tensão superficial (F_γ), a força eletromagnética (F_{em}), a força de arraste (F_a) e a força de reação (F_v). A Figura 2.7 apresenta esquematicamente as forças na transferência do metal [49].

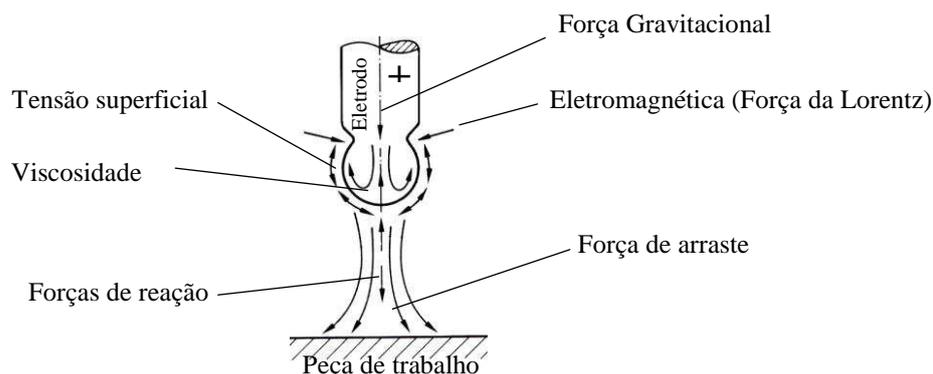


FIGURA 2.7 Forças na transferência do metal [50]

Sobre o mecanismo de transferência do metal no processo GMAW existem diferentes teorias. Uma baseada no Equilíbrio Estático de Forças (EEF) e outra baseada na Instabilidade como decorrência do Efeito Pinch (IEP) [49, 51, 52].

A teoria Equilíbrio Estático de Forças (EEF) descreve o mecanismo de transferência a partir do balanço das forças atuantes sobre uma gota pendente na extremidade do eletrodo e é definido pela soma vetorial das forças que atuam na transferência das gotas (forças positivas) e aquelas que atuam contra a transferência das gotas no eletrodo (forças negativas). A transferência da gota ocorrerá quando:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad (2.1)$$

Por causa da força gravitacional, a transferência do metal pode ser afetada dependendo da posição de soldagem, positiva ou negativamente. Na posição plana, a gravidade ajuda a transferir o metal fundido do eletrodo (a gota) para a poça de fusão. Na posição sobre-cabeça, a força age contra a transferência e é mais uma força a vencer. Ela ganha importância com o tamanho da gota. Para aplicações na soldagem com arco pulsado com gotas menores do que ou quase do diâmetro do arame, a força gravitacional não é importante para a transferência do metal [53].

Na posição de soldagem plana, uma gota de massa (m) será acelerada pela gravidade (g). Como a gota mantém uma geometria aproximadamente esférica e as propriedades termo-físicas do material não mudam durante seu crescimento, a força gravitacional (F_g) pode ser expressa na forma:

$$F_g = \frac{4}{3}\pi * R_G^3 * \rho * g \quad (2.2)$$

onde R_G [m] é o raio da gota, ρ [kg/m³] é a densidade do material e g [m/s²] é a aceleração da gravidade na posição de soldagem plana.

A força da tensão superficial é uma força importante para a transferência do metal. Dependendo do modo de transferência metálica, ela pode ser essencial, como por exemplo, na transferência por curto-circuito. Na transição entre dois meios diferentes, a região de contato entre ambos é caracterizada por uma camada de átomos que estão submetidos a uma força direcionada ao interior do volume a que pertencem. Esta força atua no sentido de reduzir ao mínimo a energia superficial livre, o que no caso de líquidos, os leva a assumir a forma esférica, que é a de menor área superficial para um determinado volume [54]. Por causa deste efeito, a gota de metal fundido no eletrodo se forma esfericamente para ter a área superficial menor com maior volume. A tensão superficial é dependente da temperatura, composição química do material e gás de proteção. A Figura 2.8 apresenta a dependência da tensão superficial com a quantidade de oxigênio no gás de proteção.

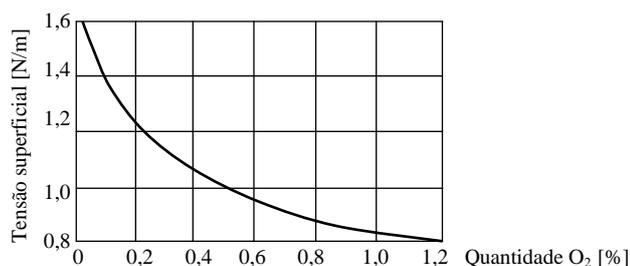


FIGURA 2.8 Força da tensão superficial depende da quantidade de oxigênio no gás de proteção na uma solda de aço [25]

Na transferência por arco pulsado, na primeira fase do estrangulamento da gota, F_γ age contra a transferência do metal, mas na ultima fase de estrangulamento, se a gota esta quase sendo liberada do eletrodo, ela ajuda a transferência. Kim e Eagar [55] utilizaram nos seus trabalhos a Equações 2.3, para estimar os valores da tensão superficial.

$$F_\gamma = 2\pi * r_a * \gamma \quad (2.3)$$

Onde é r_a [m] raio do arame e γ [N/m] a tensão superficial.

A força de arraste ocorre por causa do fluxo do gás de proteção. Ela é dependente da velocidade de fluxo e do tamanho das gotas. Nas aplicações comuns, esta força não influi na transferência do metal significativamente.

$$F_a = C_a * A_p \left(\frac{\rho_f V_f^2}{2} \right) \quad (2.4)$$

Em que: C_a - Coeficiente de arraste do sistema, A_p área projetada da gota [m^2], ρ_f - densidade do material [kg/m^3] e V_f - a velocidade do gás de proteção.

Durante de soldagem com altas correntes pode acontecer uma vaporização do metal na superfície da gota, na área de contato com o arco. Uma aceleração térmica do vapor metálico na coluna de plasma resulta em uma força contra da transferência da gota para a poça de fusão. Norrish e Richardson declararam que a força de reação somente é significativa em altas correntes. A força de reação (F_v) pode ser expressa na forma:

$$F_v = \frac{m_0}{\rho_v} * I * J \quad (2.5)$$

Em que: m_0 - massa vaporizada por volume por ampère, ρ_v - densidade do vapor, I - corrente, J - densidade de corrente.

Em todos os fios elétricos onde passa corrente age uma força eletromagnética. Esta força se chama força de Lorentz, denominada pelo físico H. A. Lorentz. No processo de soldagem é conhecida como responsável pelo "Efeito Pinch". A força de Lorentz pode ser expressa na forma:

$$F_L = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.6)$$

Em que: J - a densidade de corrente, B - indução magnética.

Um modelo para entender esta força é: um eletrodo de soldagem é um arame com muitos fios e pode ser visto como vários pequenos condutores (Figura 2.9a). Condutores por onde passa a corrente na mesma direção têm um efeito de atração.

A componente radial desta força, sempre direcionada para o centro do condutor. Este efeito realiza o efeito de estrangulamento do material fundido do eletrodo, (Figura 2.9b) [56].

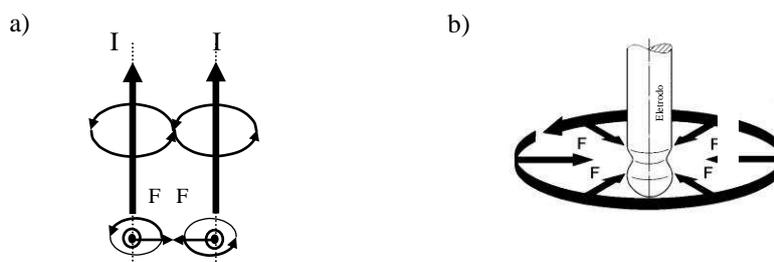


FIGURA 2.9 Efeito Pinch a) dois fios onde passa a corrente na mesma direção e b) eletrodo de soldagem com efeito de estrangulamento [56]

Amson [57] relatou que o valor de F_L é dependente da sua forma geométrica. No caso do diâmetro da gota ser igual ao diâmetro do eletrodo a força é dada por:

$$F_{em} = \frac{\mu_0}{4\pi} * I^2 * F_L(\beta) \quad (2.7)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre, $F_L(\beta)$ é o coeficiente do Lorentz e representa a influência geométrica. A Figura 2.10 apresenta o coeficiente dependente da geometria das gotas.

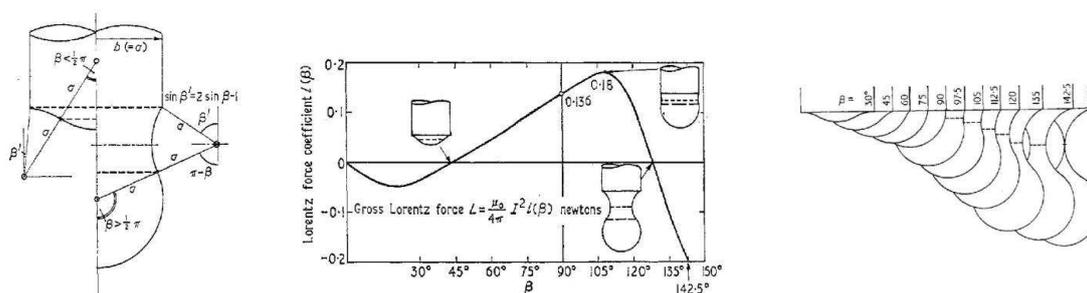


FIGURA 2.10 Coeficiente de Lorentz dependente da geometria das gotas [57]

O "Efeito Pinch" é muito importante para a transferência do metal no processo de soldagem sob proteção gasosa com arco pulsado. A transferência só é possível se um valor de corrente crítica é ultrapassado. Se este valor crítico não foi ultrapassado as forças de estrangulamento não serão suficientes para liberar a gota de metal fundido do eletrodo. O valor é dependente do material.

2.2.5 Classificação da transferência do metal

A transferência do metal de adição no processo de soldagem pode ser descrita como o transporte de gotas fundidas da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão.

A característica da transferência do metal influencia diversos aspectos operacionais do processo, por exemplo, a posição de soldagem, a característica do cordão, a quantidade de respingos, formação de fumos, a estabilidade e o desempenho operacional do processo [58].

O tipo da transferência do metal é determinado pelos vários parâmetros do processo como a corrente e a tensão do arco, a característica do metal de adição, a polaridade, o gás de proteção e o comprimento do arco [59,60]. A primeira classificação da transferência do metal no processo de soldagem ao arco elétrico foi apresentada 1976 por Anon [61] na comissão XII do Instituto Internacional de soldagem (International Institute of Welding - IIW). Ele classificou três modos principais, a queda livre (Free Flight Transfer), por curto-circuito/ por contato (Bridging Transfer) e uma terceira maneira foi definida para processos com transferência com proteção pela escória (Slag Protected Transfer). A Tabela 2.3 apresenta esta classificação como apresentada por Lancaster [49].

TABELA 2.3 Formas de transferência IIW [62]

Tipo de transferência		Processo de Soldagem		
1	Queda Livre	Globular	Globular	GMAW - baixa corrente
			Repelida	GMAW com proteção de CO ₂
		Goticular ou Aerossol	Projetado	GMAW - corrente intermediária
			Com Alongamento	GMAW - corrente média
			Rotacional	GMAW - corrente elevada
	Explosiva		SMAW (eletrodos revestidos)	
2	Por Contato	Curto-Circuito		GMAW - arco "curto"
		Contínua		GTAW com alimentação contínua
3	Protegida por Escória	Guiada pela parede		SAW
		Outros modos		SMAW, FCAW, ESW, etc

A transferência curto-circuito é caracterizada por corrente e tensão baixa com um pequeno comprimento do arco. O nome curto-circuito foi associado com o mecanismo de transferência, a formação de uma ponte com curto-circuito entre o eletrodo e da poça de fusão. A transferência queda livre foi associada ao mecanismo de transferência em queda livre da gota atrás do plasma para a poça de fusão. Dependente da densidade de corrente, diferentes tipos da transferência são formados. Os desenvolvimentos, nas últimas três décadas, do controle de fontes de soldagem do processo GMAW possibilitaram um controle da transferência do metal mais preciso e causou uma revisão da classificação. Tabela 2.4 e Tabela 2.5 apresentam a classificação da transferência do metal de acordo com a classificação por Norrish [63] e Lucas [64].

TABELA 2.4 Classificação da transferência metálica [63]

Tipo de transferência			Aplicação	Nome comercial
1	Aerossol Controlado	Arco Pulsado	GMAW com frequência de pulso variável	
2	Curto-Circuito Controlado	Curto-Circuito controlado pela corrente	GMAW com corrente controlado	STT
		Curto-Circuito controlado pela alimentação do arame	GMAW com alimentação do arame oscilado	CSC, CMT

TABELA 2.5 Classificação da transferência metálica avançada [64]

Tipo de transferência			Aplicação	Nome comercial
1	Curto-circuito	“stickout” prolongado	Alta taxa de deposição com curto-circuito	Rapidarc TM
		Pulsado de baixa frequência	Preencher uma fresta com pulsação da corrente principal	
2	Transferência pulsada	Multi-fio	Soldagem multi-fio	
		Pulsado de baixa frequência	Soldagem de alumínio com transferência pulsada modificado	Synchropulse TM
		Polaridade variável	Soldagem chapas finas e passe de raiz com acesso de um lado só	
3	Transferência aerossol	Rotacional (Rotating)	Corrente elevada com “stickout” prolongado	T.I.M.E. TM Rapidmelt TM
		Eletrodo negativo	Guiada por parede de fluxo ou misturas de gases especiais	
		“stickout” prolongado	Soldagem de aço com alta taxa de deposição	
		Polaridade variável	Soldagem de passe de raiz (tubos)	

De um modo geral, de acordo com Lucas [64], é possível classificar a transferência de metal de adição no processo GMAW em curto-circuito, transferência pulsada e transferência aerossol.

2.2.5.1 Transferência do metal por curto-circuito

A transferência por curto-circuito ocorre com um comprimento do arco elétrico curto e valores da tensão e corrente baixas. Por causa da baixa energia, esta forma de transferência é muito aplicada na soldagem de chapas finas e na soldagem fora da posição plana. O metal é transferido do eletrodo para a peça de trabalho quando o eletrodo entra em contato com a poça de fusão através de uma ponte de metal líquido. As forças dominantes que controlam a transferência por curto-circuito são a tensão superficial e forças eletromagnéticas. Figura 2.11 ilustra a transferência do metal, juntamente com oscilogramas esquemáticos de corrente e tensão associados a este tipo de transferência. As etapas principais deste tipo de transferência são: Fase1- A alimentação do arame é contínua na direção da peça de trabalho. O arco está aberto e está fundindo a ponta do eletrodo. Fase2- A gota está crescendo e aproxima-se da poça de fusão. A tensão abaixa por causa da redução da distância. Fase3- A gota toca na poça de fusão. O arco é extinto e existe uma ponte de curto-circuito.

A transferência do metal de adição para poça de fusão ocorre e a corrente aumenta até explodir a ponte de curto-circuito. Fase4– A transferência do metal foi feita, ocorre a re-ignição do arco, e o arco está novamente aberto. A frequência do curto-circuito é entre 60 e 80Hz. Este modo de transferência apresenta a formação intensa de respingos [65,66].

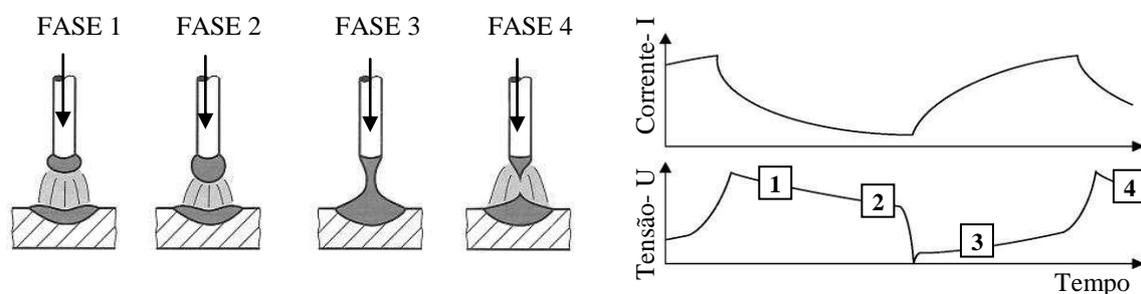


FIGURA 2.11 Transferência por curto-circuito [36]

2.2.5.2 Transferência do metal por arco controlado pulsado

O modo de transferência pulsado é característica pela oscilação entre uma corrente baixa, chamada corrente de base, e uma corrente alta, chamada corrente de pico ou corrente de pulso. Depois da ignição, o arco fica sempre aberto, sem formação de curtos-circuitos. Na Figura 2.12 pode-se visualizar a forma teórica de uma onda por corrente pulsada. Fase1- A corrente de base serve principalmente para manter o arco aberto e pré-aquecer o material de base e do eletrodo. Fase2- A subida da corrente para o nível de corrente de pulso. Fase3- O estrangulamento do material fundido na ponta de eletrodo. Fase4- A descida da corrente e separação da gota do eletrodo. Fase5- A gota foi transferida para a poça de fusão [67].

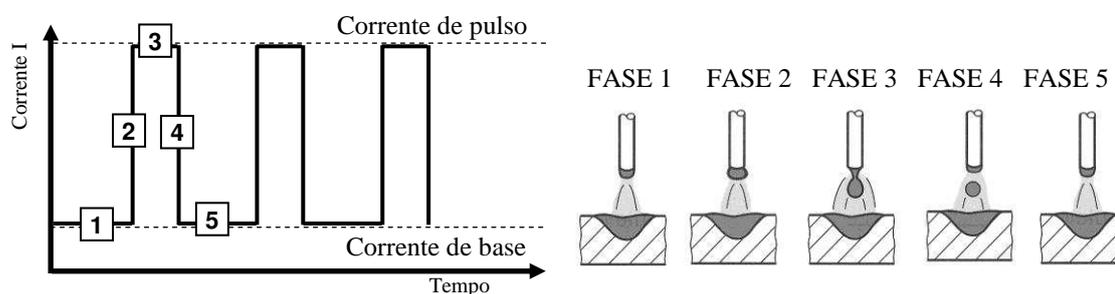


FIGURA 2.12 Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal esquemático [66]

2.2.5.3 Transferência do metal por arco spray (aerossol)

O modo da transferência por spray ocorre com uma alta velocidade de alimentação do arame e com uma alta tensão. A transferência do metal ocorre sem formação de curtos-circuitos, com gotas muito menores do que o diâmetro do arame. A Figura 2.13 apresenta esquematicamente a transferência com gotas muito finas. Os diagramas da tensão e correntes são muito estáveis neste processo. Por causa da alta energia no processo, o arco spray é mais aplicável para soldagem de chapas grossas e nas posições plana e horizontal [68].

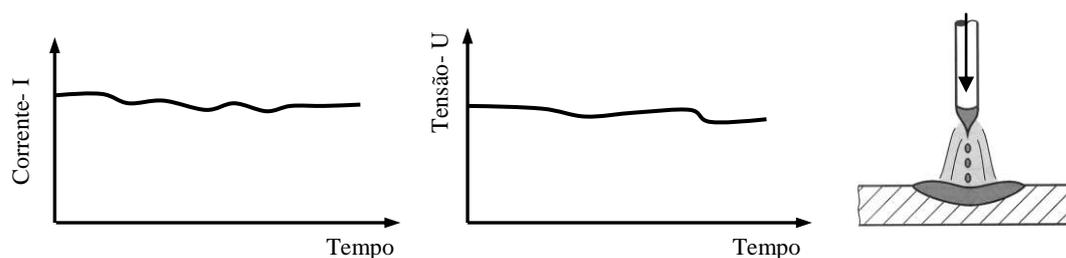


FIGURA 2.13 Transferência do metal no modo spray esquemático [66]

2.2.6 Problemas durante a operação do processo de soldagem MIG/MAG

Existem várias problemas durante a operação do processo de soldagem, as quais podem dificultar a aplicação do processo MIG/MAG. Estas podem ser [69]:

- Formação de respingos;
- Perda de componentes da liga causada pelo sobreaquecimento e vaporização;
- Formação de fumos;
- Emissão de som (Transferência pulsada).

O problema mais influente para o processo é a formação de respingos. A definição de respingos de soldagem é “gotas metálicas de metal de adição que não são transferidas a poça de fusão ou gotas de metal de base que saem na poça de fusão [22]”. Respingos podem ser formados durante a formação de gota no eletrodo, na transferência metálica ou na poça de fusão [70]. A diferença entre respingos e gotas é definida pela utilidade para a formação da poça de fusão.

Respingos prejudicam a rentabilidade e a qualidade de um processo de soldagem gravemente. De um lado, eles podem provocar uma grande perda de metal de adição e por outro lado podem provocar custos de retrabalho e não menos importante, a segurança de trabalho, por exemplo, fogo no equipamento ou queimaduras no soldador [71]. Grandes respingos com temperaturas altas, que chegam no estado líquido à superfície da peça de trabalho e aderem à sua superfície, precisam ser removidos. Eles podem provocar corrosão ou falta de fusão na solda. Respingos que saem na direção da tocha podem prejudicar a vazão de gás de proteção e provocar porosidade na solda.

A formação de respingos é relatada em várias pesquisas [72 -74]. Os mecanismos principais de formação podem ser:

- Na situação de curto-circuito entre o eletrodo e a poça de fusão, a alta densidade de corrente explode a ponte de metal de adição fundido e projeta a gota para fora;
- Elementos de liga no metal de adição com baixo ponto de fusão podem vaporizar e explodir a gota;
- Na soldagem com gás de proteção com alta quantidade de dióxido de carbono, recombinação do gás na poça de fusão pode puxar a gota para cima e dificultar o estrangulamento;
- Altas frequências de transferência do metal no processo arco pulsado podem provocar a oscilação da poça de fusão e provocar a ejeção de gotas da poça de fusão.

2.3 A tecnologia de soldagem com arco pulsado

2.3.1 Introdução a tecnologia de arco pulsado

O desenvolvimento da tecnologia de arco pulsado foi feita no início da década de 60 na Inglaterra pelo Instituto de Soldagem (TWI- The Welding Institute) com objetivo de soldar alumínio com gás de proteção argônio [75], sendo Needham referenciado como o seu inventor por Norrish [76].

A idéia inicial é mudar a corrente (energia) com uma certa frequência durante do processo entre dois níveis. Um nível de alta energia na faixa de corrente para transferência do metal por spray e um nível de baixa energia como transferência por curto-circuito, para controlar a energia durante do processo e provocar um transferência controlada sem respingos.

O objetivo é transferir, com cada pulso da corrente, uma gota de metal fundido do eletrodo para a poça de fusão, também conhecida como UGPP – uma gota por pulso.

As vantagens principais do processo são [77]:

- Aplicável numa larga faixa de potência de soldagem, para chapas finas e grossas;
- Soldagem e brasagem de vários materiais como, por exemplo, aço comum, aço inoxidável e alumínio;
- Transferência do metal sem curto-circuito e sem formação de respingos;
- Alta qualidade das propriedades mecânicas e das características visuais da solda;
- Possibilidade de reduzir a energia dentro do processo em comparação com arco spray;
- Aumento da velocidade de soldagem em comparação com transferência por curto-circuito e globular;
- Aplicação de arames com maior diâmetro na soldagem de chapas finas.

A tecnologia de arco pulsado possibilita a utilização de arames de maior diâmetro do que o comum para chapas finas do que a transferência por curto-circuito ou globular. Isto facilita a alimentação do arame no processo, em especial de arames de alumínio. Mais uma vantagem de arames de maior bitola é a redução do coeficiente de superfície por volume. A Figura 2.14 apresenta o coeficiente de superfície por volume do arame. O coeficiente é menor em arames de maior diâmetro. Isto significa menor interação do arame com o ambiente, por exemplo, na soldagem de alumínio menos formação de óxido alumínio em relação ao volume e menos oxido na superfície do arame.

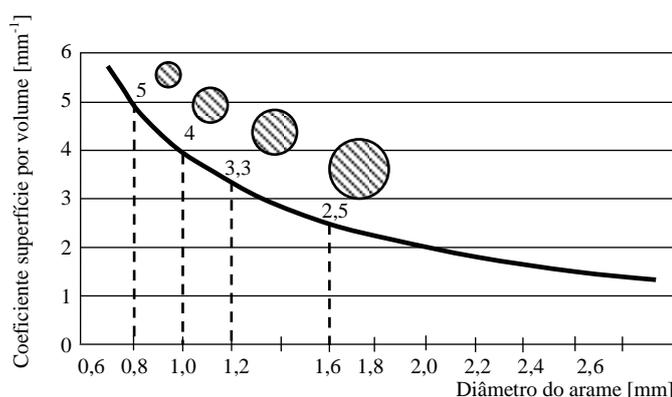


FIGURA 2.14 Coeficiente de superfície por volume do arame

As desvantagens do processo são, em especial, a complexidade, o número dos parâmetros e o custo muito mais alto do equipamento (máquina e tocha de soldagem). Para aplicações com alto ciclo de trabalho, tochas refrigeradas a água são necessárias para agüentar um ciclo de trabalho alto.

No início, a tecnologia transferência pulsada não foi aplicada na indústria, por causa da dificuldade do ajuste da grande quantidade dos parâmetros de soldagem. Apenas a introdução da tecnologia sinérgica possibilitou a aplicação industrial [78].

2.3.2 Soldagem sinérgica com arco pulsado

As principais formas de transferência metálica na soldagem GMAW são: curto-circuito, aerossol (spray) e transferência pulsada. Para todos estes modos é necessário ajustar os parâmetros mais relevantes como, por exemplo, tensão e velocidade da alimentação do arame.

A maneira convencional de ajuste é experimental e consegue-se assim diferentes combinações de tensão e velocidade de alimentação. Para os modos de curto-circuito e arco spray este ajuste é rapidamente conseguido. Para o modo de arco pulsado é necessário ajustar um grande número de parâmetros, exigindo um soldador com grande experiência e, mesmo assim, precisa-se de um tempo longo para achar parâmetros adequados. Para processos automatizados e semi-automatizados este procedimento não é aceitável por causa da variação da qualidade dos resultados.

Na década 80, o Instituto de Soldagem TWI desenvolveu um sistema de controle e de gravação dos parâmetros. O sistema é conhecido como soldagem MIG Sinérgica (Synergic MIG welding). No contexto de soldagem MIG, sinérgica significa trabalhar junto, ou seja, os parâmetros de pulso trabalham em conjunto com a velocidade de alimentação do arame. No processo arco pulsado sinérgico, a velocidade de arame é relacionada aos parâmetros principais como frequência de pulsação, duração do pulso, corrente/ tensão do pulso. Apenas com a seleção da velocidade do arame a máquina regula todos dos outros parâmetros necessários. Por causa deste sistema, as máquinas de soldagem sinérgicas só precisam de um controle para ajustar os parâmetros principais (velocidade de alimentação do arame) permitindo também chamar o equipamento de "com ajuste em um único controle" (one-knob-machine) [78]. Para as diferentes aplicações, somente é necessário escolher o gás de proteção, diâmetro do arame, material de adição e velocidade de alimentação.

A fonte tem, considerando estas informações, um programa com todos os parâmetros de soldagem gravados para cada velocidade do arame. Com este sistema é possível programar diferentes parâmetros para a ignição do arco, a soldagem e o fim da soldagem.

Esta tecnologia da fonte sinérgica simplificou muito a seleção dos parâmetros do processo com arco pulsado e melhorou a possibilidade de aplicação em sistemas automatizados e semi-automatizados. Atualmente o sistema sinérgico é aplicado em basicamente todas as máquinas industriais de soldagem com arco pulsado. Os parâmetros são programados pelo fabricante da fonte. As curvas de parâmetros (pontos de operação), por exemplo, para uma área de trabalho de 1 até 15m/min de velocidade de arame, são testados em 5 pontos de operação, significando que parâmetros para 5 aplicações ($V_A = 2, 3, 4, 10, 15$ m/min) são verificados e, entre os pontos, um programa faz uma interpolação, como apresentado na Figura 2.15 [79].

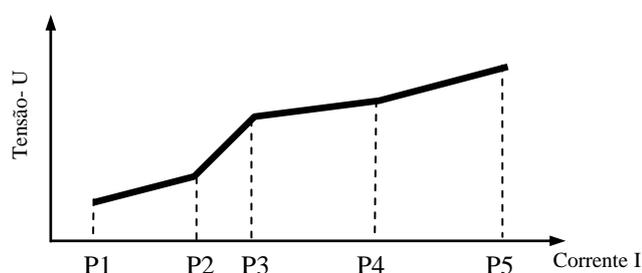


FIGURA 2.15 Interpolação entre 5 pontos de operação

2.3.3 Equipamento para Soldagem arco pulsado

2.3.3.1 Tipos de máquinas para soldagem com arco pulsado

Máquinas de soldagem, também chamadas de fontes de soldagem, transformam a energia elétrica da rede em uma forma apropriada para a soldagem. Várias exigências para a qualidade da solda devem ser satisfeitas pelas propriedades das máquinas de soldagem como a facilidade da ignição do arco elétrico, facilidade de ajuste dos parâmetros de soldagem, segurança de trabalho, tempo mínimo de manutenção e alto ciclo de trabalho.

Para a soldagem a arco elétrico, a corrente e tensão necessárias podem ser obtidas com diversos tipos de máquinas. Pode-se separar as fontes em duas classes: máquinas convencionais e máquinas eletrônicas. Atualmente, para soldagem com arco pulsado as máquinas eletrônicas (Fontes transistorizadas) são as mais aplicadas e, por causa disto, as explicações seguintes se concentram somente nas fontes transistorizadas [80].

As máquinas de soldagem eletrônicas usam módulos eletrônicos para "criar" os parâmetros de soldagem. As características da fonte da energia são definidas pelo controlador dos módulos e não pelos componentes de energia. Nas máquinas eletrônicas, a regulação previamente ajustada realiza a variação dos parâmetros e conseqüentemente os processos térmicos no arco e, em especial, a transferência metálica. Esta tecnologia possibilita a aplicação das fontes nos diversos processos de soldagem a arco elétrico e, por causa disto, estas fontes também são chamadas de fontes multiprocessos. As máquinas transistorizadas podem se dividir em diferentes tipos, como mostrado na Figura 2.16.

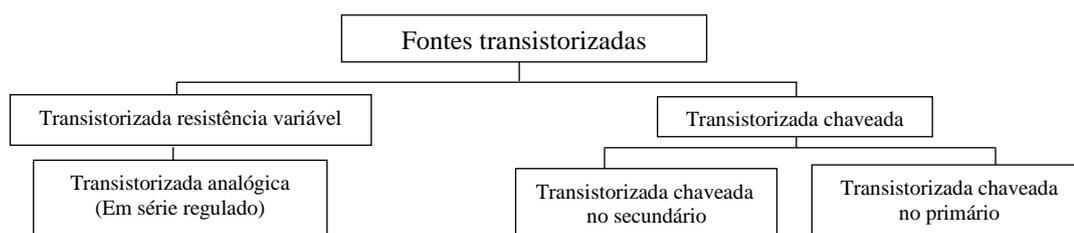


FIGURA 2.16 Classificação das fontes transistorizadas [80]

Fontes transistorizadas analógicas têm um transformador-retificador com um banco de transistores regulado em série. Depois do transformador, a tensão é retificada imediatamente e um condensador alimenta os transistores com uma tensão constante. Portanto, os transistores reagem muito rápido no sinal do regulador. Os transistores são como uma resistência variável com possibilidade de trocar os valores rapidamente. No banco dos transistores, a parte da energia que não é usada para alimentação do arco, transforma em energia térmica. Esta energia precisa ser retirada com uma refrigeração adicional, comumente líquida. As desvantagens destas fontes são a baixa eficiência de geração de energia e o tamanho, além de não terem muita aplicação na indústria.

Para a separação galvânica entre circuito da rede e circuito de soldagem é necessário um transformador. A energia para a alimentação do arco pode ser regulada nos dois lados, antes do transformador ou depois do transformador. Se este regulador não trabalha continuamente como nas fontes transistorizadas analógicas, porém com uma frequência de ligar e desligar, as fontes chamam transistorizadas chaveadas. Se o módulo chaveado de regulação está antes do transformador as fontes chamam transistorizadas chaveadas no primário e depois do transformador, transistorizadas chaveada no secundário. A Figura 2.17 apresenta seqüência dos módulos eletrônicos das fontes transistorizadas chaveada no secundário e transistorizadas chaveadas no primário. As características de soldagem das duas são similares.

Fontes transistorizadas chaveadas são mais eficientes do que as outras, e por causa disto são mais utilizadas na soldagem GMAW.

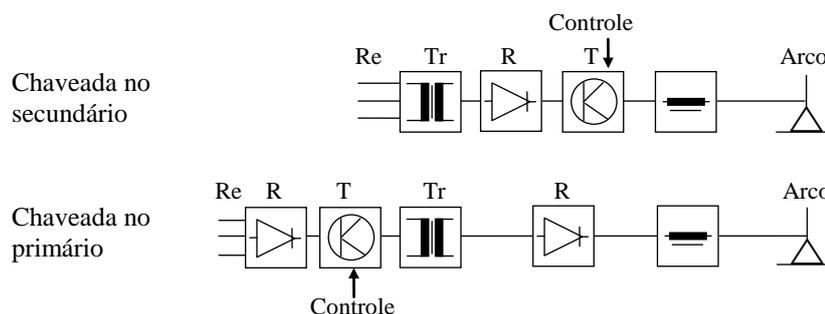


FIGURA 2.17 Comparação entre as seqüências dos módulos eletrônicos (Re= Rede, R= Retificador, Tr= Transformador, T= Transistor) [80]

A maioria dos novos desenvolvimentos de fonte de soldagem para o processo de GMAW são no estilo de fontes transistorizadas chaveadas no primário. Atualmente, nas aplicações de soldagem com arco pulsado, as fontes transistorizadas chaveadas no primário, também chamadas fontes inversoras, estão mais estabelecidas do que as chaveadas no secundário por causa do peso e tamanho, resultando em melhor mobilidade. O tamanho do transformador é dependente da frequência da máquina chaveada. Uma máquina chaveada com alta frequência reduz o tamanho do transformador e também aumenta a possibilidade de controlar o processo de soldagem. Frequências de chaveamento podem ser entre 5 e 200kHz.

Fontes transistorizadas chaveadas no secundário têm um transformador maior do que as chaveadas no primário, por causa disto são mais usadas em aplicações estacionárias e com alta potência.

Durante a soldagem, os componentes internos das fontes aquecem pela passagem da corrente elétrica. Para não destruir os componentes a temperatura máxima está limitada. Um indicador para o usuário da máquina, neste contexto, é o ciclo de trabalho ou fator de trabalho. O ciclo de trabalho é definido com a relação entre o tempo de operação permitido durante um intervalo de teste especificado.

Ele é um valor que indica a capacidade da máquina ou da tocha de soldagem e é indicado por dois números: um de corrente e um de porcentagem, por exemplo, 400A e 60%. O valor da corrente significa o valor máximo possível de usar com aquele ciclo de trabalho. A porcentagem significa em quanto tempo é possível usar a corrente máxima em 10 minutos. No exemplo, 400A e 60%, significa que com 400A é possível soldar 6 minutos em 10 minutos.

O resto do tempo, 4 minutos, é necessário para resfriar os componentes. As maiorias das fontes usam para refrigeração um ventilador interno e um sensor de temperatura para controlar a temperatura máxima. O procedimento de medição é padronizado, por exemplo, na Europa segue-se na norma EN 60974-1. Para aplicações automatizadas, por exemplo, soldagem com robô, um ciclo de trabalho de 100% é vantajoso para minimizar ou eliminar o tempo de inatividade. Dependendo da aplicação na soldagem manual, um fator de trabalho de 40% é suficiente.

Para soldagem com arco pulsado, é vantajoso que o fator de trabalho da máquina esteja na faixa de 400A e 500A (ou maior) com um mínimo de 60%, por causa da corrente alta de pulso usada no processo. Um aumento da corrente na mesma máquina minimiza o tempo possível de soldagem [81,82].

2.3.3.2 Alimentador do arame e tocha de soldagem

O alimentador do arame precisa mover o arame continuamente ao longo de uma distância, independente do comprimento entre 1,2m a 5m, com uma velocidade constante. Interferências da alimentação provocam mudanças no processo de soldagem causando irregularidades e até erros na soldagem. Para uma alimentação constante é vantajoso usar dois pares de roletes sendo, 2 roletes de alimentação e 2 roletes de pressão. Para arames finos com resistência baixa, como alumínio, ou para alimentação em distâncias maiores que 6m é melhor usar sistemas com mais do que um alimentador. O sistema push-pull apresentado na Figura 2.18 usa dois alimentadores, um empurrando no alimentador principal da máquina e o outro puxando no punho da tocha. Este sistema é possível aplicar no processo semi-automático e também automatizado. A vantagem é a velocidade constante da alimentação, especialmente para o processo de arco pulsado [83, 84].

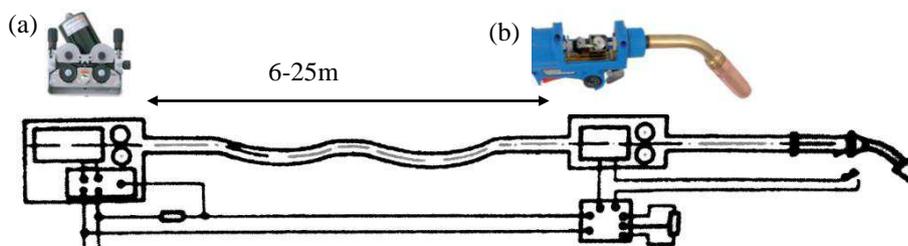


FIGURA 2.18 Sistema de alimentação push-pull a) alimentador principal empurrando e b) alimentador puxando [85]

A tocha de soldagem e os cabos possuem três funções básicas: conduzir a corrente de soldagem da fonte até bico de contato, conduzir gás de proteção até a região do arco e guiar o arame até o bico de contato. Ela consiste principalmente em cabo de corrente, mangueira de gás de proteção, no modelo refrigerado a água, mangueiras de refrigeração, guia espiral para o arame, punho, tubo da tocha, porta bico, difusor de gás, bico de contato e bocal de gás, como apresentado na Figura 2.19 [86].

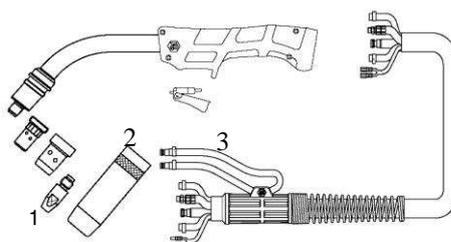


FIGURA 2.19 Tocha refrigerada com água, esquemático com os componentes

1- Bico de contato, 2-Bocal de gás de proteção e 3- Entrada e saída da refrigeração [87]

O bico de contato é uma parte importante na tocha e tem a função de guiar o arame eletrodo e conduzir a corrente para o eletrodo. Ele precisa agüentar uma carga alta de forças mecânicas e temperaturas altas. Durante de soldagem tem um ponto de contato entre bico e arame. Este ponto muda de posição por causa de desgaste. A variação do ponto de transmissão da corrente provoca diferentes distâncias do bico de contato e peça (DBCP) e pode causar instabilidade do processo [88].

Durante o processo de soldagem, os componentes da tocha aquecem por causa da energia do processo. Para agüentar esta carga térmica, a tocha precisa ser refrigerada. A refrigeração pode ocorrer com o próprio gás de proteção ou com água. Como máquinas de soldagem, tochas também têm um fator de trabalho e este valor não pode ser ultrapassado. Por exemplo, tochas refrigeradas a ar ou a gás não agüentam um valor maior do que 80% (8 minutos soldagem, 2 minutos refrigeração) e o valor da corrente é menor do que das tochas refrigeradas a água.

No processo de soldagem com arco pulsado ocorrem correntes altas, dependendo do material, de até 500A ou maiores. Neste caso, a refrigeração é muito importante. O ciclo de trabalho necessário para a tocha precisa ser na faixa de 300A - 500A e dependendo da aplicação, até 100%. Por causa disto, o uso de uma tocha refrigerada a água é vantajosa para o processo de soldagem com arco pulsado.

2.3.4 Características das máquinas de soldagem para arco pulsado

As fontes utilizadas para soldagem podem ser classificadas em relação às suas curvas características. A classificação é dividida em fonte de corrente constante (CI) e de tensão constante (CV). As curvas características são como as mostradas na Figura 2.20. Os valores de corrente ou tensão nas duas características não são totalmente constante. Principalmente nas fontes de tensão constante, tem-se a possibilidade de alterar a inclinação da curva.

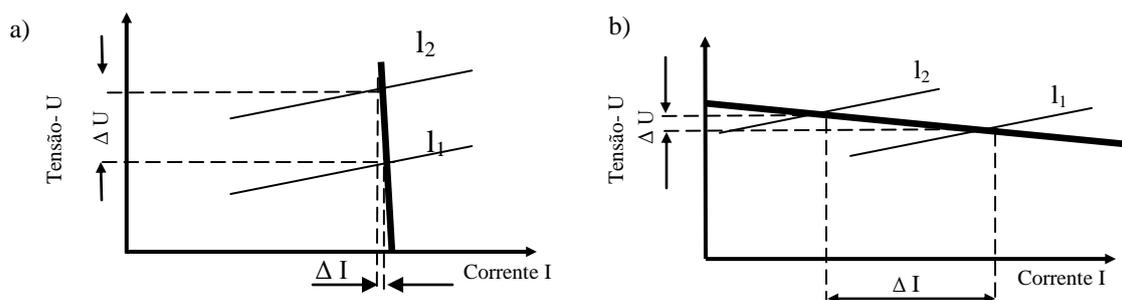


FIGURA 2.20 Curvas características de fontes de soldagem com a) corrente constante e b) tensão constante combinado com curva característica estática do arco com diferentes comprimentos l_1 e l_2 [31]

As curvas características influenciam no processo de soldagem. As propriedades das diferentes características são definidas pela reação do arco causada pela variação das condições de soldagem. O ponto de intersecção entre a curva característica da fonte e a curva característica do arco é declarado como o ponto de operação. Devido a interferências externas no processo, o ponto de operação muda na curva característica e provoca uma variação dos parâmetros.

No processo soldagem MIG/MAG não pulsado (convencional) fontes com a característica de tensão constante são usadas. Elas alimentam o arco com uma tensão relativamente constante durante a soldagem. Essa tensão define o comprimento do arco. Com uma velocidade de alimentação do arame constante, uma tensão maior resulta em um comprimento do arco maior e, uma tensão menor, em um comprimento menor do arco.

Durante de soldagem, variações da distância do bico de contato à peça de trabalho são comuns. As variações podem ser provocadas pelo soldador, tolerâncias das peças e, na soldagem robotizada, por soldar sobre pontos de fixação e acesso na peça. As fontes com característica CV têm a propriedade de estabilizar o ponto de operação pelo princípio de auto-correção ou também conhecida por regulagem interna. A regulagem do comprimento do arco é feita sem um sistema de regulagem adaptado. No caso de uma variação do comprimento do

arco, por exemplo, causada por um aumento da DBCP (Figura 2.20b, l_1 para l_2) a fonte reage com uma variação da corrente (ΔI) e, portanto, da taxa de fusão do arame. Um aumento da tensão reduz a corrente de soldagem e, com isto, a taxa de fusão do arame (menos arame será fundido). O mesmo fenômeno ocorre com uma redução do comprimento do arco. A corrente vai aumentar e, portanto, a taxa de fusão do arame (mais arame será fundido). Este efeito de auto-correção é uma vantagem das fontes de característica CV.

Nos processos de soldagem com baixa velocidade de alimentação do eletrodo, por exemplo, de soldagem com eletrodo revestido (SMAW), são utilizadas fontes com característica de corrente constante. O soldador pode compensar as variações no comprimento do arco manualmente. As fontes CI, quando o comprimento do arco varia, sofrem pequenas variações de corrente.

Por causa da corrente quase constante, a taxa de fusão varia pouco e o soldador tem mais tempo para compensar a variação. Nos sistemas com alta velocidade de alimentação e característica CI, um sistema externo de controle é necessário. A vantagem destas fontes é a corrente quase constante.

No processo de soldagem com arco pulsado, fontes com características variáveis estão sendo utilizadas. Isto significa que é possível combinar as vantagens dos diferentes tipos e é possível mudar as curvas características durante do processo. Esta alteração da característica da fonte se chama modulação.

O comum é mudar as características nas duas diferentes fases principais do processo, no nível de energia baixa (fase de base) e no nível de energia alta (fase de pulso). Por isso resultam quatro combinações possíveis de modulação:

1. Modulação $U_P - I_B$ = Fase de pico com CV (U_P), com fase de base com CI (I_B);
2. Modulação $U_P - U_B$ = Fase de pico com CV (U_P), com fase de base com CV (U_B);
3. Modulação $I_P - U_B$ = Fase de pico com CI (I_P), com fase de base com CV (U_B);
4. Modulação $I_P - I_B$ = Fase de pico com CI (I_P), com fase de base com CI (I_B).

As combinações de $I_P - I_B$ e $U_P - I_B$ são as mais usadas na tecnologia atual de fontes de soldagem. Especialmente a modulação $I_P - I_B$ precisa um sistema de regulação para manter o comprimento do arco constante. A Modulação $U_P - I_B$ não precisa um sistema de regulação externo por causa do efeito de auto-correção.

O ponto de operação, ponto de intersecção da curva característica do arco e da curva característica da fonte no diagrama de tensão e corrente, muda com a frequência de pulsação de um nível com energia baixa para energia alta e vice versa. A Figura 2.21 apresenta a mudança do ponto de operação das diferentes modulações com a) modulação $I_P - I_B$ e b) modulação $U_P - I_B$ onde: A_1 - Ponto de operação no nível energia em baixa, A_2 - Ponto de operação no nível energia alta, U_B - Tensão de base, U_P - Tensão de pulso, I_B - Corrente de base, I_P - Corrente de pulso, l_1 curva característica do arco na fase de base, l_2 curva característica do arco na fase de pulso.

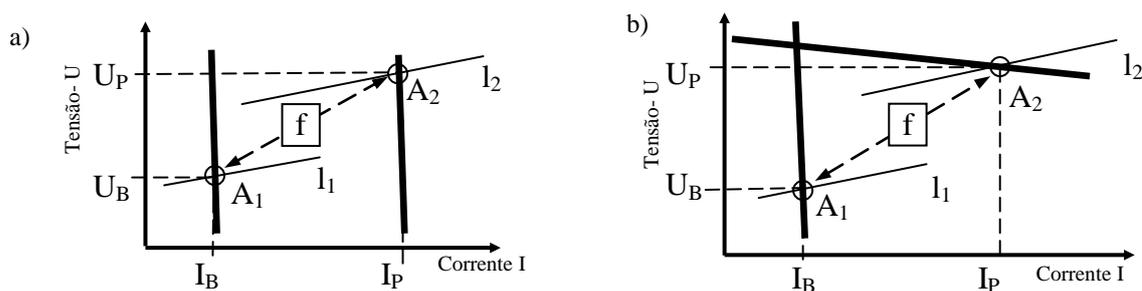


FIGURA 2.21 Modulações de fontes de soldagem com arco pulsado com a) modulação $I_P - I_B$ e b) modulação $U_P - I_B$

2.3.3 Definição dos parâmetros do processo de arco pulsado

A regulagem da corrente e tensão de soldagem com arco pulsado é caracterizada por um grande número de parâmetros. Em fontes modernas as possibilidades de regulagem podem chegar a 40 parâmetros ou mais. Os parâmetros mais comuns são apresentados na Figura 2.10 e caracterizam o processo arco pulsado [89]:

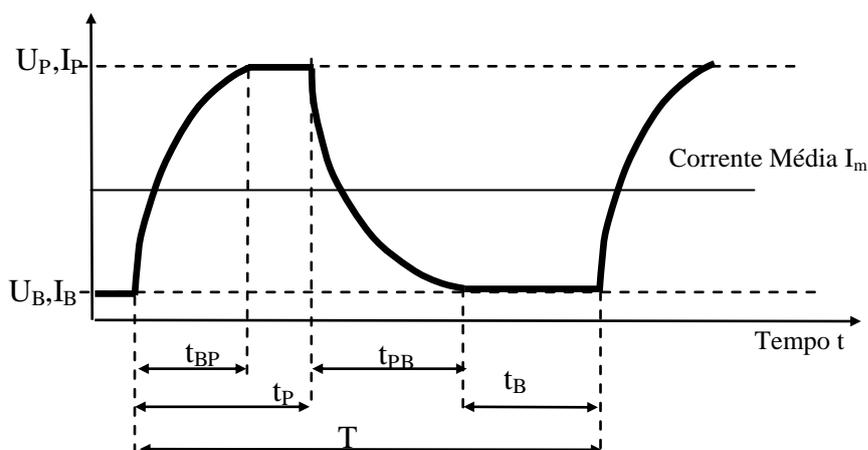


FIGURA 2.22 Parâmetros principais do processo arco pulsado [90]

Corrente de pulso - I_P [A] ou tensão de pulso - U_P [V]: o valor máximo da corrente e tensão no processo. A corrente é responsável pelo estrangulamento da gota e pela transferência do metal do eletrodo para a poça de fusão. O valor precisa estar acima de um nível mínimo (corrente de transição), de forma a promover o destacamento de uma gota. O nível depende do material, diâmetro do eletrodo e gás de proteção.

Corrente de base - I_B [A] ou tensão de base - U_B [V]: o valor mínimo da corrente e tensão no processo para alimentar o arco elétrico e para garantir que o arco fique aberto. A corrente de base não é suficiente para provocar a transferência do metal.

Tempo de pulso t_P [ms]: é definido desde o início do pulso até a descida da corrente ou tensão.

Tempo de base t_B [ms]: tempo entre os pulsos

Periodo da sequência T [ms]: tempo de um ciclo do pulso é definida como o período de início de um pulso para o final do tempo de base.

Frequência de pulsação/pulso f [Hz]: é o número de pulsos de corrente de pico, que ocorrem em um segundo e é dado pelo inverso do tempo de ciclo.

Tempo de subida t_{BP} [ms]: tempo até a corrente chegar ao valor máximo.

Tempo de descida t_{PB} [ms]: o tempo até a corrente descer para o valor de base.

Ciclo ativo CA : descreve a relação entre tempo de pulso e o tempo de um ciclo do pulso. Ele é determinado pela Equação

$$CA = \frac{t_P}{(t_P + t_B)} * 100 \quad (2.8)$$

A corrente média I_m [A]: obtida para uma forma de onda retangular pode, portanto, ser aproximadamente calculada pela equação

$$I_m = \frac{I_P * t_P + I_B * t_B}{t_P + t_B} \quad (2.9)$$

Para ondas não retangulares

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (2.10)$$

Outros parâmetros principais do processo são:

Velocidade da alimentação V_A [m/min]: define a quantidade de arame alimentado por tempo. É um importante parâmetro que tem influência significativa na transferência do metal e na taxa de fusão e de deposição.

Velocidade de Soldagem V_S [m/min]: é a velocidade com que o arco é deslocado ao longo da junta. Tem influência na geometria do cordão e controla a quantidade de calor que é fornecida ao longo da junta, que pode ser dado pela seguinte equação:

$$E_S = \frac{U \cdot I}{V_S} \quad (2.11)$$

Onde: U- Tensão de soldagem, I- Corrente de soldagem e E_S - Aporte térmico.

Com a maior velocidade de soldagem, menor será a quantidade de energia recebida por unidade de comprimento da junta.

2.4 Filmagem de alta velocidade no processo de soldagem

2.4.1 Introdução filmagem de alta velocidade

A tecnologia de filmagem de alta velocidade é usada para gravar e analisar processos que são realizados em um tempo muito curto ou que ocorrem com uma velocidade do processo muito rápida. Câmeras de alta velocidade são necessárias onde se tem movimentos que não são visíveis aos olhos humanos. Uma gravação tradicional, por exemplo, para a televisão, captura imagens com uma frequência de 24 a 30 quadros por segundo, o que é suficiente para criar a ilusão de movimento vista na tela. Esta velocidade não é suficiente para observar processos muito rápidos. Câmeras de alta de velocidade têm a possibilidade de registrar imagens com frequências que chegam até 250.000 imagens por segundo e até podem ultrapassar este valor. Com a reprodução em câmera lenta, elas conseguem transformar um segundo de gravação em uma reprodução com duração de muitos minutos.

Na engenharia mecânica, a tecnologia de filmagem de alta velocidade é muito utilizada para analisar e otimizar processos, além da documentação e correção de erros. Na área de soldagem, é muito útil para o entendimento do processo, por exemplo, para a transferência do metal e para análise da influência dos parâmetros. No início desta tecnologia, a observação do arco pela filmagem foi muito trabalhoso. Filmes fotográficos convencionais foram usados, depois o filme precisava passar por um processo de revelação e depois foi possível observar a gravação através de um projetor.

Parâmetros errados no sistema de gravação eram somente visíveis depois da revelação do filme. Para minimizar o trabalho e o custo, o tempo de filmagem foi limitado a algumas frações de segundos. Uma relação exata entre das imagens analógicas e dos dados adicionais gravados, por exemplo, de corrente e tensão de soldagem foi quase impossível [91].

Uma revolução na filmagem de alta velocidade iniciou com o desenvolvimento de câmeras digitais. A mão de obra para revelação do filme não foi mais necessária. As câmeras da tecnologia CCD e CMOS hoje são padrões e podem gravar em modo preto/branco ou colorido.

A combinação da tecnologia de filmagem de alta velocidade e a monitoração dos parâmetros elétricos é uma base para um sistema ótimo para analisar a transferência do metal, sistemas de regulagem e melhorar os parâmetros do processo. Essencial para o sucesso de sistemas é a combinação da câmera, sistema de lentes, programa de análise "software" e sistemas da iluminação. Os sistemas de observação são caracterizados pelo uso, ou não, de iluminação [92].

2.4.2 Propriedades das câmeras de alta velocidade

As câmeras digitais são caracterizadas pelo tipo de sensor usado. Existem sistemas com sensor de CCD - dispositivo de carga acoplada (Charge-Coupled Device) e com sensor de CMOS - semicondutor metal-óxido complementar (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Os sensores de CMOS são favorecidos, por causa do preço e velocidade de operação, e são agora mais usados nas câmeras de alta velocidade [93].

Um sensor fotográfico é definido pela quantidade de pixel (elementos no sensor) e pela velocidade de operação. A quantidade de pixels representa quantos pontos tem uma imagem. Uma imagem com muitos pixels tem maior qualidade. A velocidade de operação e a quantidade de pixels limitam a frequência de gravação das imagens e da qualidade. Com a velocidade de operação máxima um aumento da frequência de gravação provoca uma perda de qualidade da imagem. A Figura 2.23 apresenta a perda de qualidade com o dobro de frequência de gravação. A frequência de gravação representa o valor máximo de imagens que são possíveis de gravar por segundo.

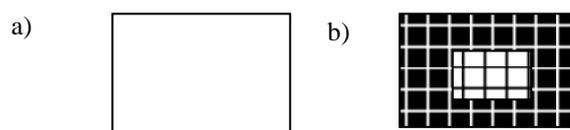


FIGURA 2.23 a) quantidade de pixel com velocidade máxima de operação e frequência de 1000 quadros por segundo e b) quantidade menor de pixel com velocidade máxima de operação com frequência de 2000 quadros por segundo

A quantidade e a intensidade de luz projetada no sensor são dependentes da abertura do diafragma da lente e da velocidade do obturador da câmera.

O diafragma é um dispositivo que regula a abertura da lente e regulara a intensidade da luz que passa atrás da lente para o sensor. Um diafragma fechado permite passar menor luz. A velocidade do obturador descreve o tempo que o obturador da câmera leva para abrir e fechar. Ele influencia a quantidade de luz que está projetada no sensor. Na situação de um movimento do objeto rápido, como na soldagem, e com uma alta quantidade de luz, como o arco produz, uma velocidade de obturador alta é vantajosa para evitar efeitos de estiramento na imagem [91].

A gravação das imagens pode ser feita na memória interna da câmera ou externa em um computador. Na gravação interna a transferência dos dados para o computador pode demorar alguns minutos. Dependente da duração e quantidade das imagens alguns gigabyte de dados podem ser criados. Na gravação externa na memória do computador os dados estão imediatamente disponíveis, o que pode diminuir o tempo de trabalho.

A duração da gravação é limitada pela capacidade de memória. Hoje em dia, a duração de gravações pode chegar até minutos [94].

2.4.3 Sistemas com iluminação adicional de contraluz

Durante do processo de soldagem, especialmente nos processos dinâmicos como arco pulsado e por curto-circuito, as condições de iluminação mudam constantemente durante a gravação. Nas fases de alta corrente/ tensão, a região do arco é muito luminosa, durante de fases de corrente/ tensão baixa ou durante a transferência curto-circuito, quando o arco é extinto, menos luz será produzida pelo processo e menos luz será projetada no sensor ótico. Este fenômeno dificulta a captação das imagens. Para evitar a perda de informações na fase escura, sistemas de iluminação podem ser usados para aumentar a quantidade de luz no sensor. Uma possibilidade para evitar fases de escuro é usar uma iluminação adicional.

Esta iluminação pode ser feita por um laser ou uma fonte de luz com alta capacidade. A Figura 2.24 apresenta esquematicamente um sistema de iluminação contraluz [95].

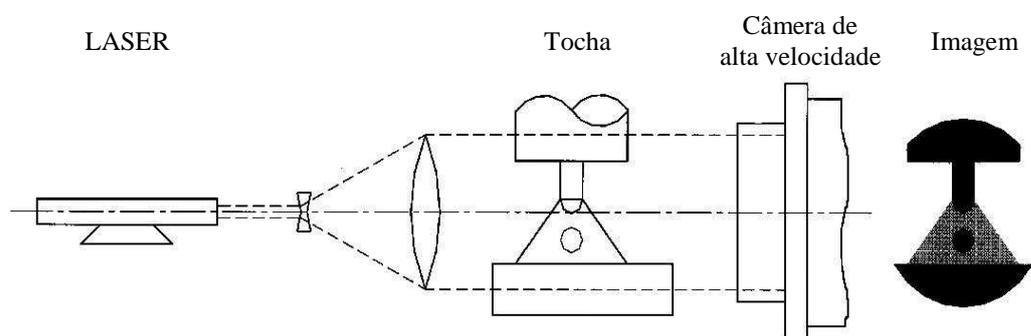


FIGURA 2.24 Esquemático um sistema de filmagem com iluminação contraluz [96]

Para resultados adequados a intensidade de contraluz precisa ser comparável com a luz produzida pelo arco na fase de alta intensão. Laser ou lâmpadas com alta potencia são necessárias. A desvantagem do sistema é a transferência do metal, a gota e o eletrodo são projetados na forma de sombras. A observação do arco é mais difícil. A necessidade de uma fonte adicional de iluminação complica o sistema de gravação e aumenta o tempo de preparação.

2.4.4 Sistemas sem iluminação adicional

Um sistema de filmagem sem sistema de iluminação adicional é vantajoso quando uma alta flexibilidade é necessária, por exemplo, na análise de uma produção real ou se não é possível usar lâmpadas por causa do acesso no arco ou uma grande quantidade de ensaios é necessária. O sistema é organizado como apresentado na Figura 2.24, mas sem iluminação. Dependendo das propriedades da câmera e da lente, é necessário usar filtros adicionais que reduzem a intensidade da iluminação do arco nos fases de alta corrente/tensão e liberam uma quantidade de luz suficiente nas fases de baixa corrente/tensão para observar os fenômenos do arco [95].

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizados neste trabalho. Os testes foram realizados no Laboratório de Soldagem da Hochschule Ulm (University of Applied Sciences Ulm) e no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A maioria dos testes foi realizada com aço carbono. Apenas para a comparação e explicação do efeito da polaridade, foi usado alumínio.

3.1 Materiais usados

3.1.1 Metal de base

Como material de base foram utilizadas chapas de aço S235, conforme especificado pela da norma europeia DIN EN10025, equivalente ao A36 da norma americana ASTM. O aço S235 é um aço de construção, comum na indústria de automóvel e utilizado nos diversos componentes como na carroceria, em componentes de suspensão e nos sistemas de direção. Trata-se de um aço carbono com boa soldabilidade. Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas as principais propriedades e a composição química deste aço em comparação com o A36, respectivamente.

TABELA 3.1 Propriedades principais do S235 e ASTM A36

Material	Limite de escoamento (min)	Limite de Resistência	Alongamento (min)
S235	235 MPa	340 - 470 MPa	25%
ASTM A36	250 MPa	400 - 500 MPa	23%

TABELA 3.2 Composição química do metal de base S235 e ASTM A36

Material	C(% max)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
S235	0,17	<0,3	<1,4	<0,045	<0,045
ASTM A36	0,25	<0,4	0,8 - 1,2	<0,04	<0,05

Chapas de diferentes espessuras foram utilizadas. Para evitar a ocorrência de penetração total, como apresentado na Figura 3.1, chapas relativamente grossas foram usadas. Em pré-ensaios, chapas com espessura de 4mm apresentaram um valor de penetração de 75% da espessura da chapa, o que é suficiente para não ultrapassar a espessura total da chapa.

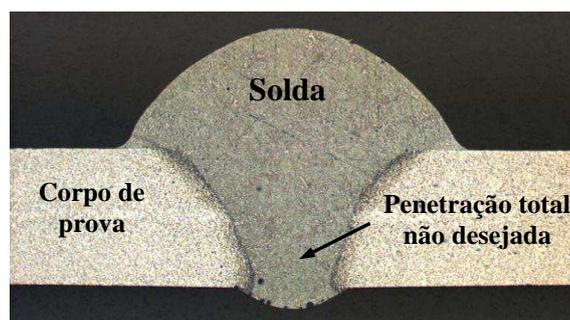


FIGURA 3.1 Chapa com penetração completa da chapa e formação de um reforço não desejado.

Na soldagem com a faixa da baixa energia, chapas com espessura de 2,5mm foram usadas para evitar a dissipação de calor o que poderia influenciar significativamente a formação da solda.

As chapas da mesma espessura foram de um lote de produção. As chapas de 1m x 2m foram cortadas em guilhotina nas dimensões do corpo de prova de 50mm x 120mm. O controle das chapas depois do processo de corte não apresentou uma deformação significativa, que pudesse provocar uma variação da distância entre bico de contato e peça de trabalho. A superfície do corpo da prova não foi tratada mecanicamente depois do processo de laminação. O controle visual apresentou uma superfície uniforme. Para garantir uma superfície sem contaminação, antes da soldagem, a superfície foi limpa com um pano seco e com acetona.

3.1.2 Metal de adição

Para a realização dos testes foi utilizado o material de adição G4Si1 em forma arame massivo, com diâmetro de 1,2mm. O arame foi fabricado conforme da norma da europeia EN 440 pela empresa Castolin-Eutectic.

O equivalente no mercado brasileiro é o arame ER70S-6 da norma americana AWS A5.18. A composição química e as propriedades mecânicas típicas destes arames são mostradas nas Tabelas 3.3 e Tabela 3.4.

Para aumentar a resistência contra contaminação dos arames pela corrosão na embalagem ou no ambiente de trabalho, os arames foram cobreados. A cobreação melhora também as condições da transmissão da corrente no bico de contato. Foram usadas bobinas com diâmetro de 300mm e um peso de 16kg de metal de adição. Antes dos testes de soldagem, os diâmetros foram verificados com um micrômetro.

Estes arames podem ser usados para todos os modos de transferência de metal e posição de soldagem. A combinação do metal de base S235 e do metal de adição G4Si1 é uma combinação comum. Para o processo de soldagem com esta combinação, é recomendado usar gás de proteção da classe M21.

TABELA 3.3 Composição química especificados dos arames G4Si1 e ER70S-6

Material	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%) max	S(%) max	Ni(%) max	Mo(%) max
G4Si1	0,06-0,14	1,3-1,6	0,7-1,0	0,025	0,025	0,15	0,15
ER70S-6	0,06-0,15	1,40-1,8	0,80-1,15	0,025	0,035	0,15	0,15

TABELA 3.4 Propriedades mecânicas (Valor mínima)

Material	Limite de Escoamento	Limite de Resistência	Alongamento
G4Si1	440 MPa	530 MPa	30%
ER70S-6	480 MPa	560 MPa	22%

3.1.3 Gás de proteção

Como recomendado pela norma EM 440, foi usado para os testes um gás de proteção da classe M21. Os gases da classe M21 são classificados como gases de mistura de argônio e dióxido de carbono com uma quantidade de 5% até 25% de dióxido de carbono e o restante de argônio.

Como apresentado no item 2.2.3, o aumento da quantidade de CO₂ dificulta a transferência do metal por causa da concentração de corrente no arco e no eletrodo. O arco está localizado no ponto de eletrodo e dificulta a ação do efeito "Pinch". Uma quantidade de 25% CO₂ no gás de proteção não possibilita uma transferência uniforme no modo de arco pulsado e mais respingos são produzidos. A grande vantagem da tecnologia arco pulsado é a transferência do metal sem formação de respingos.

Para os testes foram usados os gases da empresa Linde CORGON®18 em cilindros de 50 litros (11,8 m³), conforme da norma DIN EN ISO 14175: M21 - ARC - 18. A composição é 82% argônio e 18% dióxido de carbono. A vazão foi definida em 15 l/min. Para garantir um fluxo contínuo, ele foi testado no bocal de gás de proteção na tocha com um fluxômetro.

O gás 82/18 é um gás padronizado para soldagem de aço no Europa, especialmente na soldagem de modo arco pulsado. Esta mistura não é ainda comum no Brasil para soldar aço e quase não é possível comprar em cilindros comuns. Somente consumidores de grande quantidade de gás de proteção, que usam um sistema de mistura de gás de proteção autônomo,

tem a possibilidade de usar a mistura 82%Ar /18% CO₂ com um preço comparável com a mistura 75%Ar /25CO₂. No Brasil a mistura de 75% de argônio e 25% de dióxido de carbono é padronizada para soldagem de aço. A falta da padronização da mistura 82/18 no mercado pode ser um fator que faz ainda a tecnologia de arco pulsado não ter muito sucesso no Brasil.

3.2 Equipamento e técnicas de análise

Todos os testes de soldagem foram feitos com o seguinte equipamento: máquina de soldagem com alimentador do arame, tocha de soldagem de sistema push-pull refrigerada a água, sistema mecanizado de soldagem com possibilidade de movimento linear na direção horizontal com velocidade variável, suporte para fixar corpo de prova, analisador de sinal, computador com placa de aquisição de dados, câmera de alta velocidade, sensor Hall, divisor de tensão, filtro de Bessel, cabos de conexão e sistema de alimentação de gás de proteção. A Figura 3.2 mostra a bancada experimental. A seguir será feita uma explanação detalhada de cada um dos componentes usados no desenvolvimento dos testes



FIGURA 3.2 Bancada experimental com câmera de alta velocidade

3.2.1 Fonte de soldagem e o sistema de alimentação/ tocha

A seleção da fonte de soldagem é um fator fundamental para os estudos dos parâmetros de soldagem. Para a investigação da influência dos parâmetros, uma fonte com a liberdade de alterar todos os parâmetros do processo é necessária. O grau de liberdade de ajuste dos parâmetros influencia significativamente a possibilidade de testar os parâmetros e as influências deles. Uma máquina de soldagem com a tecnologia de arco pulsado convencional

não permite uma variação dos parâmetros em uma faixa suficiente para os propósitos do presente trabalho. Os fornecedores não liberam o acesso ao sistema de programação dos parâmetros por que a alta quantidade de parâmetros e a interação entre eles exige demais do soldador ou com uma programação errada pode-se provocar danos nos componentes eletrônicos.

Para os testes, foi usado uma fonte de soldagem eletrônica transistorizada chaveada no primário, o modelo DALEX VARIO MIG 400 L(W)-B com a liberdade de acesso no sistema de programação. Na Tabela 3.5 as principais propriedades desta fonte são apresentadas.

TABELA 3.5 Propriedades principais da fonte DALEX VARIO MIG 400 L(W)-B

Designação	Valor
Entrada	3 x 380V
Frequência	50Hz ou 60 Hz
Tensão em vazio U_0	65-70V
Ciclo de trabalho 60%	400A
Ciclo de trabalho 30%	800A
Valor máximo da corrente	800A

Este modelo de fonte possibilita o modo de arco pulsado em duas variações, modo arco pulsado com corrente contínua e com corrente alternada. Para os testes, somente o modo arco pulsado com corrente contínua foi usado.

A programação da fonte foi feita por um sistema integrado na máquina. Um sistema externo, por exemplo, um computador, não foi necessário. Esse sistema minimiza erros de programação, causados pela linguagem de programação.

Um conjunto de parâmetros no programa contém três partes separadas, a ignição do arco, a soldagem e o final da soldagem. Durante os testes, os parâmetros da ignição e do final da soldagem foram mantidos constantes, para garantir sempre as mesmas condições de ignição e extinção do arco. No processo de soldagem, a solda se inicia com os parâmetros de ignição e que ser alterados automaticamente depois de um valor de corrente estável e tempo programado serem atingidos. No final da soldagem, definido pelo comprimento da solda, a máquina muda para os parâmetros da extinção do arco. O conjunto de parâmetros para a parte de soldagem contém vários parâmetros. A Tabela 3.6 amostra o conjunto de parâmetros de soldagem.

TABELA 3.6 Parte importante do conjunto de parâmetros de soldagem

	Descrição	Nome	Limites
1	Velocidade de alimentação do arame	Velocidade alimentação	0 ... 25 m/min
2	Frequência de oscilação entre as fases de pulso e fase de base	Frequência de pulsação	0 ... 1000Hz
3	Limitação da corrente máxima no processo	I-MAX	0 ... 800A
4	Dinâmica da fonte de soldagem	V-DYNAMIK	1 ... 10
5	Característica da subida da corrente	I-AN	1-3
6	Tempo de descida da corrente	I-AB	0 ... 10ms
7	Tensão de base	U_B	0 ... 50V
8	Corrente de base	I_B	0 ... 800A
9	Inclinação da curva características tensão constante na fase de base	nstat	0 ... 5 V/100A
10	Limitação da corrente mínima na fase de base	Imin	0 ... 800A
11	Tempo de pulso	tp	0 ... 10ms
12	Tensão de pulso	U_P	0 ... 50V
13	Corrente de pulso	I_P	0 ... 800A
14	Inclinação da curva características tensão constante na fase de	nstatp	0 ... 5 V/100A
15	Valor mínimo do pulso	Iminp	0 ... 800A

Para manipular a modulação do processo, a alteração dos parâmetros (7) tensão/ (8) corrente de base e (12) tensão/ (13) corrente de pulso são importante. O valor mais alto, corrente ou tensão, define a modulação. Por exemplo, se o valor da tensão de base (7) é maior do que o valor da corrente de base (8), este define a fase de base com uma curva característica tensão constante, a modulação de Base U_B . O sistema de regulagem dos parâmetros regula no processo a corrente para obter uma tensão equivalente do valor programado.

Um valor do corrente de pulso (13) maior do que o valor de tensão de pulso (12) define a fase de pulso com uma característica corrente constante, a modulação de pulso I_P . O sistema de regulagem dos parâmetros regula no processo a tensão para obter uma corrente equivalente do valor programado.

A fonte de soldagem foi sincronizada com o alimentador de arame. O alimentador foi montado em cima da fonte. Ele usou o sistema de 4 roletes, 2 roletes de alimentação e 2 roletes de pressão. Os roletes foram preparados para o arame de aço com o diâmetro de 1,2mm para reduzir a possibilidade de deslizamento do arame nos roletes.

Uma tocha refrigerada de água com o sistema push-pull foi montada no alimentador de arame. O cabo do conjunto teve um comprimento total de 2m. O sistema push-pull foi sincronizado pelo fornecedor da tocha com o alimentador principal da máquina. Os roletes na tocha foram modificados para arame de aço com diâmetro de 1,2mm. Para evitar um sobreaquecimento e uma variação da temperatura da tocha entres os testes, o ciclo de trabalho da tocha foi definido para 100% com 500A.

O conjunto do cabo foi montado reto e equipado com um guia espiral e bico de contato para o arame de diâmetro 1,2mm para evitar variações da velocidade durante de soldagem ou problemas de transmissão da corrente para o arame.

O fornecedor do sistema de soldagem certificou os parâmetros da fonte de soldagem, tensão e corrente, o sistema de alimentação do arame com a tocha push-pull, a velocidade de alimentação. Especialmente a velocidade de alimentação foi testada e verificada.

3.2.2 Sistema mecanizado de soldagem

As soldagens foram realizadas em uma mesa de posicionamento linear, que possibilitou uma variação na velocidade de soldagem de 0,1 a 3m/min. Na mesa foi montado um dispositivo de aço para o corpo da prova, como mostrado na Figura 3.3a. O dispositivo com o corpo de prova se movimentou durante de soldagem. O corpo de prova foi fixado com uma viga de fixação. O suporte tinha uma ranhura para evitar qualquer influência na formação da raiz. As extremidades do dispositivo foram conectadas ao cabo terra da máquina de soldagem para evitar o efeito de sopro magnético no arco.

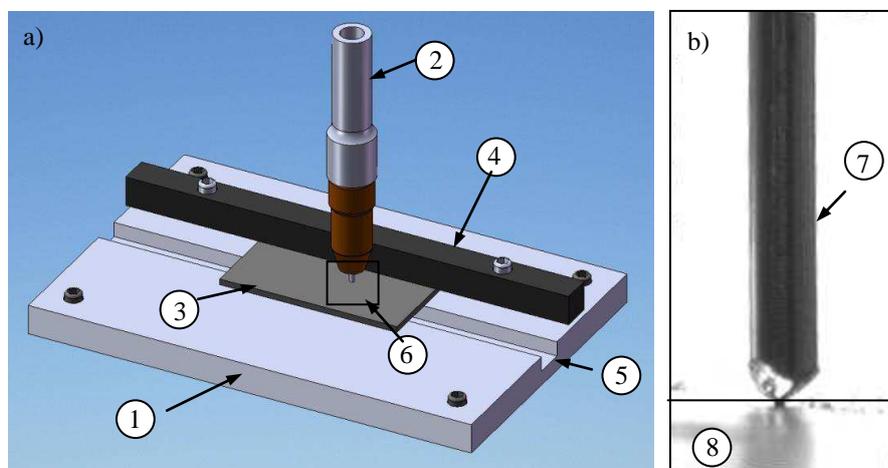


FIGURA 3.3 a) esquema de 1- Dispositivo de soldagem com 2- Tocha de soldagem, 3- Corpo de prova, 4- Viga de fixação, 5- Ranhura e 6- Área de foco da câmera , b) área de foco com 7- O arame e 8- A chapa (peça de trabalho)

Para manter o foco da câmera, Figura 3.3b, a tocha de soldagem foi fixada durante de soldagem, em quanto a chapa com o dispositivo se movimentava. Com esta técnica, foi possível gravar testes de duração de até 16 segundos sem ajuste do foco da câmera. Entre os testes, a temperatura do dispositivo foi medida para evitar uma influência na solda.

3.2.3 Sistemas de aquisição de dados

3.2.3.1 Câmera de alta velocidade

Nos testes foi usada uma câmera digital de alta velocidade da empresa Redlake (Kodak), o modelo MotionPro10000, apresentada na Figura 3.4a e b. Ela possibilita a filmagem de alta velocidade de até 10.000fps (fps-imagens por segundo). A câmera usa um sensor de CMOS preto/branco com uma resolução máxima de 1.280 x 1.024 pontos na frequência de gravação de 25 imagens por segundo. A resolução diminui com o aumento da frequência de gravação. Com a frequência máxima de 10.000fps a resolução diminui para 256 x 48 pontos no sensor.

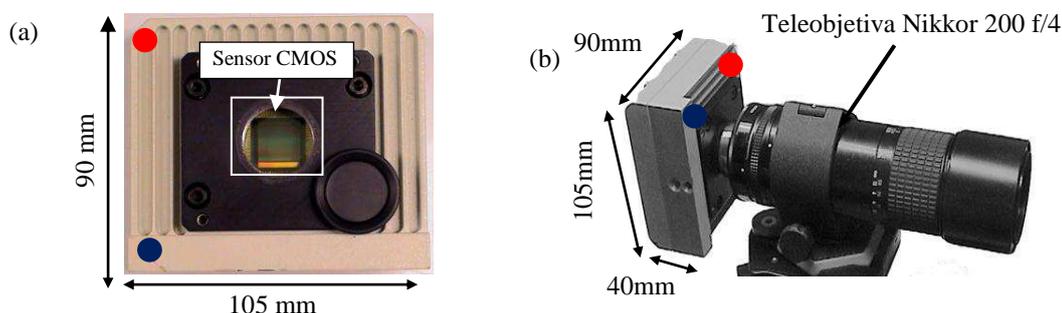


FIGURA 3.4 (a) Câmera de alta velocidade com visto do sensor fotográfica CMOS e (b) Câmera de alta velocidade na posição de soldagem com lente Nikkor

O sensor fotográfico é retangular (1.280 x 1.024 pontos). Para aumentar a área de foco na direção vertical (paralelo do arame) a câmera foi girada de 90 graus, como apresentado na Figura 3.4b. A câmera foi montada em um tripé e posicionada a uma distância de 1,4 m da tocha. Uma lente da teleobjetiva da empresa Nikkor modelo 200 mm f/4 foi utilizada. Para proteger o equipamento contra respingos, um vidro foi posicionado entre a tocha e a câmera.

Para a instalação da câmera, uma placa e o programa MIDAS precisaram ser instalados em um computador. A gravação das imagens foi feita na memória da placa instalada no computador e as imagens foram diretamente disponibilizadas no programa da câmera. Se necessário, as imagens digitais podem ser gravadas no disco do computador ou em outra media de memória, por exemplo, DVD. A memória interna da placa de 2 gigabyte possibilitou uma duração de gravação de até 20 segundos.

Pelo programa é possível alterar a frequência de gravação em valores de 25, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000, 10.000fps. Uma alteração entre estes valores, por exemplo, 5.000 imagens por segundo, não era permitido pelo programa da câmera. A resolução das imagens é

proporcional do número das imagens e também não alterável no programa. Com o número de imagens, a resolução se minimiza.

Os parâmetros de frequência de gravação (número de imagens por evento), frequência de pulsos, a resolução da imagem e a quantidade de dados produzidos, interagem juntos. Para manter um resultado com uma qualidade de imagem adequada e com informações adequadas, estes aspectos precisam ser analisados. A Figura 3.5 apresenta o número de imagens por evento dependente da frequência de pulsação com as diferentes frequências de gravação da câmera.

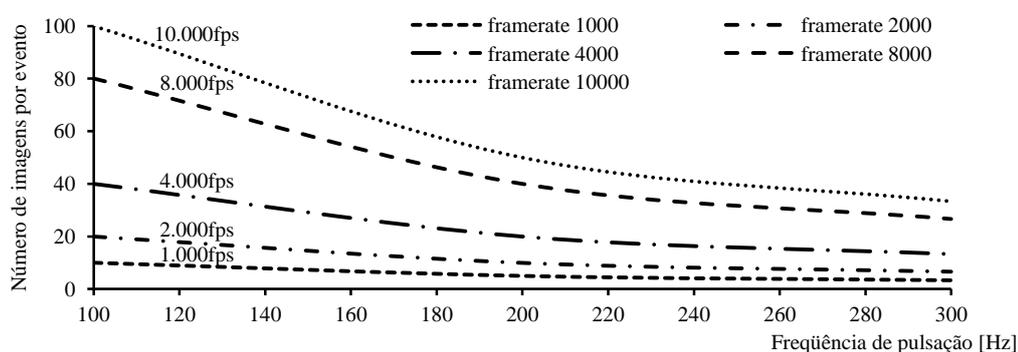


FIGURA 3.5 Número de imagens por evento dependente da frequência de pulsação (câmera Redlake MotionPro10.000)

Com o aumento da frequência de pulsação, se minimiza o número das imagens por evento, por exemplo, com uma frequência de gravação de 2.000 imagens por segundo e uma variação de frequência de pulso de 100Hz para 300Hz, o número de imagens diminui de 20 imagens para 6,6 imagens por duração de um período de pulso.

Como a resolução da imagem é ligada com frequência de gravação, com uma velocidade de operação constante do sensor, a área de filmagem se minimiza. No exemplo, frequência de gravação de 4.000fps é a resolução 254 x 124 pontos, para 10.000fps, 256 x 48 pontos no sensor ótico. Esta área de filmagem não é suficiente para filmar o arco inteiro, como apresentado na Figura 3.6. O arco é não totalmente visível.

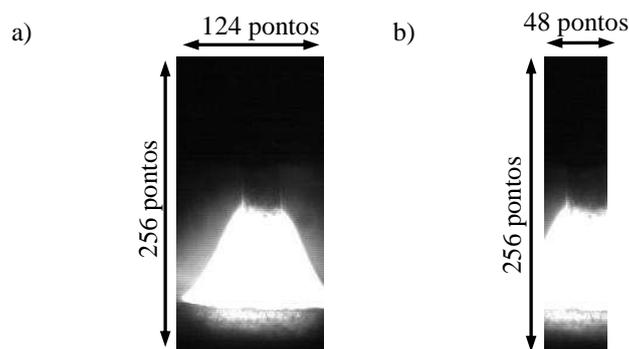


FIGURA 3.6 a) imagem com frequência de 4.000fps e 256 x 124 pontos e b) imagem com frequência de 10.000fps com 256 x 48 pontos

Um conjunto de parâmetros adequado foi encontrado com a velocidade de gravação de 4.000fps. A área de filmagem é suficiente para observar o arco inteiro com o número das imagens por acontecimento adequado. Todas as filmagens foram feitas com os parâmetros da Tabela 3.7 e sem iluminação adicional.

TABELA 3.7 Parâmetros de gravação com a câmera e lente

Designação	Valor
Frequência de gravação	4.000
Resolução da imagem	254 x 124 pontos
Velocidade do obturador	2 μ sec
Abertura de diafragma da lente	8 -16
Duração da gravação	15 segundos

3.2.3.2 Sistema de monitoração

Para a monitoração dos parâmetros elétricos e, especialmente, para a sincronização dos valores de corrente e tensão com a filmagem de alta velocidade, um sistema de monitoração foi desenvolvido junto com o fornecedor da câmera de alta velocidade. O sistema implantando no sistema da câmera consisti de uma placa de conversão de sinais analógicos em digitais com faixa de medição de 10V, uma placa de sincronização (Breakout-Box) e sensores para a corrente e tensão.

O Breakout-Box captura os sinais analógicos com uma tensão máxima de 10V, manda para o conversor analógico/digital e sincroniza as imagens com os valores de corrente e tensão. Ele possibilita uma captação e sincronização de até oito sinais analógicos com a filmagem de alta velocidade. Ele trabalha com uma frequência de operação de 200kHz, significando que em cada canal, dos oito canais, está gravada com uma frequência de 25kHz. Com a redução dos canais gravados, a frequência aumenta proporcionalmente. Para a monitoração da

transferência do metal no processo MIG/MAG vários parâmetros têm influência, por exemplo, a velocidade da alimentação do arame, a velocidade de soldagem, vazão de gás de proteção, distância do bico de contato à peça e os parâmetros elétricos (corrente e tensão).

Pré-testes demonstraram que alguns destes parâmetros permaneceram constantes ou com uma variação pequena, não significativamente, durante de soldagem. A velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem foram testadas e se estabilizaram depois da ignição do arco em um valor constante. A distância entre o bico de contato e a peça foi mantida constante, pela fixação da tocha e do corpo de prova. A monitoração dos parâmetros, corrente e tensão, apresentaram uma alteração com uma grande influência na transferência do metal.

Somente os sinais da corrente e da tensão do processo foram usados para a monitoração da transferência do metal. Com a redução do número de canais, o sistema trabalha com uma frequência de 100kHz (25pontos/ frame) por canal.

Para a aquisição do sinal de corrente de soldagem foi utilizado um transdutor de corrente que funciona com o princípio de efeito Hall. Ele transforma um valor de corrente de soldagem que passa por ele em um valor de tensão proporcional à corrente, 1V/100A. O sensor foi aplicado no cabo terra da corrente, e foi conectado e sincronizado com o sistema aquisição da câmera da alta velocidade.

Para garantir que a entrada de tensão na placa de aquisição não passasse do valor máximo de 10 V (faixa de medição da placa) para a aquisição do sinal de tensão de soldagem, um divisor de tensão foi utilizado. O fator de divisão foi 1/10 para medir uma tensão máxima de 70V.

A tensão do arco foi medida no arame no alimentador do arame, como apresentado na Figura 3.7. Outro método de aquisição da tensão é mediação no bico de contato. Na medição da tensão no bico de contato, a tensão da soldagem, disponibilizada pela fonte de soldagem, será medida e não a tensão real do arco (arco + eletrodo).

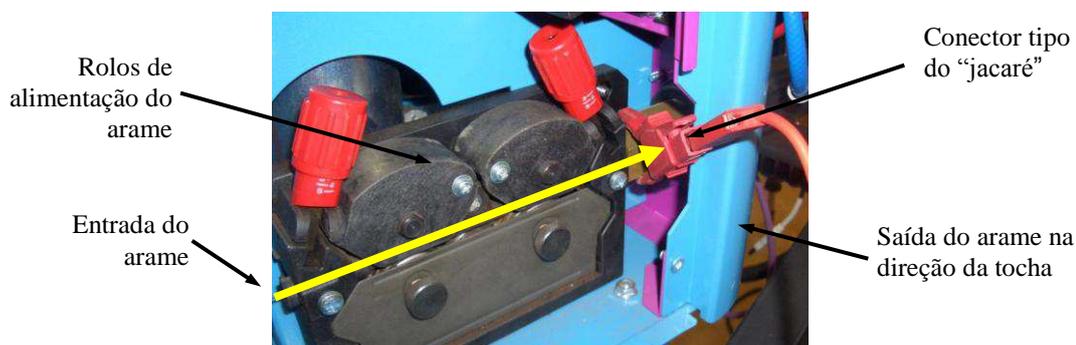


FIGURA 3.7 Ponto de aquisição da tensão no alimentador de arame

Causado pela transmissão da corrente do bico de contato para o eletrodo (arame) e a resistência de contato, uma queda de tensão ΔU é provocada neste sistema. Para a ilustração, um exemplo com uma resistência de contato de $R_C = 0,001\Omega$ e um valor de corrente de $I = 500A$ (valores fictícios), a queda de tensão será

$$\Delta U = I * R_C = 500A * 0,001\Omega = 0,5V \quad (3.1)$$

Se a aquisição da tensão é feita no arame isolado, onde não tem corrente, não tem uma queda de tensão provocada pela resistência de contato. Com uma distância curta entre bico de contato e ponto de medição a resistência do arame não influencia significativamente a medição.

$$\Delta U = I * R_C = 0A * 0,001\Omega = 0V \quad (3.2)$$

Nos testes do sistema de aquisição, as ondas dos sinais, especialmente de tensão, apresentaram ruídos, como apresentado na Figura 3.8. A análise do ruído do sinal apresentou uma frequência parecida com a frequência de chaveamento da fonte de soldagem. Para evitar esta interferência um "filtro de Bessel" foi utilizado. Ele filtra a frequência da fonte de soldagem nos sinais de tensão e corrente. Figura 3.9 apresenta os sinais com "filtro de Bessel".

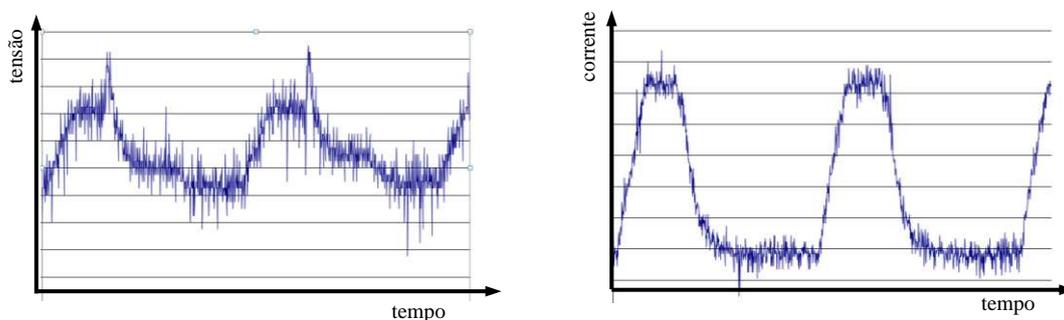


FIGURA 3.8 Exemplos de ondas de tensão e corrente com ruído do sinal

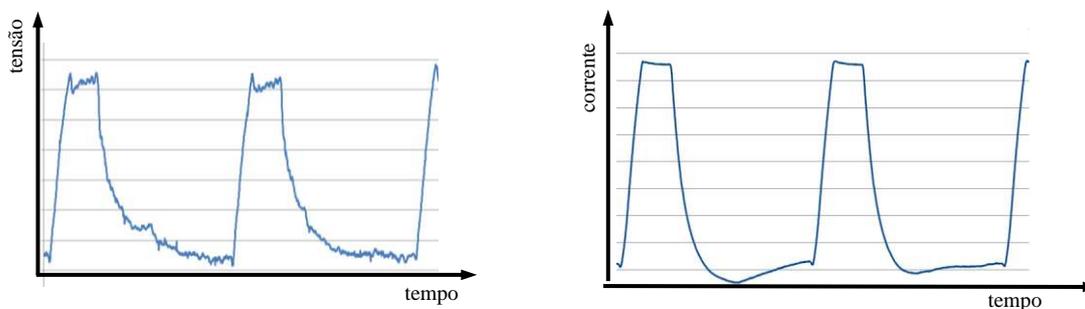


FIGURA 3.9 Exemplos de ondas de tensão e corrente com "filtro de Bessel"
(Soldagens diferentes, com escalas diferentes)

3.2.3.3 Coordenação do processo de aquisição dos dados

A coordenação da captação dos dados foi feita da seguinte maneira, como apresentado na Figura 3.10. Primeiro foi feita a programação offline dos parâmetros na máquina de soldagem e a velocidade de soldagem no sistema de movimento. Com o sinal “Start soldagem” a fonte inicia o procedimento da ignição do arco, e em seguida envia um sinal de que o arco está ligado para o sistema de controle. O controle manda o sinal "start" para a câmera de alta velocidade que inicia a gravação das imagens sincronizadas com a aquisição da corrente de soldagem pelo sensor Hall e a tensão sobre o divisor de tensão. O sistema de movimento inicia movimento do corpo de prova com a velocidade de soldagem até o comprimento da solda programado. No final, o sistema manda o sinal "Stop soldagem" para a fonte.

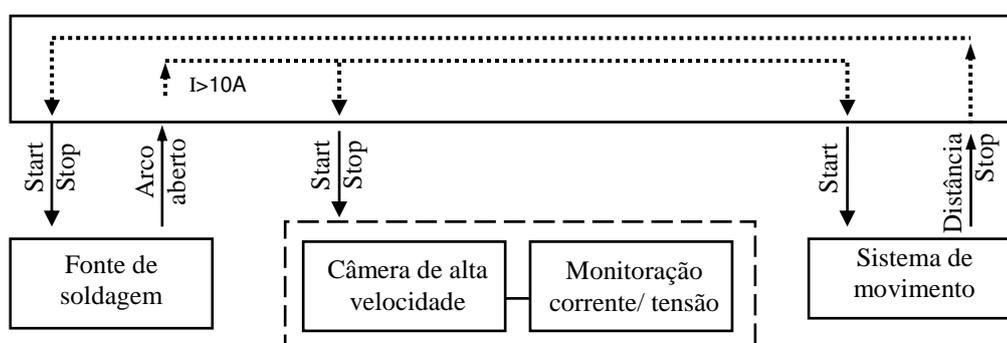


FIGURA 3.10 Sistema de coordenação dos ensaios

A câmera grava o processo de soldagem completo com o tamanho do arquivo de dados de 2GB. Depois da gravação, os filmes foram analisados e uma seção representativa de 0,625 segundos foi selecionada para reduzir o volume do arquivo para 80MB. Os parâmetros e as observações foram documentados no protocolo de gravação. Os corpos de prova foram marcados.

3.2.4 Preparação das mostras macrográficas

A avaliação da geometria do cordão de solda foi realizada pela análise dimensional de sua seção transversal. A análise foi feita com o seguinte procedimento. Primeiro, foi feita a avaliação visual da superfície da solda e a documentação com uma foto. Depois, o corpo de prova com o cordão da solda foi cortado transversalmente no meio para realização de ensaio

macrográfico. O corte foi feito com discos de corte abrasivo, sob refrigeração. O corpo de prova foi preparado com o procedimento embutimento a frio para o lixamento.

O lixamento foi feito com lixas de diferentes granulometrias na sequência de 120, 220 e 320 e posteriormente no processo de polimento. Depois da limpeza pelo banho ultra-som e secagem, a amostra foi atacada quimicamente com Nital 2%. Em seguida foram medidas as características geométricas na face transversal do cordão de solda: a penetração, altura e a largura do reforço, área de penetração e de reforço, como ilustrado na Figura 3.11.

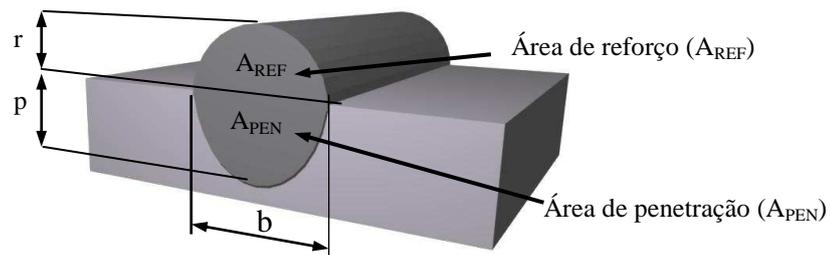


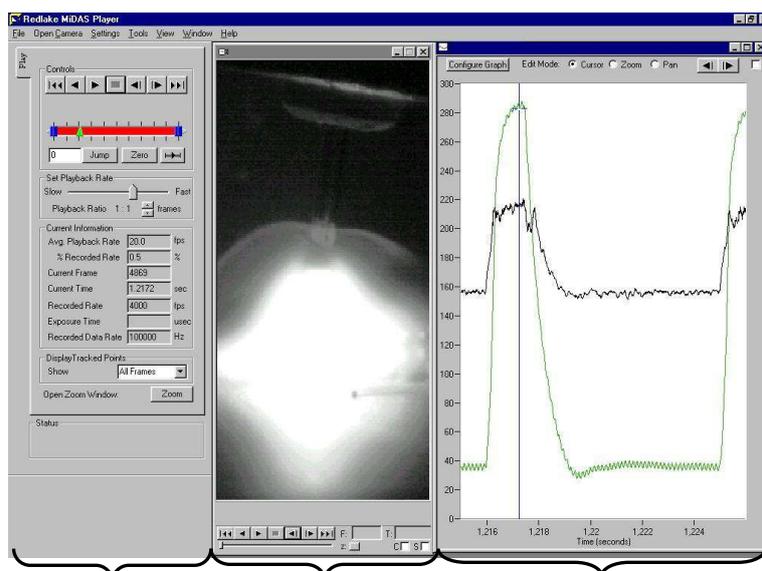
FIGURA 3.11 Esquema do perfil geométrico do cordão de solda.
Onde: b=largura do cordão, p=penetração máxima da solda, r=altura de reforço

Para a análise das características geométricas, o fator da diluição (D) será usado. O fator de diluição é calculado através da fórmula.

$$D = \frac{A_{PEN}}{A_{PEN} + A_{REF}} * 100 \quad (3.3)$$

3.2.5 Análise das imagens

Para analisar as imagens da filmagem de alta velocidade foi utilizado o programa MidasPlayer®, o qual está integrado ao sistema da câmera de alta velocidade. O programa MidasPlayer®, mostrado na Figura 3.12, sincroniza os dados de corrente e tensão com as imagens da câmera de alta velocidade.



Painel de controle Imagem de alta velocidade Sinais de tensão e corrente

FIGURA 3.12 Programa MidasPlayer® Sincronização das imagens e parâmetros elétricos

As imagens são sincronizadas com os valores de corrente e tensão e podem ser observadas passo a passo. Para analisar as imagens com programas externos é possível salvar cada imagem em diferentes formatos, por exemplo, JPG ou TIFF. Os valores de corrente e tensão são documentados na forma do programa Microsoft EXCEL. Depois do procedimento de gravação elas ficaram disponíveis para análise externa.

Para analisar as características das imagens da câmera e para analisar as características geométricas dos cordões de solda, o programa ImageJ Versão 1.44p foi utilizado. Esse programa está disponível gratuitamente na internet. A Figura 3.13 mostra o sistema de ImageJ. Para definir a escala nas imagens de macrografia uma régua com resolução de 1 mm foi utilizada (sempre a mesma régua). As fotos foram feitas com um estéreo-microscópio.

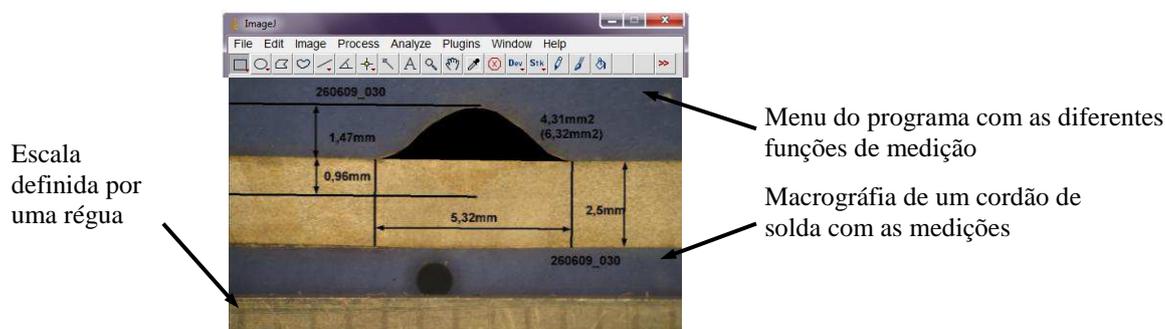


FIGURA 3.13 Programa ImageJ V1.44p

3.3 Discussão dos parâmetros principais

3.3.1 Ponto de transmissão da corrente no bico de contato

Para evitar a influência do ponto de transmissão da corrente no bico de contato nos resultados dos ensaios de soldagem, foi investigado o ponto de transmissão da corrente dentro do bico de contato e a influência deste. O objetivo foi descobrir onde a transmissão ocorre, a influência nos parâmetros de soldagem e o desenvolvimento de um bico de contato para evitar uma variação do ponto de contato.

Com um mecanismo simples é possível manter a distância entre bico de contato e corpo de prova constante, mas o ponto de contato da corrente pode mudar durante o processo e provocar uma variação nos valores da corrente e tensão. Ele pode ser colocado no início, meio, final ou nos vários pontos no bico de contato. A Figura 3.14 mostra esquematicamente a distância fixa entre bico de contato e peça de trabalho e a variação do ponto de transmissão da corrente dentro do bico de contato.

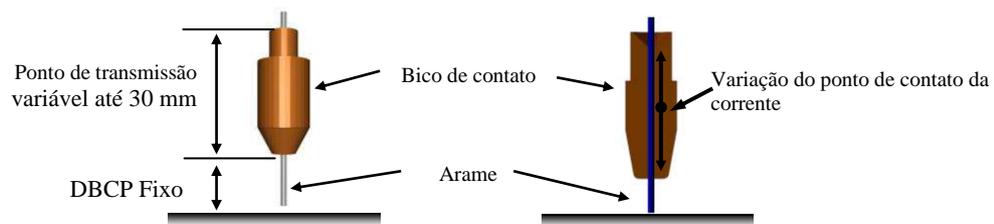


FIGURA 3.14 Variação do ponto de transmissão da corrente no bico de contato

Para descobrir onde a transmissão acontece, quatro diferentes bicos de contato foram preparados e testados. Para provocar a transmissão da corrente em um ponto definido, os bicos foram furados como apresentado na Figura 3.15. O espaço entre arame e bico foi isolado por um tubo cerâmico. Para a comparação um bico não usado, foi utilizado.

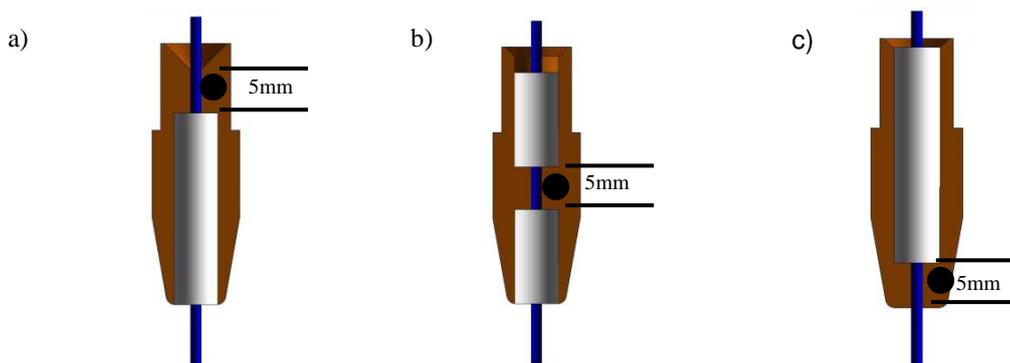


FIGURA 3.15 Ponto de transmissão a) na entrada, b) no meio e c) na saída

Os testes foram feitos com uma máquina de soldagem MIG/MAG convencional, sem sistema de regulagem do comprimento do arco. Para a monitoração foi usada o sistema apresentado no item 3.2.3.2. Os parâmetros são apresentados na Tabela 3.8.

TABELA 3.8 Parâmetros soldagem com variação do ponto de transmissão

Designação	Valor
Velocidade de alimentação	3,1m/min
Velocidade de soldagem	0,3m/min
Metal de base	S235/ 1,5mm
Metal de adição	G4Si1/ ϕ 1,0mm
Gás de proteção	82 % Ar + 18% Co ₂
Tensão chave de seletora	Constante, posição Geral 4, Fino 5
DBCP	Constante 12 mm

Os resultados mostrados na Tabela 3.9, apresentam, sem variação dos parâmetros da regulagem da máquina de soldagem, uma variação dos valores de corrente e tensão. Com a variação do ponto de transmissão da corrente na entrada do bico de contato até o final do bico de contato, um aumento da corrente e uma redução da tensão foram observados.

Na comparação dos resultados dos bicos modificados com os resultados do bico de contato novo, o ponto de transmissão de um bico novo é localizado na última parte deste. Isto significa que com o desgaste durante do processo, o ponto de transmissão muda para cima e provoca uma alteração dos resultados.

A explicação para a variação é a mudança da distância entre ponto de transmissão e a peça de trabalho e, com este o diferente comprimento do arame. Este efeito é comparável como uma variação da distância entre bico de contato e peça de trabalho.

Para os ensaios seguintes a variação da distância entre bico de contato e peça é não aceitável. O ponto de transmissão do corrente precisa ser fixado para evitar uma influência nos resultados.

TABELA 3.9 Resultados dos ensaios com variação do ponto de transmissão

Designação do ponto de transmissão	Tensão	Corrente	Aporte térmico	Varição do aporte térmico em comparação com bico novo
Entrada/ Início	19,7 V	82 A	1943 J/cm	24,9%
Meio	19,2 V	97 A	2237 J/cm	8,49%
Saida/ Final	18,9 V	114 A	2586 J/cm	-6,14%
Novo Bico	18,8 V	107 A	2427 J/cm	0

Para garantir durante o processo, que o ponto de transmissão da corrente não varie, bicos de contatos modificados foram usados. Figura 3.16 apresenta um desenho do bico modificado. Para garantir o ponto de transmissão localizado no final do bico, bicos convencionais foram furados até 5mm. Um isolador cerâmico (tubo) foi usado para evitar o contato do arame no bico antes do ponto definido.

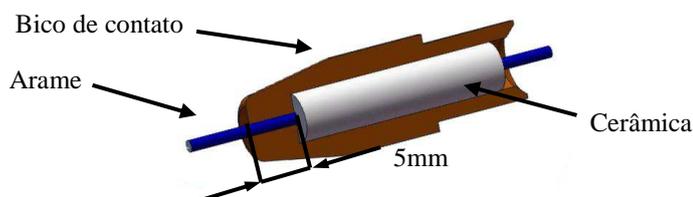


FIGURA 3.16 Bico de contato modificado para os testes

3.3.2 Freqüência de pulsação do processo

A freqüência de pulso representa idealmente o número das gotas transferidas para a poça de fusão por segundo.

A freqüência é um parâmetro com uma influência fundamental para o processo. Na fase de pulso o estrangulamento das gotas, uma parte importante da fusão do eletrodo e a transferência do metal ocorrem. A oscilação da corrente produz o som típico para o reconhecimento deste modo de transferência do metal. Ela é calculável com um modelo idealizado e dependente dos parâmetros, velocidade da alimentação do arame (V_{AR}), diâmetro do arame (d_{AR}) e diâmetro da gota (d_G) transferida na poça de fusão.

Com um comprimento do arco constante durante da soldagem, a taxa de alimentação do arame fica igual à taxa de fusão. Isto significa que, no mesmo tempo, o volume de arame alimentado (cilindro) se transforma numa gota fundida de mesmo volume (esfera), veja Figura 3.17. Com esta condição e uma gota por pulso, o número das gotas por segundo é igual da freqüência de pulsação.

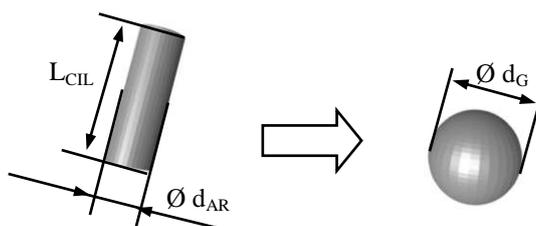


FIGURA 3.17 Transformação do cilindro (arame) em uma gota

O comprimento do cilindro (L_{CIL}) é relacionado com a velocidade da alimentação pela seguinte expressão:

$$L_{CIL} = \frac{1000}{60} * \frac{V_{AR}}{f} \quad (3.4)$$

Onde: V_{AR} - Velocidade de alimentação [m/min], f - frequência de pulsação [Hz].

Com estas condições, desprezando perdas por vaporização e considerando uma gota por pulso, o volume do cilindro é igual ao volume da gota (Equação 3.5).

$$\frac{\pi}{4} * d_{AR}^2 * \frac{V_{AR}}{f} * \frac{50}{3} = \frac{\pi}{6} * d_G^3 \quad (3.5)$$

Onde: d_{AR} - diâmetro do arame [mm], V_{AR} - Velocidade de alimentação [m/min], f - frequência de pulsação [Hz], d_G - diâmetro da gota [mm]

A transformação da Equação 3.5 para a frequência de pulsação é:

$$f = 25 * d_{AR}^2 * \frac{V_{AR}}{d_G^3} \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 apresenta a frequência de pulsação que é dependente dos parâmetros: velocidade da alimentação do arame (V_{AR}); diâmetro do arame (d_{AR}) e diâmetro da gota (d_G). Durante a soldagem, o diâmetro do arame é constante ou varia marginalmente com a tolerância de produção que não tem influência. A relação entre diâmetro do arame e o diâmetro da gota (R_{GA}) é fundamental para a frequência.

$$R_{GA} = \frac{d_G}{d_{AR}} \quad (3.7)$$

Com a Equação 3.7 a frequência resulta em:

$$f = 25 * \frac{V_{AR}}{R_{GA}^3 * d_{AR}} \quad (3.8)$$

Diferentes condições são possíveis: $R_{GA} < 1$ significa que os diâmetros das gotas são menores do que o diâmetro do arame, $R_{GA} = 1$ significa que os diâmetros das gotas são iguais ao diâmetro do arame e $R_{GA} > 1$ significa que os diâmetros das gotas são maiores que o diâmetro do arame.

Para o cálculo da frequência dos ensaios a relação R_{GA} foram considerados as seguintes valores: $R_{GA} = 0,9$; $R_{GA} = 1,0$; $R_{GA} = 1,1$.

A Figura 3.18 apresenta a relação entre frequência e velocidade de alimentação para as diferentes relações de R_{GA} , para arames de 1,0 e 1,2mm.

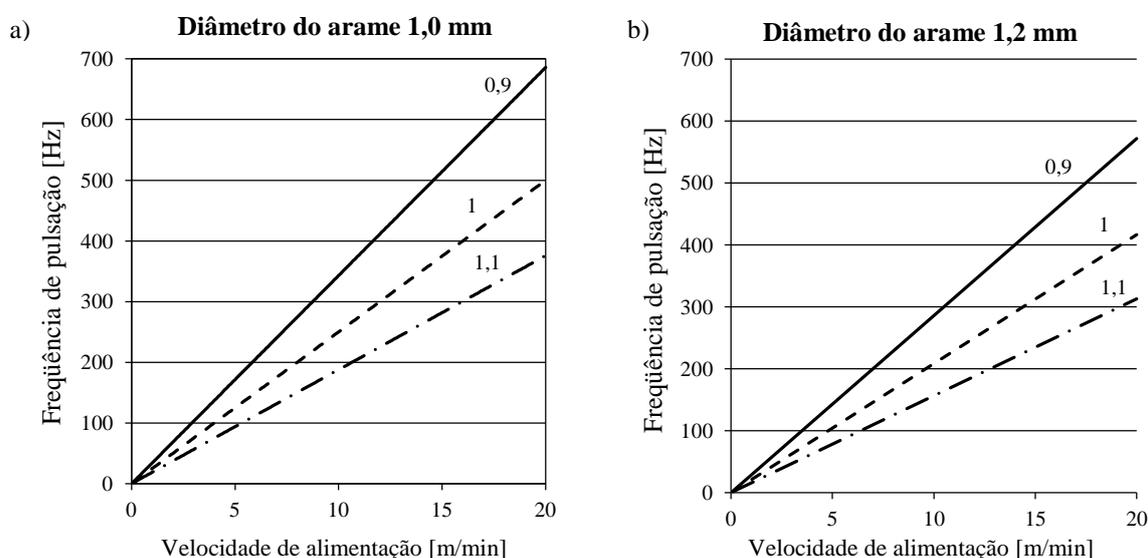


FIGURA 3.18 Relação da frequência e da velocidade de alimentação

a) para $d_{AR}=1,0\text{mm}$ e b) para $d_{AR}=1,2\text{mm}$

3.3.3 Modulação do processo

No item 2.3.4 foram apresentadas as modulações de $I_P - I_B$ e $U_P - I_B$ que são as comuns no processo arco pulsado. Para resultados representativos do estudo da influência dos parâmetros, os dois sistemas não foram considerados para os testes. A seguir, as vantagens e desvantagens destas modulações são explicadas e discute-se um sistema alternativo da modulação da corrente no processo.

A modulação $I_P - I_B$ é muito usada em fontes de soldagem da tecnologia arco pulsado, por causa da vantagem da corrente de pulso constante, a qual garante um estrangulamento constante (força de Lorentz) da gota e uma transferência do metal uniforme. Por causa da falta do efeito de auto-correção do comprimento do arco na modulação $I_P - I_B$, o processo precisa um sistema de regulagem adaptado para manter o comprimento do arco constante. A regulagem é feita através da variação da frequência do pulso ou da velocidade de alimentação do arame. Na situação de um comprimento do arco pequeno ou de um curto-circuito, o sistema aumenta a frequência ou reduz a velocidade de alimentação para aumentar o comprimento do arco.

Esta intervenção nos parâmetros frequência ou velocidade de alimentação não é aceitável para o estudo da influência dos parâmetros do presente trabalho, por que os resultados poderiam influenciados pela regulagem adaptada.

A outra maneira utilizada nas máquinas de arco pulsado convencionais é a modulação $U_P - I_B$. Nesta forma de modulação não é necessário adaptar um sistema de regulagem para manter o comprimento do arco constante. A auto-correção do comprimento é feito na fase de pulso. A regulagem mantém a tensão constante e varia a corrente do pulso. Esta alteração da corrente de pulso não é aceitável para o presente trabalho, por causa da variação da força de Lorentz a qual influencia significativamente o estrangulamento da gota. No caso de tempos do pulso curtos, o efeito de auto-correção pode ser insuficiente por causa de falta de tempo de regulagem.

As modulações alternativas são a modulação $U_P - U_B$ e a modulação $I_P - U_B$. As Figuras 3.19a e 3.19b apresentam esquematicamente os diagramas tensão-corrente (U-I).

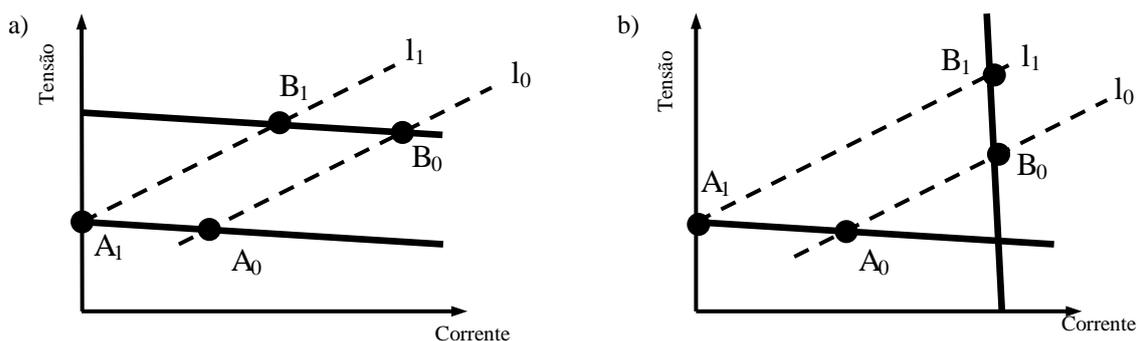


FIGURA 3.19 a) esquematicamente Modulação $U_P - U_B$ e

b) esquematicamente Modulação $I_P - U_B$

As duas modulações $U_P - U_B$ e $I_P - U_B$ não são recomendadas pela literatura para o processo de soldagem de arco pulsado. Por outro lado, a modulação $I_P - U_B$ tem vantagens na aplicação, que são interessantes na investigação da influência dos parâmetros principais.

A modulação $U_P - U_B$ apresenta mesmas variações da corrente de pulso como antes apresentado para a modulação $U_P - I_B$ e por causa desta desvantagem, esta modulação não foi considerada para esta investigação.

A fonte de soldagem com modulação $I_P - U_B$ oferece durante da fase de pulso a corrente constante. Ela varia a tensão desta fase para obter o valor da corrente programada. Com esta propriedade a força principal para o estrangulamento da gota, a força Lorentz, é mantida constante e uma alteração controlada é possível.

Nesta modulação, a característica da fase de base manda a tensão constante durante da fase de base e usa o efeito de auto-correção para a regulagem do comprimento do arco. Este mesmo efeito de auto-correção é usado na modulação U_P-I_B para manter o comprimento constante, sem necessidade de um sistema de regulagem adaptado.

Uma desvantagem da modulação $I_P - U_B$ é a possibilidade da corrente de base poder chegar a zero e o arco se extinguir. A Figura 3.19 ilustra uma variação do comprimento do arco l_0 para l_1 , portanto o ponto de operação da fonte de soldagem muda do ponto A_0 para A_1 . Neste caso a corrente de base é zero e o arco extinguiu. Esta possibilidade da extinção do arco faz a modulação não recomendável pela literatura [97].

Para evitar a possibilidade da extinção do arco na variação da distância entre bico de contato e peça de trabalho, a corrente mínima foi limitada. Se o ponto de operação passou do valor programado da corrente mínima, a fonte mudou para a modulação I_P-I_B para voltar nas condições adequadas de soldagem.

3.3.4 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem tem uma influência significativa na quantidade de calor na solda. Ela foi selecionada (análise com câmera alta velocidade) de forma que o arco não ficava diretamente em cima da poça de fusão. Em cima de poça de fusão, o arco pode provocar falta de fusão na solda e curtos-circuitos no processo. A Figura 3.20 apresenta as condições regulares e irregulares. Durante os testes de soldagem, a velocidade foi mantida constante.

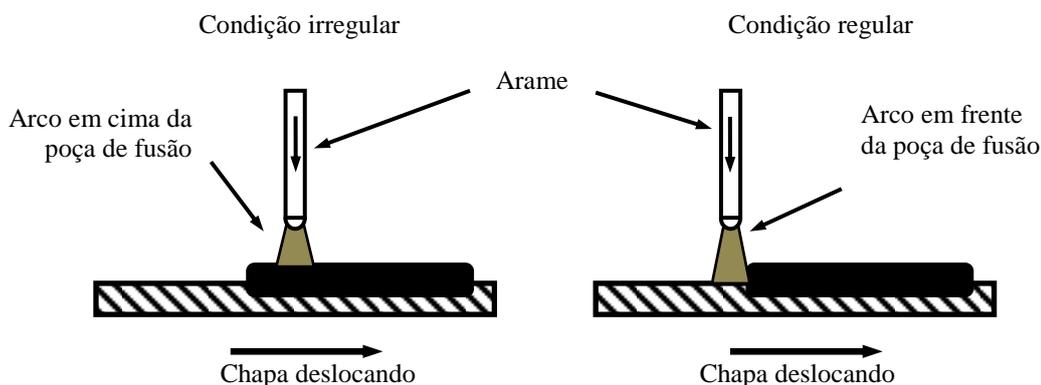


FIGURA 3.20 Esquemáticamente condições regulares e irregulares na velocidade de soldagem com tocha fixa e chapa deslocada

3.3.5 Comprimento do arco

O comprimento do arco influencia a formação da solda, a ocorrência de curtos-circuitos, a taxa de respingos, a área de limpeza catódica do arco e a estabilidade do processo. Ele é definido como a distância entre a ponta do eletrodo com o material fundido e a poça de fusão.

No processo arco pulsado é possível definir o comprimento de três características. As três características são (Figura 3.21): comprimento muito curto, ideal e muito longo.

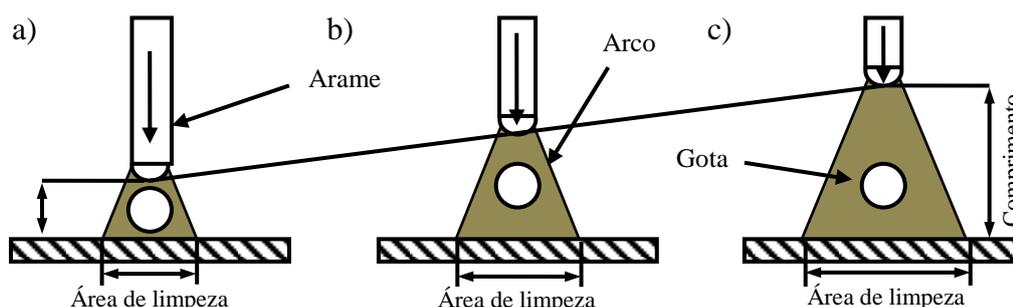


FIGURA 3.21 Comprimento do arco com a) muito curto, b) comprimento ideal e c) comprimento muito longo

Muito curto: o arco é curto demais se a distância entre eletrodo e poça de fusão não é suficiente para transferir a gota sem formar uma ponte de curto-circuito entre eletrodo e poça de fusão. No caso de uma gota de metal fundido esférica, o comprimento do arco é curto demais se a distância entre o fim do eletrodo e a poça de fusão é menor do que o diâmetro da gota. A formação de curto-circuito provoca respingos e a extinção do arco. Estes efeitos podem criar descontinuidades na solda, por exemplo, falta de fusão e o aumento da quantidade de respingos. Os curtos-circuitos são detectáveis no sinal da tensão da soldagem. Este acontecimento no arco não está de acordo com a definição da transferência do metal no processo arco pulsado.

Comprimento ideal: a condição ideal é a transferência por vôo livre do metal sem formação de curtos-circuitos. A distância entre o ponto fundido do eletrodo e a poça de fusão é maior do que o diâmetro da gota, mas com um comprimento limitado por cima. Pré-testes mostraram uma distância maior do que o dobro do diâmetro da gota é suficiente para evitar a formação de curtos-circuitos.

Comprimento do arco muito longo: a transferência do metal decorre da mesma maneira como no comprimento ideal, em forma vôo livre, mas a distância entre eletrodo e poça de fusão é muitas vezes maior do que o diâmetro da gota.

Um comprimento do arco grande demais pode provocar várias discontinuidades na solda e influenciar a transferência do metal de forma significativa. Os seguintes defeitos podem ocorrer.

Mordeduras: o arco funde lateralmente da solda o material de base e forma reentrâncias. O material de adição não é suficiente para reenchê-las e resulta em uma redução da espessura de metal de base neste local. Especialmente fora de posição de soldagem, a força de gravidade da solda aumenta o efeito da formação de mordeduras [23].

Duas gotas no arco: se a velocidade da transferência da gota não é suficiente, a primeira gota estrangulada (Pulso 1) pode ainda estar voando enquanto o seguinte pulso e o seguinte estrangulamento (Pulso 2) da segunda gota ocorrem. A Figura 3.22 ilustra esquematicamente o acontecimento. As duas gotas podem cair juntas ou separadamente, entrando na poça de fusão.

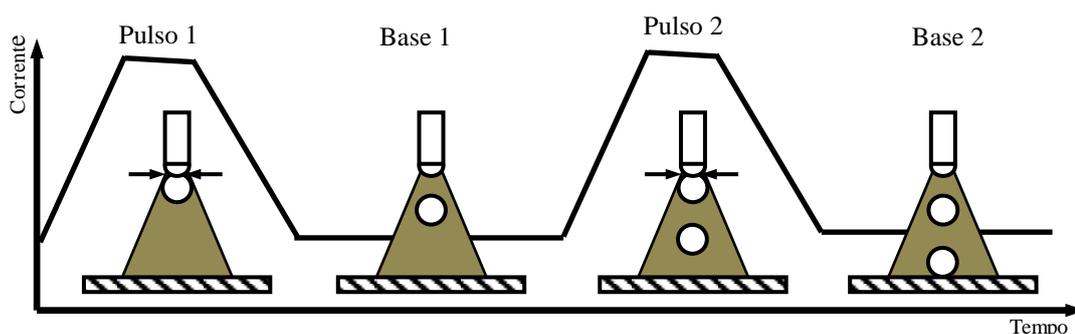


FIGURA 3.22 Esquematicamente a formação de duas gotas voando no arco causado pelo comprimento do arco demais

Efeito sopro magnético: o efeito sopro magnético descreve o deslocamento do arco causado pela força de um campo magnético. Com o aumento do comprimento do arco, a influência cresce e reduz o controle sobre o arco dificultando a soldagem. A trajetória da gota pode ser influenciada tal que a gota não consegue entrar na poça de fusão [23].

Deslocamento da gota causa pela força de gravidade: na soldagem fora de posição, por exemplo, sobre cabeça ou horizontal, o comprimento do arco aumenta a influência da força de gravidade que age na gota. Ela pode provocar um deslocamento da gota e provocar discontinuidades na transferência do metal e na formação do cordão.

3.4 Procedimento experimental

Os ensaios foram feitos com o seguinte procedimento.

- Preparar o corpo de prova, limpando com acetona e marcando com número do teste, fixar o corpo de prova na mesa de deslocamento;
- Programar os parâmetros na fonte de soldagem, no sistema de movimento linear da solda e os parâmetros na câmera da alta velocidade;
- Verificar a distância entre bico de contato e corpo da prova, assim como a ângulo da tocha;
- Executar da solda;
- Avaliar visualmente da solda, das imagens da câmera de alta velocidade e dos sinais de corrente e tensão;
- Documentar os resultados no protocolo de ensaio;
- Verificar a temperatura do dispositivo e trocar corpo da prova;
- Repetição o teste com mesmos parâmetros;
- Alterar os parâmetros;
- Depois de 10 soldas, trocar o bico de contato;
- Preparar análise macrográfica.

A seguir serão apresentados os objetivos dos ensaios e a variação dos parâmetros.

3.4.1 Polaridade do eletrodo

O objetivo dos ensaios é a investigação da influência da polaridade do eletrodo referente a:

- Transferência do metal;
- Estrangulamento da gota com as forças que estão atuando;
- Estabilidade do processo.

A polaridade com o eletrodo no pólo positivo é padrão para processo de soldagem que utilizam eletrodo consumível, mas quando se faz revestimento de chapas ou utiliza processos de soldagem com eletrodo não consumível é muito usado colocar o pólo negativo no eletrodo. Primeiro, foi feita a análise da transferência do metal com o eletrodo positivo, com uma velocidade de alimentação do arame 5m/min e uma velocidade de soldagem de 0,6m/min. Objetivo foi encontrar um conjunto de parâmetros com uma transferência do metal uniforme e ocorrendo a cada pulso.

Em seguida foi feita a análise da transferência com os mesmos parâmetros, mas com a polaridade invertida (eletrodo negativo). O objetivo foi comparar as transferências do metal com os mesmos parâmetros, só com variação da polaridade do eletrodo.

O foco foi na análise da transferência do metal pelas imagens da câmera de alta velocidade.

3.4.2 Modulação I_p-U_B

No item 3.3.3 a modulação I_p-U_B foi apresentada com as vantagens teóricas para os ensaios. O objetivo foi testar a modulação em condições experimentais e verificar as propriedades de auto-correção dela. Foi necessário esclarecer se a modulação I_p-U_B é aplicável em diferentes condições de soldagem e se apresenta as vantagens. Os ensaios foram feitos da seguinte maneira.

O estudo das propriedades dinâmicas de auto-correção foram feitos pela variação da distância entre bico de contato e peça de trabalho, veja Figura 3.23. A tocha foi fixada e a chapa movimentava. Os parâmetros principais forma: 5m/min de velocidade de alimentação do arame e 0,6m/min de velocidade de soldagem.

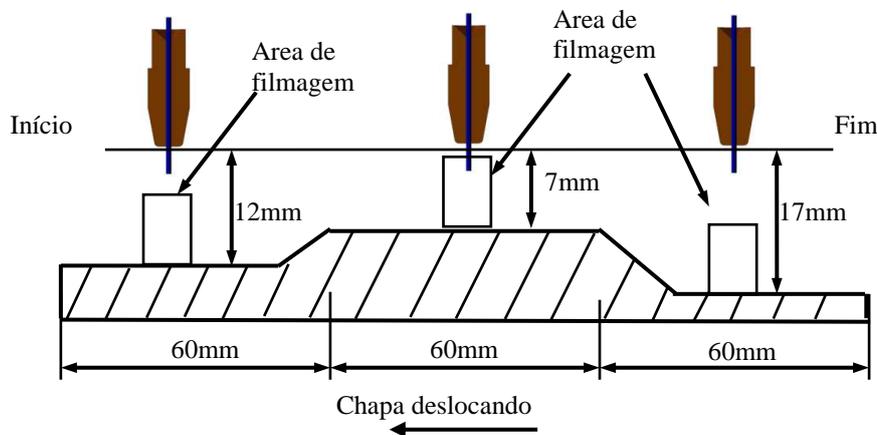


FIGURA 3.23 Esquematicamente corpo de prova para variação da distância entre bico de contato e corpo de prova

Como a área de filmagem da câmera não foi suficiente para cobrir esta variação nas imagens, a captação foi feita em três turnos. A cada turno com o foco da câmera no arco. Os resultados foram analisados pelas imagens de alta velocidade e os sinais de tensão e corrente.

3.4.3 Parâmetros principais da fase de base

Com a modulação I_p-U_B , a fase de base é o período do processo onde deve ocorrer a auto-correção do arco. Os principais parâmetros são o seu tempo de duração e os valores de tensão e corrente.

Pela característica do processo arco pulsado não foi possível variar o tempo da duração da fase de base, sem influenciar a frequência de pulsação ou influenciar a fase de pulso, portanto, o tempo não foi variado para não provocar a mistura dos efeitos dos parâmetros. Pela característica da modulação, a tensão da base determina a corrente de base. Como a tensão de base é fundamental para a fase de base, a sua influência foi investigada.

O objetivo foi verificar a influência da tensão de base na formação do arco. Nos ensaios, os parâmetros da fase de pulso foram mantidos constantes.

3.4.4 Parâmetros principais da fase de pulso

A fase de pulso é o período do processo onde deve ocorrer o estrangulamento da gota. Os principais parâmetros da fase de pulso são: a característica da subida da corrente de pulso, o valor da corrente/tensão de pulso, duração da corrente/tensão do pulso, a característica da descida da corrente e a frequência de pulsação.

Objetivo foi investigar a influência dos parâmetros na transferência do metal na característica do arco e nas características geométricas. Os ensaios foram feitos pela variação da seguinte maneira:

- Variação do tempo da descida da corrente de pulso;
- Variação da corrente de pulso;
- Variação do tempo de pulso;
- Variação da frequência de pulsação.

Pelo sistema de programação da fonte de soldagem, a subida da corrente de pulso foi definida pela característica da subida. Não foi possível programar o tempo de subida.

O sistema da programação não liberou a alteração da característica da subida da corrente do pulso. Foi possível variá-la em três passos como: subida suave, subida média e subida rápida (Figura 3.24). O modo de subida suave e média influenciaram a corrente de pulso de forma significativa, portanto, a subida da corrente foi definida para todos os ensaios com a característica rápida para não influenciar o tempo e o valor da corrente de pulso.

Os principais parâmetros dos testes foram definidos com a velocidade de alimentação de arame de 5m/min e com a velocidade de soldagem de 0,6 m/min.

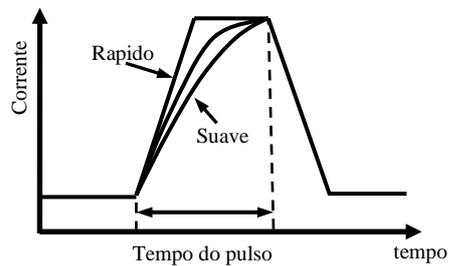


FIGURA 3.24 Esquemáticamente a variação da característica da subida da corrente

3.4.5 Limites do processo

A aplicação do processo de arco pulsado é limitada inferior pela estabilidade do arco e, superior pela frequência de pulso. Na discussão da influência da frequência de pulsação, no item 3.3.2, foi apresentado como a frequência interage com a velocidade de alimentação do arame e com volume da gota. O aumento da velocidade de alimentação do arame resulta no aumento da frequência de pulsação. Com a duração do pulso e o tempo da descida da corrente definida, o tempo da fase de base se reduz até a fase de base desaparecer no processo. A Figura 3.25 apresenta o efeito da redução do tempo da fase de base pelo aumento da velocidade de alimentação e aumento da frequência de pulsação com a) ciclo completo da fase de pulso e fase de base, b) ciclo completo de pulso sem fase de base e c) um ciclo de fase de pulso incompleto. Para investigar a limitação inferior, a velocidade de alimentação do arame foi reduzida até o arco não apresentar mais comportamento estável. O limite superior do processo foi investigado pela velocidade de alimentação do arame até um ciclo completo da fase de pulso e da fase de base será feito com uma relação entre tempo de pulso e tempo de base cerca de 1 (tempo de pulso e base iguais).

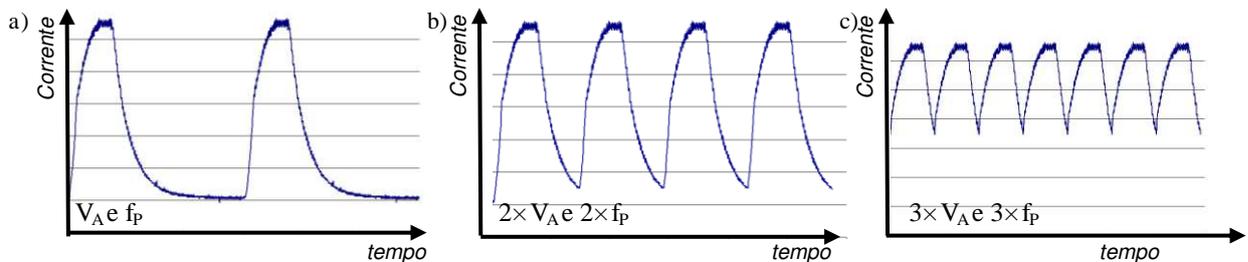


FIGURA 3.25 Variação da velocidade de alimentação com a frequência de pulsação com tempo de pulso e tempo da descida da corrente definida

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Variação da polaridade do eletrodo

Os ensaios principais da variação da polaridade do eletrodo foram feitos com arame de G4Si1 com diâmetro 1,2mm. A velocidade de alimentação do arame foi 5m/min com uma velocidade de soldagem de 0,6m/min. Para comparar as formas de transferência do metal, os parâmetros principais foram mantidos constantes. A troca da polaridade foi feita pela troca dos cabos da fonte de soldagem. Depois dos ensaios principais, o material foi trocado para alumínio (Metal de base AlMgSi0,7 e metal de adição AlSi5) para confirmar o resultado obtido com aço.

4.1.1 Resultados dos ensaios da variação da polaridade

Nos ensaios com o pólo positivo no arame, a transferência do metal do arame para a poça de fusão foi uniforme com a frequência de pulso e com uma gota inteira por pulso. O processo não apresentou curtos-circuitos. A Figura 4.1 apresenta uma seqüência representativa do que foi observado.

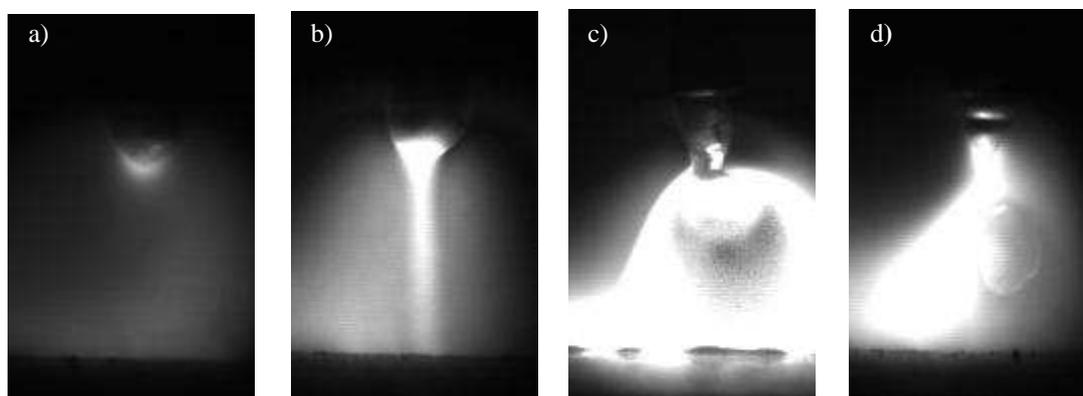


FIGURA 4.1 Seqüência representante do ensaio com pólo positivo no eletrodo

A Figura 4.1a apresenta a fase de base. Nesta fase, o valor da corrente foi de cerca de 42A com uma tensão do arco de 21V. Por causa dos valores baixos de corrente e de tensão, a imagem foi menos iluminada do que na fase de pulso. O arco está concentrado em baixo, na ponta do eletrodo no material fundido. A concentração é observável por causa da maior iluminação nesta área.

A Figura 4.1b apresenta o momento que inicia a subida da corrente de pulso. Pela concentração da iluminação da imagem no centro do arco, a maior parte da corrente passa

neste momento no centro do arco e forma uma coluna de corrente. Com a subida da corrente, o diâmetro da coluna aumenta. Se o diâmetro da coluna de corrente alcança do diâmetro do eletrodo, o arco se transforma em uma forma cônica. A área em contacto com a poça de fusão é maior que a área no fim do eletrodo.

A Figura 4.1c apresenta a fase de pulso. Durante esta fase o valor da corrente de arco foi cerca de 490A com uma tensão de 37V. Com a subida da corrente, a força de Lorentz aumentou e a gota foi estrangulada, o que foi observável na imagem pela redução do diâmetro na ponta do eletrodo. O arco está cobrindo a gota. A imagem é muito iluminada neste momento, por causa da intensidade do arco. A sombra preta na imagem apresenta a sobrecarga do sensor da câmera de alta velocidade. Nesta sombra preta, o arco foi mais intenso nesta imagem.

A Figura 4.1d apresenta a fase de descida da corrente. O destacamento da gota já ocorreu. Ela não tem uma conexão nem com o eletrodo e nem com a poça de fusão. A gota esférica voa em direção à poça de fusão.

Durante a duração da solda o comprimento do arco manteve-se constante. O processo ocorreu estável, a Figura 4.2 apresentada a diagrama U-I do ensaio sem a presença de curtos-circuitos.

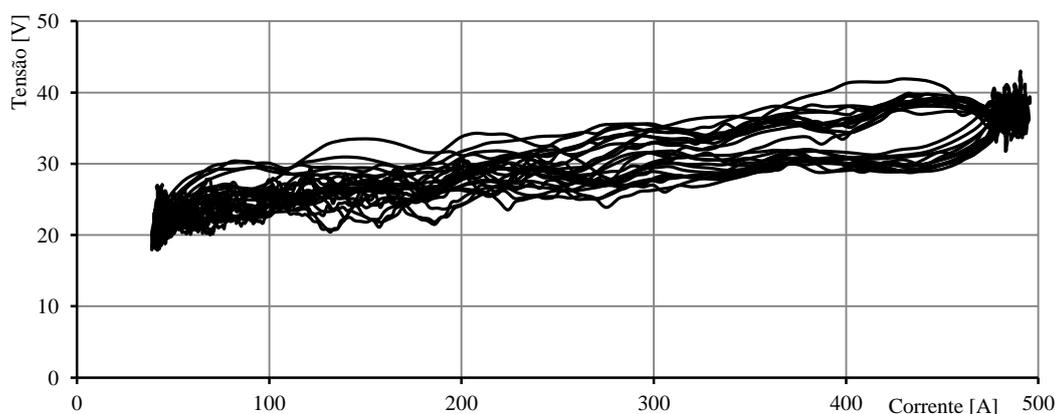


FIGURA 4.2 Diagrama U-I do processo pulsado com pólo positivo no eletrodo

Depois da documentação dos ensaios com pólo positivo, os ensaios de pólo negativo foram feitos. Os principais parâmetros foram mantidos constantes.

Durante a soldagem com o eletrodo negativo, foi possível identificar curtos-circuitos visualmente e acusticamente. A análise dos sinais de corrente e tensão confirmou a presença dos curtos-circuitos. A Figura 4.3 apresenta a diagrama U-I do processo. Para melhorar a apresentação visual do diagrama e por comparação dos resultados, os valores negativos da corrente e tensão foram transformados em valores positivos.

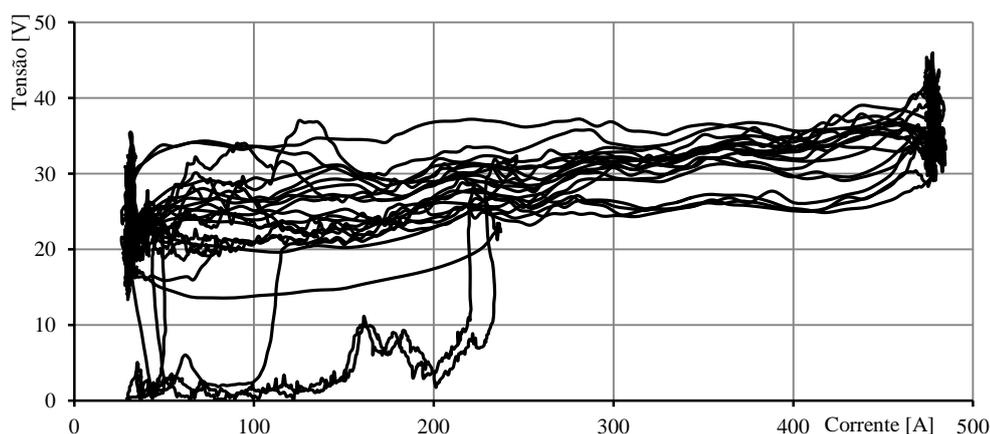


FIGURA 4.3 Diagrama U-I do processo com pólo negativo no eletrodo (Valores negativos foram transformados em valores positivos)

Pela inspeção visual do cordão de solda, observou um cordão em condições não uniforme com uma variação da largura do cordão. Nas laterais das soldas, foram encontrados respingos de diferentes tamanhos.

A análise da transferência do metal pelas imagens da câmera de alta velocidade apresentou a transferência do metal ocorreu não uniforme, vários pulsos de corrente foram necessários para transferir a gota na poça de fusão (cerca de cinco à dez pulsos). A Figura 4.4 apresenta uma seqüência de cinco pulsos consecutivos. As imagens foram capturadas na fase de base ou no início da subida da corrente de pulsos (iluminação melhor da imagem). A forma da transferência foi não comparável com a transferência do metal com eletrodo positivo. Várias vezes a gota não foi inteira transferida em uma forma esférica. Várias pequenas gotas, grandes gotas cilíndricas ou respingos foram formados.

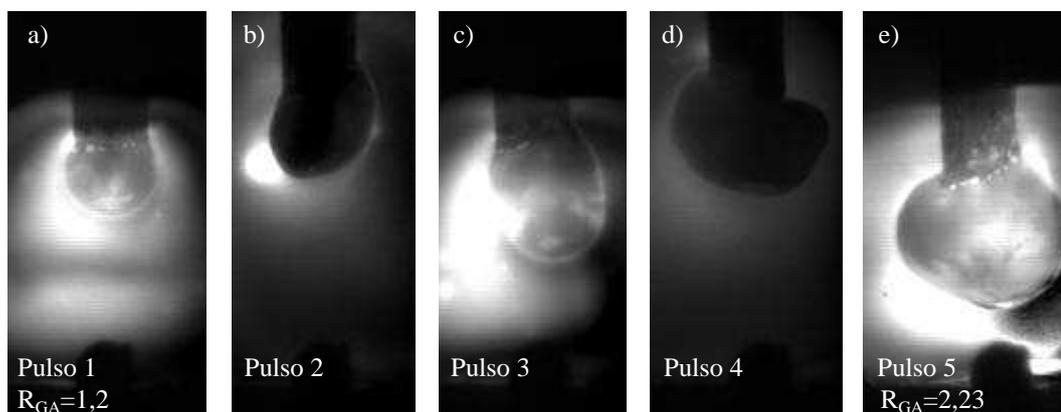


FIGURA 4.4 Seqüência cinco pulso consecutivo no pólo negativo

4.1.2 Discussão dos resultados da variação da polaridade

A transferência do metal utilizando pólo positivo no eletrodo apresentou o resultado esperado. Foi uma transferência uniforme, controlada e sem formação de respingos.

Mantendo os mesmos parâmetros de soldagem, e com o pólo negativo no eletrodo, a transferência não foi controlada. Nestes testes, a força de Lorentz, que foi fundamental para o estrangulamento na fase de pulso (pólo positivo no eletrodo), não apresentou um efeito de estrangulamento para a transferência do metal. Este fenômeno é explicável pela forma do arco e densidade da corrente. A Figura 4.5a apresenta o arco na fase de base com pólo positivo no eletrodo. Na ponta do eletrodo tem o material fundido, a gota. O arco abraça a gota até cerca de sua metade, apresentado pelos raios brancos na imagem. A forma do arco é cônica com maior área na poça de fusão. Na fase de pulso, o arco subiu e o estrangulamento da gota ocorre. A Figura 4.5b apresenta o arco na fase de base com pólo negativo no eletrodo. O arco abraça a gota completamente, apresentado pelos raios brancos. A forma de arco é esférica. Na fase de pulso a concentração do corrente não foi suficiente para estrangular a gota, por causa da maior área.

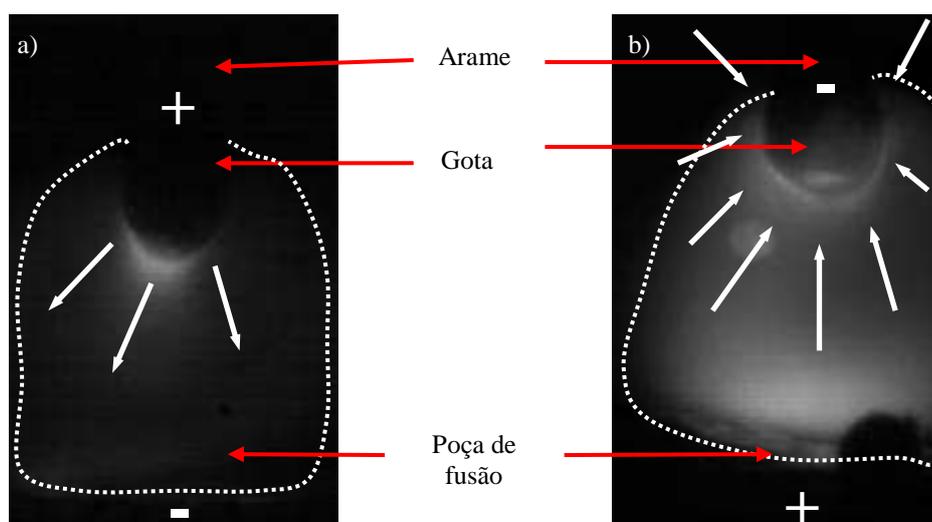


FIGURA 4.5a) eletrodo positivo na fase de base e b) eletrodo negativo na fase de base

Na fase de subida da corrente, no início da fase de pulso, o mesmo fenômeno foi mais claramente observado. A Figura 4.6 compara a fase de subida da corrente com as duas polaridades. As imagens foram capturadas com o intervalo entre as imagens a-b e c-d de 0,2ms. Os valores de corrente e tensão sobem de 71A e 25V na imagem 4.6a para os valores de 250A e 27V na imagem 4.6b. O diâmetro da coluna do arco aumenta e se transforma em uma forma cônica. O arco está ainda localizado no lado em baixo da gota. O estrangulamento está iniciando.

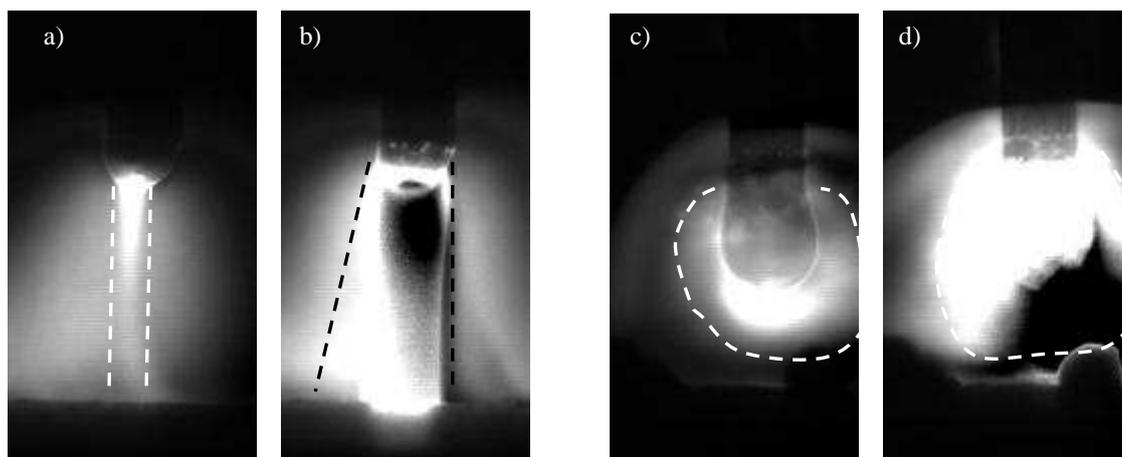


FIGURA 4.6 a) eletrodo positivo na fase de subida da corrente de pulso com a forma de arco cônico, 71A / 25V e 250A / 27V e b) eletrodo negativo na fase de subida da corrente com forma de arco esférica -72A / -24V e -261A / -27V

Em comparação das imagens 4.6c e 4.6d com as imagens 4.6a e 4.6b, os resultados dos ensaios com pólo positivo no eletrodo, o arco tem forma esférica. Os valores da corrente e tensão sobem de -72A e -24V na imagem 4.5c para os valores de -261A e -27V na imagem 4.5d. A intensidade do arco aumenta e cobri a gota completamente. A área da influência da força Lorentz aumenta. A força de Lorentz não foi suficiente para estrangular a gota.

Nos ensaios com pólo negativo no eletrodo, a transferência do metal foi feita pela força gravitacional. Com cada pulso, sem transferência do metal, o volume e o peso do material fundido na ponta do eletrodo aumentou. A relação entre diâmetro da gota e diâmetro do arame quase dobro, como as imagens a) e d) da Figura 4.4 apresentam. O volume pelo menos quadruplicou.

Com este efeito a influência da força gravitacional aumentou até que ela foi suficiente para transferir a gota na poça de fusão.

Os respingos e os curtos-circuitos na transferência do metal foram causados pelo aumento do volume da gota. A distância entre a gota e a poça de fusão não foi suficiente para transferir a gota em forma queda livre. Pontes de curto-circuito foram formadas. A força da tensão superficial não foi suficiente para formar uma gota única esférica. A gota grande se transformou em várias pequenas gotas e nem todas foram transferidas para a poça de fusão, algumas resultaram em respingos.

Para verificar os resultados, a falta de força de Lorentz suficiente para estrangular a gota, foi tentado aumentar a corrente de pulso significativamente. O resultado não apresentou uma variação em comparação dos primeiros ensaios.

Pela fonte de soldagem não foi possível aumentar a corrente de pulso em uma faixa ampla, portanto, o material de base e de adição foi trocado para alumínio (Metal de base- AlMgSi0,7 e metal de adição AlSi5). A faixa de fusão do alumínio é cerca três vezes menor que do aço, portanto, precisa menos energia para resultar em uma transferência do metal uniforme. Para reduzir a energia de fusão o diâmetro do arame foi reduzido para 1,0mm. O procedimento dos ensaios foi o mesmo usado com aço.

Os resultados foram comparáveis com os resultados do aço. A duplicação da corrente de pulso de 240A, a qual provocou um estrangulamento uniforme no processo com pólo positivo, para a corrente de pulso de 480A, não resultou em uma melhoria das condições de estrangulamento.

Resumindo, a polaridade do processo é fundamental para a transferência do metal. Para resultar em uma transferência controlada, a força de Lorentz é decisiva. Com pólo negativo no eletrodo, a força de Lorentz não foi suficiente para estrangular a gota. Só nos testes com pólo positivo no eletrodo, o estrangulamento e a transferência do metal foram controlados.

4.2 Modulação I_P-U_B

A modulação I_P-U_B foi testada pela variação da distância entre o bico de contato e o corpo de prova. Esse foi preparado com diferentes espessuras para simular uma variação das condições de soldagem, como apresentado no item 3.4.2, Figura 3.23. Um arame do diâmetro de 1,2mm foi usado. Os testes foram feitos com os parâmetros apresentados na Tabela 4.1. A velocidade de soldagem foi constante e igual a 0,6m/min. Pela seleção da frequência de pulsação, um menor diâmetro da gota do que do diâmetro do arame foi provocado. A duração do pulso foi máxima para provocar a redução do tempo disponível para a auto-correção do comprimento do arco. Os resultados foram avaliados nas características da transferência do metal, do comprimento do arco, da corrente e tensão, do aporte térmico e das características geométricas.

TABELA 4.1 Parâmetros principais dos ensaios da modulação

DBCP	Básicas		Pulso				Base
	Velocidade Alimentação	Frequência[Hz]	Subida[ms]	Descida[ms]	Corrente[A]	Duração[ms]	Tensão[V]
12mm	5m/min	135	0,5	0,5	380	3	22
7mm	5m/min	135	0,5	0,5	380	3	22
17mm	5m/min	135	0,5	0,5	380	3	22

4.2.1 Resultados dos ensaios da Modulação I_p-U_B

Com uma distância entre bico de contato e corpo de prova de 12mm, o arco apresentou propriedades estáveis. O estrangulamento da gota e a transferência da gota para a poça de fusão foram uniformes. A cada pulso de corrente uma gota inteira foi transferida. O comprimento do arco não apresentou uma variação. A medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem resultou em um valor médio de 3,5mm. A Figura 4.7 apresenta o arco na fase da subida da corrente em diferentes momentos da soldagem com uma distância entre bico de contato e corpo de prova de 12mm.

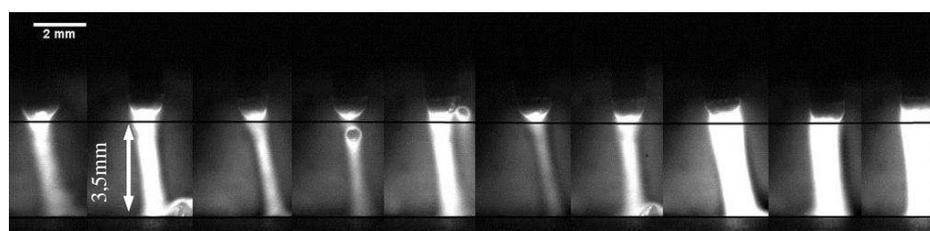


FIGURA 4.7 Comprimento do arco (3,5mm) em 10 diferentes momentos com DBPD=12 mm

A Figura 4.8 ilustra no diagrama U-I, os dados da corrente e tensão capturados nesta fase do processo. Na fase de base do processo, uma variação da corrente de base na uma faixa de 50A foi observada.

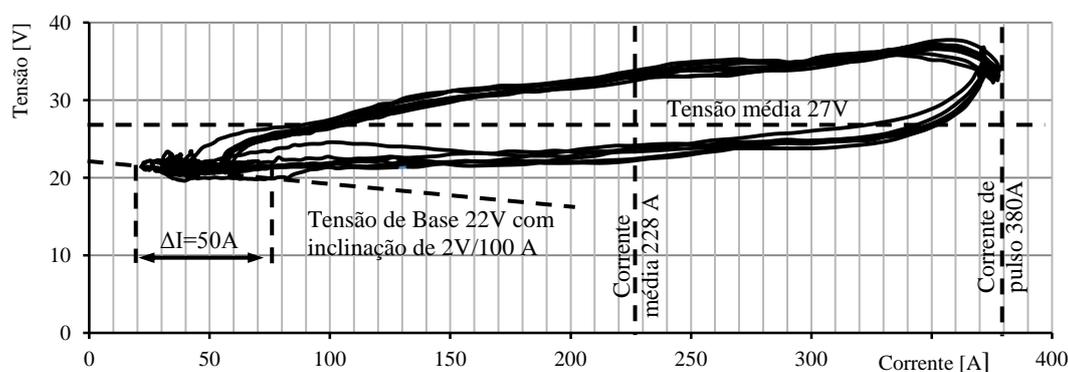


FIGURA 4.8 Diagrama U-I com DBCP=12mm, tensão média 27V e corrente média 228A

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios da corrente e da tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com DBCP=12mm.

TABELA 4.2 Análise da corrente e tensão dos ensaios DBCP=12mm

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,57	2,34	1,97	44,6	27,1	228,0	6183
2	7,74	2,24	2,22	43,6	27,3	228,3	6226
ME	8,2	2,29	2,10	44,1	27,2	228,2	6205

Depois da distância de bico de contato e peça de trabalho de 12mm a distância foi reduzida pelo corpo de prova para 7mm. A transferência da gota não foi uniforme. Foi não possível estrangular com a cada pulso uma gota e transferir a gota para a poça de fusão. O número de pulsos variou em um até três pulsos da corrente para transferir uma gota. O comprimento do arco não apresentou uma variação. A medição do comprimento do arco em diferentes momentos da soldagem resultou um comprimento médio de 2mm. A Figura 4.9 apresenta o arco na fase de subida da corrente em diferentes momentos da soldagem. Alguns curtos-circuitos foram detectados.

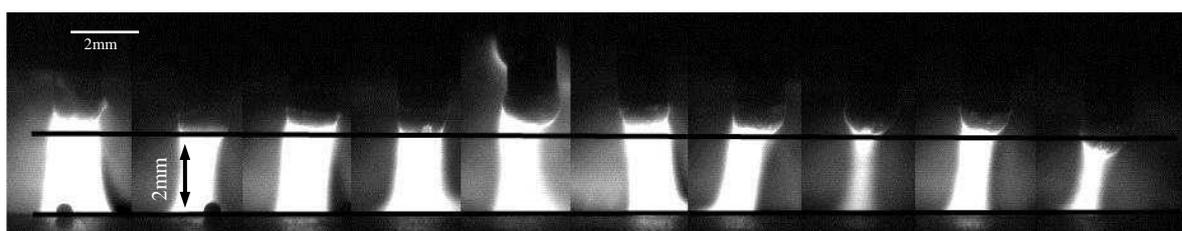


FIGURA 4.9 Comprimento do arco (2mm) em 10 diferentes momentos com DBPD=7mm

A Figura 4.10 ilustra no diagrama U-I os dados da corrente e tensão capturados nesta fase do processo. Na fase de base do processo uma variação da corrente de base numa faixa de 80A foi observada.

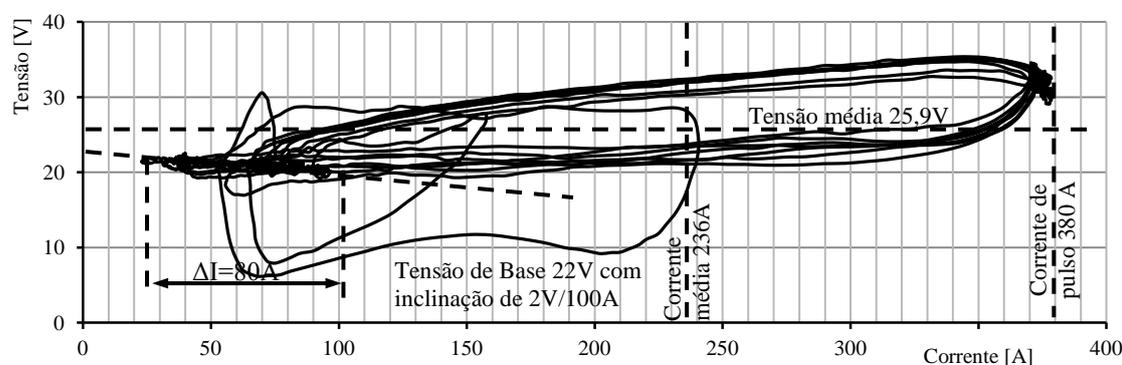


FIGURA 4.10 Diagrama U-I com DBCP=7mm, tensão média 25,9V e corrente média 236A

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com DBCP=7mm.

TABELA 4.3 Análise da corrente e tensão dos ensaios DBCP=7mm

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,28	2,41	1,93	50,3	26,2	236,6	6190
2	8,96	2,34	1,91	52,2	25,6	236,7	6067
ME	8,62	2,38	1,92	51,3	25,9	236,7	6129

Depois da distância de bico de contato e peça de trabalho de 7mm, a distância foi aumentada pelo corpo de prova para 17mm. O estrangulamento da gota foi uniforme. Com cada pulso foi transferida uma gota na poça de fusão. Em alguns pulsos foram formadas pequenas gotas adicionais à gota principal. A Figura 4.11 apresenta quatro diferentes pulsos em diferentes momentos da soldagem. O arame e as gotas são marcados por causa da falta de contraste na impressão das imagens. As imagens são mais escuras por causa da descida da corrente e a menor iluminação da imagem pelo arco.

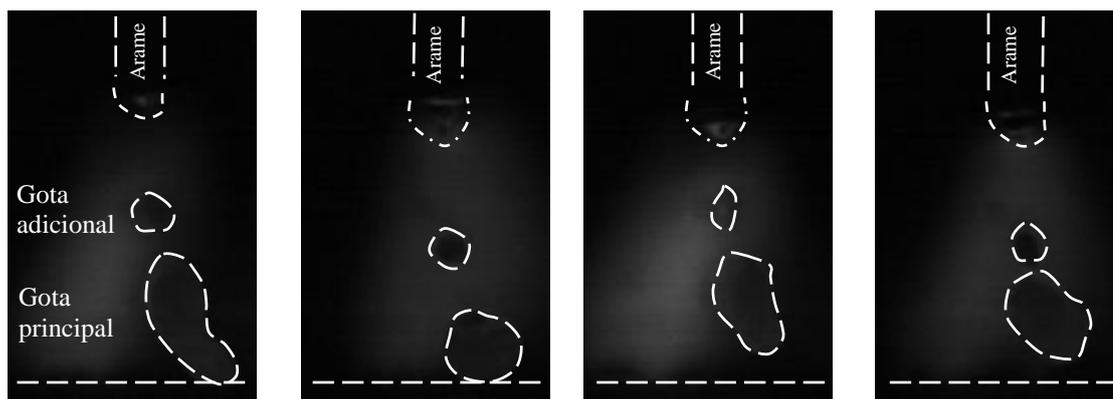


FIGURA 4.11 Transferência do metal de quatro diferentes pulsos em diferentes momentos da solda com formação de uma gota adicional

O comprimento do arco foi constante a duração da solda. A medição apresentou um valor médio de 3,9mm, como apresentado na Figura 4.12.

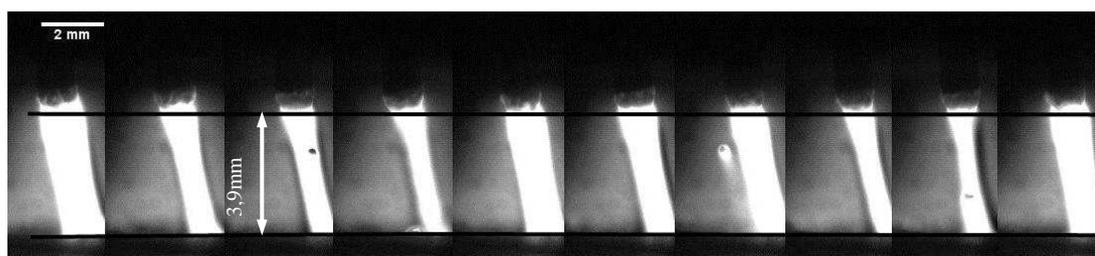


FIGURA 4.12 Comprimento do arco em 10 diferentes momentos com DBPD=17mm

A Figura 4.13 ilustra no diagrama U-I os dados da corrente e tensão capturados nesta fase do processo. Na fase de base do processo uma variação da corrente de base na uma faixa de 20A foi observada.

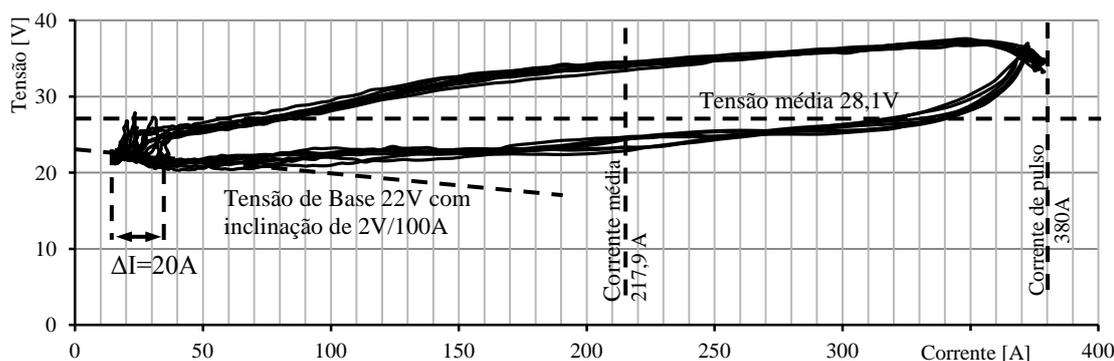


FIGURA 4.13 Diagrama U-I com DBCP=17mm

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com DBCP=17mm.

TABELA 4.4 Análise da corrente e tensão dos ensaios DBCP=17mm

DBCP [mm]	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	7,45	2,25	2,06	43,9	28,0	217,6	6088
2	7,41	2,21	2,19	40,9	28,2	218,2	6143
ME	7,43	2,23	2,13	42,4	28,1	217,9	6116

4.2.2 Discussão dos resultados modulação I_P-U_B

Durante todos os ensaios da soldagem, os comprimentos dos arcos estiveram constantes. Na variação da distância entre bico de contato e corpo da prova na faixa de 10mm, o arco não extinguiu ou retrocedeu no bico de contato, o que apresenta a propriedade de auto-correção da modulação I_P-U_B em combinação com a variação das condições de soldagem.

Os comprimentos dos arcos se estabilizaram em diferentes valores. Nos ensaios de DBCP=12mm e DBCP=17mm, os arcos se estabilizaram em comprimentos similares, de 3,5mm e 3,9mm. Na distância de 7mm o arco se estabilizou no valor de 2mm. A Figura 4.14 compara os comprimentos dos três diferentes arcos. A redução do comprimento para 2mm pode ser explicada pela variação da frequência da transferência do metal.

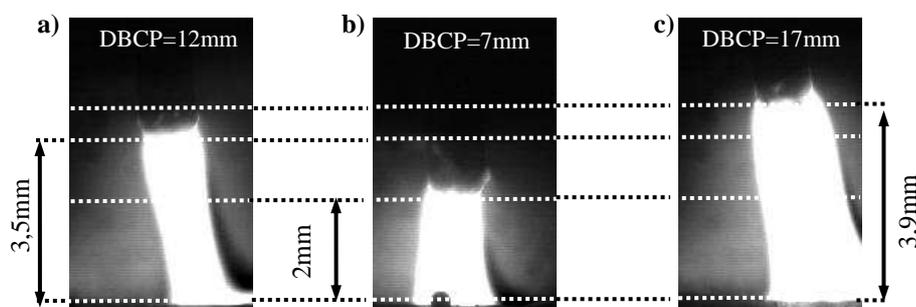


FIGURA 4.14 Arco (fase de pulso) com a) DBCP=12mm, b) DBCP=7mm e c) DBCP=17mm

Nos ensaios com DBCP=12mm e DBCP=17mm, a frequência de pulsação e a frequência de transferência das gotas foram iguais. O que significa que a cada pulso da corrente uma gota foi transferida para a poça de fusão. Na redução da distância para 7mm, a transferência não foi uniforme e controlada pela corrente de pulso. A frequência de pulsação permaneceu constante, mas a frequência da transferência variou. A transferência da gota não foi feita a cada pulso.

Com a velocidade de alimentação do arame constante, o arco foi puxado para baixo e provocou uma redução do comprimento.

Na avaliação da corrente de pulso não foi possível deparar um variação, sugerindo que a força de Lorentz foi constante durante dos testes. Mesmo resultado com a frequência de pulsação da corrente. A Figura 4.15 compara as três diferentes ondas da corrente.

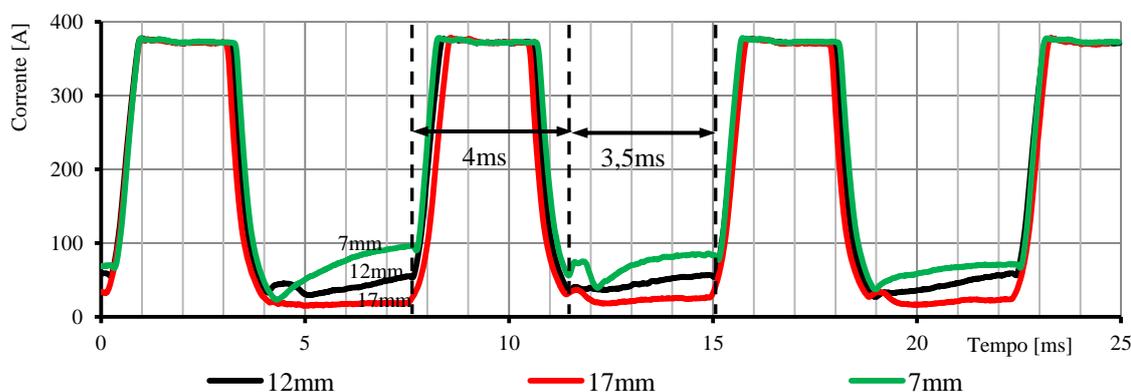


FIGURA 4.15 Comparação das ondas da corrente dos diferentes ensaios

Como a corrente de pulso não variou durante do estrangulamento da gota, outro fator influenciou a transferência da gota e provocou a variação. Com a mudança na DBCP, o stickout variou (Tabela 4.5).

TABELA 4.5 Variação do valor do stickout

Parâmetro	Variação do DBCP		
	12 mm	7 mm	17 mm
DBCP	12 mm	7 mm	17 mm
Comprimento do arco	3,5 mm	2 mm	3,9 mm
Stickout	8,5 mm	5 mm	13,1 mm

Com a variação do stickout, a resistência elétrica específica do arame variou e influenciou o pré-aquecimento do arame. Com a redução do stickout (caso DBCP=7mm) o arame foi menos pré-aquecido e mais potência elétrica foi necessária para fundir o material do arame e estrangular a gota uniforme. A energia fornecida na fase de pulso não foi suficiente para provocar uma transferência do metal uniforme.

A análise da relação entre tempo da fase de pulso e tempo da fase de base apresentou o valor 53%, o que significa o tempo enquanto a auto-correção poderia ser feita, foi menor do que o tempo da fase de pulso. A corrente apresentou uma variação na fase de base. A corrente variou nas faixas de DBCP=12mm de 50A, DBCP=7mm de 80A e DBCP=17mm de 20A. O que apresenta no ensaio com maior mudança das condições de soldagem teve a maior variação da corrente de base e o maior efeito de auto-correção. A análise das características geométrica das seções transversais (Figura 4.16) não apresentaram uma variação fundamental.

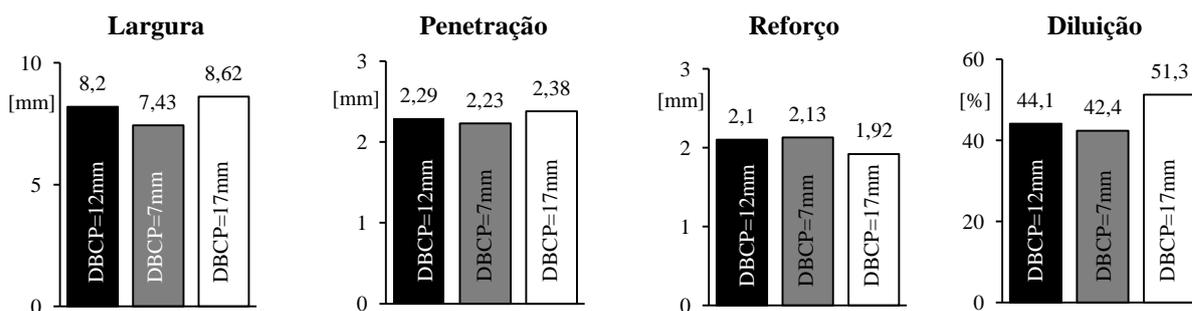


FIGURA 4.16 Comparação características geométricas

A tensão média e a corrente média (Figura 4.17) apresentaram uma variação provocada pelos diferentes comprimentos dos arcos, assim os valores do aporte térmico eram influenciados, mas sem influência significativamente nas características geométricas.

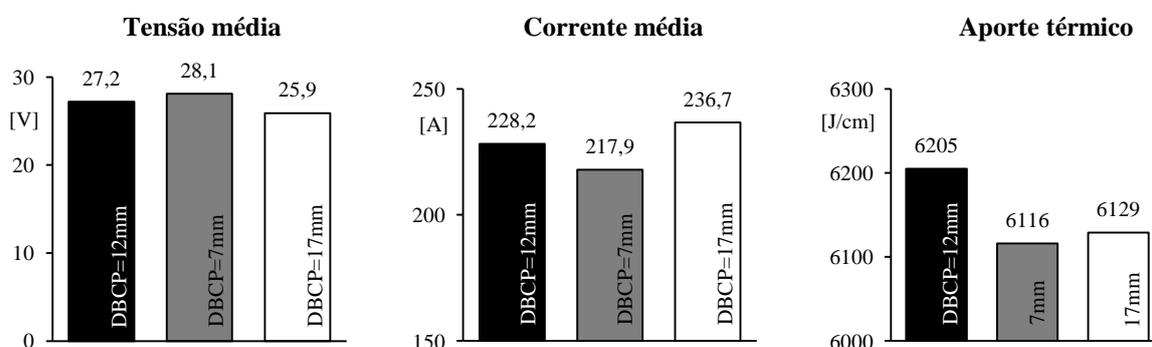


FIGURA 4.17 Comparação tensão média, corrente média e aporte térmico

Resumindo, apesar da redução significativamente do comprimento do arco, provocada pela variação da transferência do metal, apesar do baixo tempo disponível para o efeito de auto-correção, os arcos se estabilizaram no um comprimento constante e a modulação I_p-U_B mostrou características suficientes de auto-correção.

4.3 Parâmetros principais da fase de base

Os parâmetros principais da fase de base são o tempo, a tensão e a corrente da base. O tempo da fase de base é influenciado pela frequência de pulsação e duração do pulso. Para não misturar os efeitos dos parâmetros e para a comparação dos resultados, a duração do pulso e a frequência não foram alteradas, portanto, a duração também. Pela característica da modulação I_P-U_B a tensão define a corrente. Ela é decisiva para os ensaios.

Os testes foram feitos com os parâmetros principais, velocidade de alimentação 5m/min, de frequência de pulsação 85Hz, de corrente de pulso 560A com uma duração de 2,5ms. A influência da tensão de base foi testada pela sua variação de 27V a 21V (Figura 4.18) com os outros parâmetros mantidos constantes. Um arame com diâmetro 1,2mm foi usado.

A velocidade de soldagem foi constante e igual a 0,6m/min. Para a seleção da frequência, um diâmetro da gota maior do que o diâmetro do arame foi definido. A distância entre bico de contato e corpo de prova foi definida como 12mm.

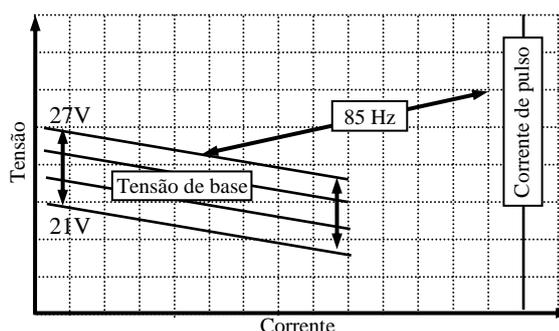


FIGURA 4.18 Variação da tensão de base no diagrama U-I

Os ensaios foram repetidos duas vezes. A análise dos resultados foi concentrada na avaliação do comprimento do arco, da corrente, da tensão, do aporte térmico e nas características geométricas do cordão.

4.3.1 Resultados dos ensaios dos parâmetros principais da fase de base

O comprimento do arco com uma tensão de base de 27V apresentou o valor de 4mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.19). Durante a soldagem, o comprimento foi constante e não apresentou uma variação.

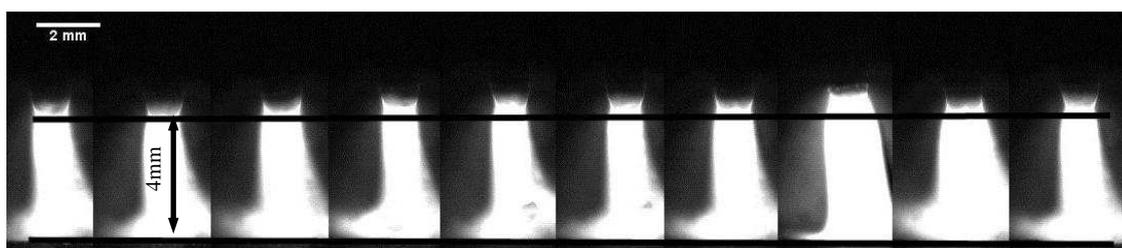


FIGURA 4.19 Medição do comprimento do arco (4mm) em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 27V

A Figura 4.20 apresenta os valores de tensão e corrente do processo com tensão de base de 27V. A corrente de base variou em uma faixa de 58A, entre 58A e 116A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 50A, entre 508A e 558A.

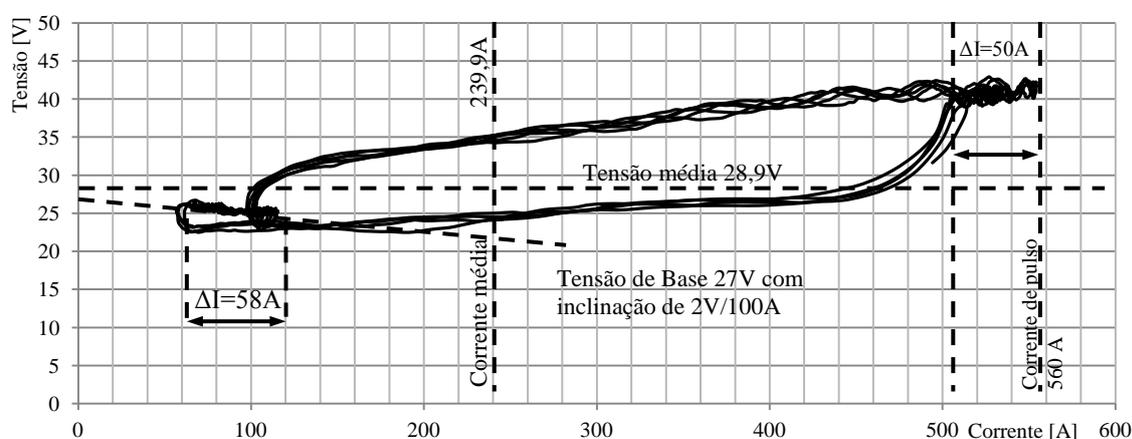


FIGURA 4.20 Diagrama U-I com tensão de base de 27V

A Tabela 4.6 apresenta a análise dos valores médios da corrente e tensão com o aporte térmico.

TABELA 4.6 Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 27V

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	28,9	240,4	6941
2	28,9	239,3	6920
ME	28,9	239,9	6931

Depois dos ensaios com tensão de base de 27V, os ensaios de 26V foram feitos, sem variação dos parâmetros principais. O comprimento do arco com uma tensão de base de 26V apresentou o valor de 3,8mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.21). Durante da soldagem o comprimento foi constante e não apresentou uma variação.

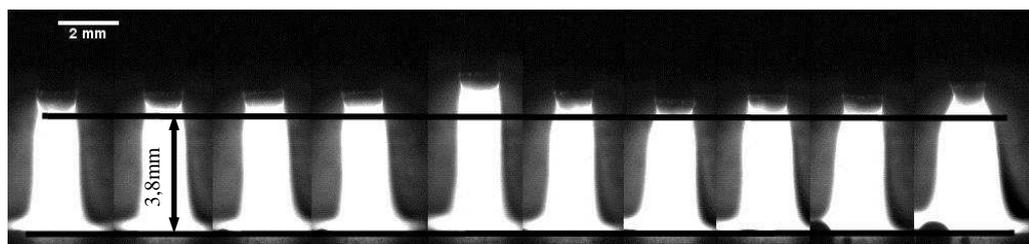


FIGURA 4.21 Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 26V (3,8mm)

A Figura 4.22 apresenta os valores de tensão e corrente do processo com tensão de base de 26V. A corrente de base variou em uma faixa de 55A, entre 52A e 107A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 46A, entre 518A e 564A.

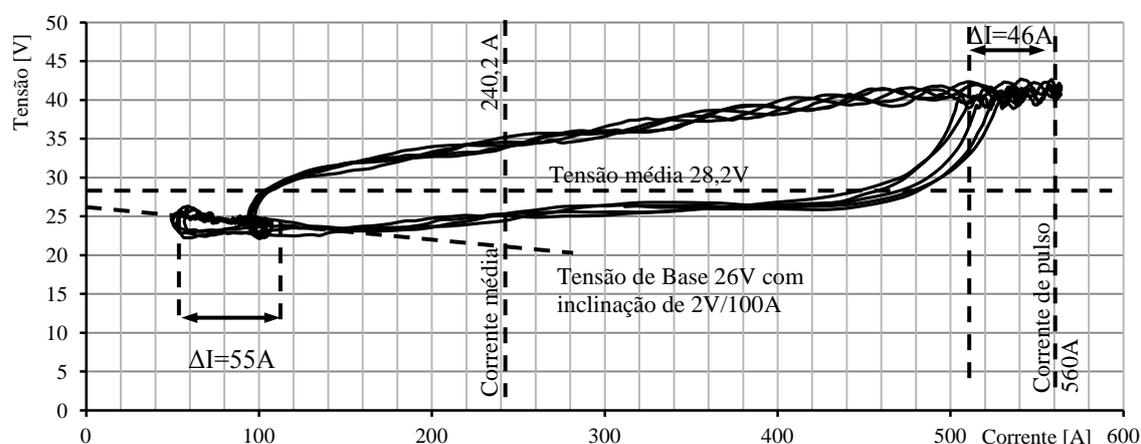


FIGURA 4.22 Diagrama U-I com tensão de base de 26V

A Tabela 4.7 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com tensão de base de 26V.

TABELA 4.7 Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 26V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	7,95	2,06	2,26	40,95	28,2	240,3	6784
2	8,36	2,00	2,01	46,41	28,2	240,1	6779
ME	8,15	2,03	2,14	43,69	28,2	240,2	6782

Em seguida foram feitos os ensaios com tensão de base de 25V. A análise do comprimento do arco com uma tensão de base de 25V apresentou o valor de 3,5mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.23). Durante da soldagem o comprimento foi constante e não apresentou uma variação.

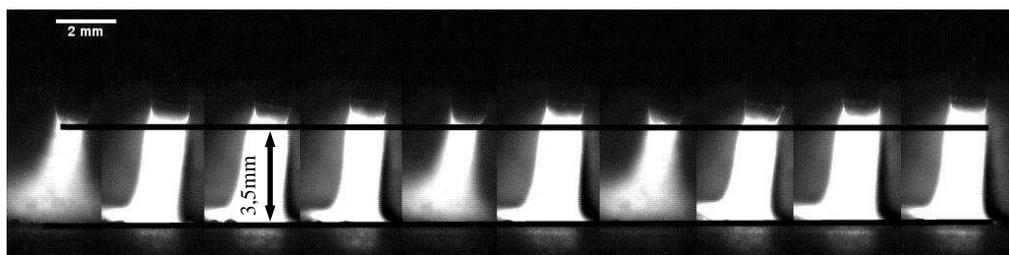


FIGURA 4.23 Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 25V (3,5mm)

A Figura 4.24 apresenta os valores de tensão e corrente do processo com tensão de base de 25V. A corrente de base variou em uma faixa de 43A, entre 60A e 103A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 26A, entre 540A e 566A.

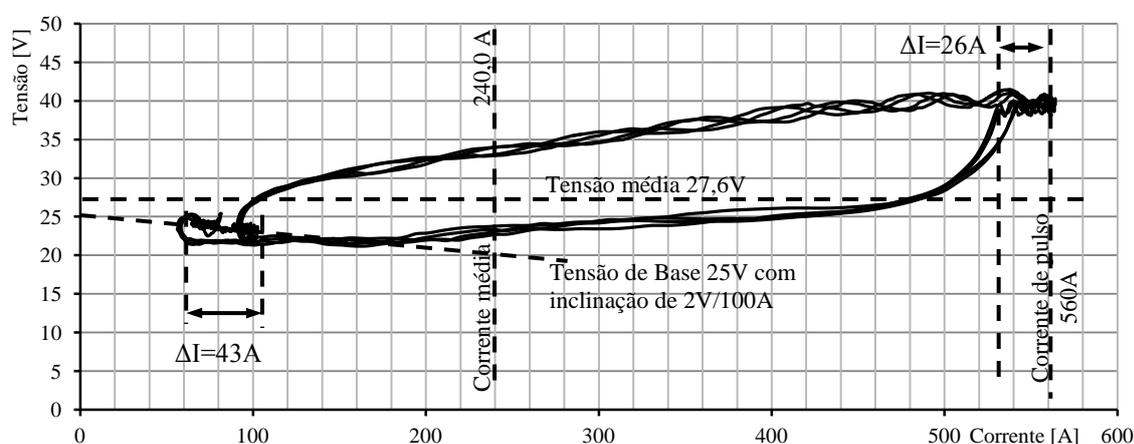


FIGURA 4.24 Diagrama U-I com tensão de base de 25V

A Tabela 4.8 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com tensão de base de 25V.

TABELA 4.8 Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 25V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,41	2,36	2,22	46,98	27,4	242,2	6646
2	8,43	2,30	2,11	45,22	27,7	237,7	6593
ME	8,42	2,33	2,17	46,1	27,6	240,0	6620

Em seguida foram feitos os ensaios com tensão de base de 24V. O comprimento do arco com a tensão de base de 24V apresentou o valor de 3,2mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.25). Durante da soldagem o comprimento foi constante e não apresentou uma variação.

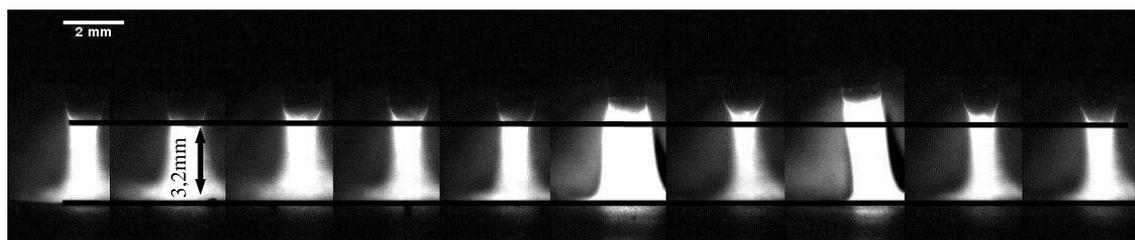


FIGURA 4.25 Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 24 V (3,2 mm)

A Figura 4.26 apresenta os valores de tensão e corrente do processo com tensão de base de 24V. A corrente de base variou em uma faixa de 38A, entre 57A e 95A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 22A, entre 541A e 563A.

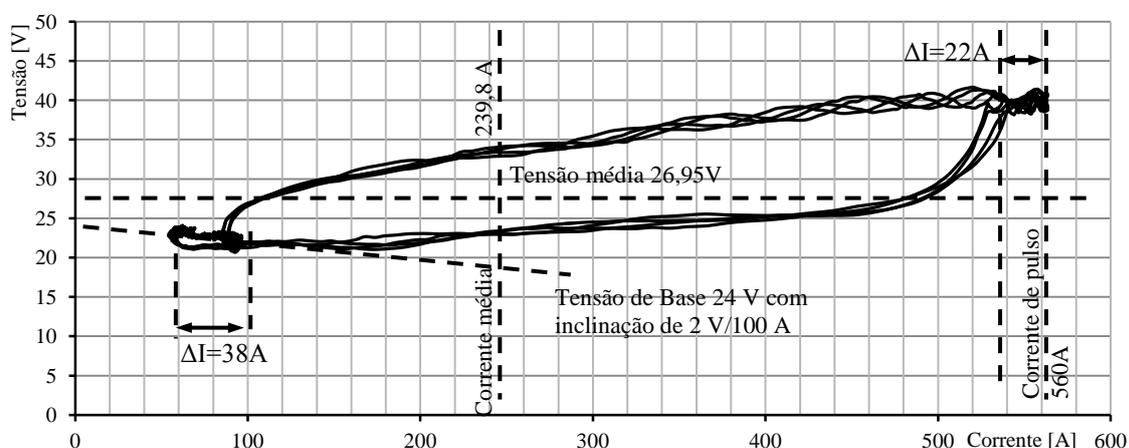


FIGURA 4.26 Diagrama U-I com tensão de base de 24V

A Tabela 4.9 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com o aporte térmico dos ensaios com tensão de base de 24V.

TABELA 4.9 Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 24V

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	26,9	240,3	6466
2	27,0	239,2	6458
ME	26,95	239,8	6462

Em seguida foram feitos os ensaios com tensão de base de 23V. O comprimento do arco (tensão de base de 23V) apresentou o valor de 2,9mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.27). Durante da soldagem o comprimento foi constante e não apresentou uma variação grande.

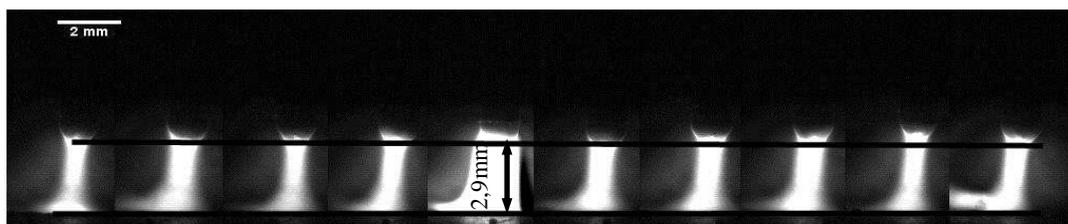


FIGURA 4.27 Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 23V (2,9 mm)

A Figura 4.28 apresenta os valores de tensão e corrente do processo com tensão de base de 23V. A corrente de base variou em uma faixa de 39A, entre 42A e 81A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 23A, entre 540A e 563A.

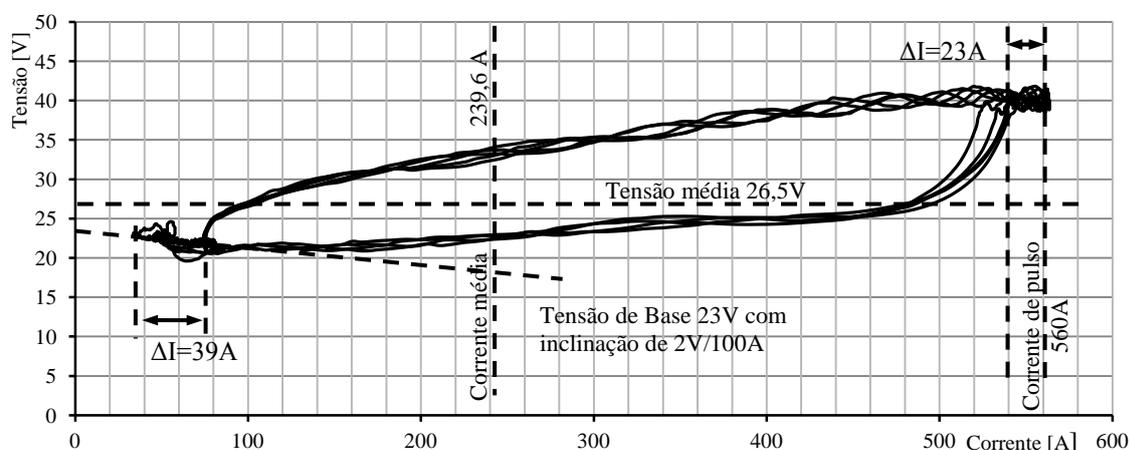


FIGURA 4.28 Diagrama U-I com tensão de base de 23V

A Tabela 4.10 mostra os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com tensão de base de 23V.

TABELA 4.10 Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 23V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,54	2,39	2,05	46,31	26,5	238,8	6319
2	8,80	2,45	2,02	48,80	26,5	240,4	6372
ME	8,67	2,42	2,04	47,55	26,5	239,6	6346

Em seguida foram feitos os ensaios com tensão de base de 21V. O comprimento do arco com a tensão de base de 21V apresentou o valor de 2,0mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.29). Durante da soldagem ocorreram curtos-circuitos na transferência do metal, causada pelo comprimento insuficiente do arco.

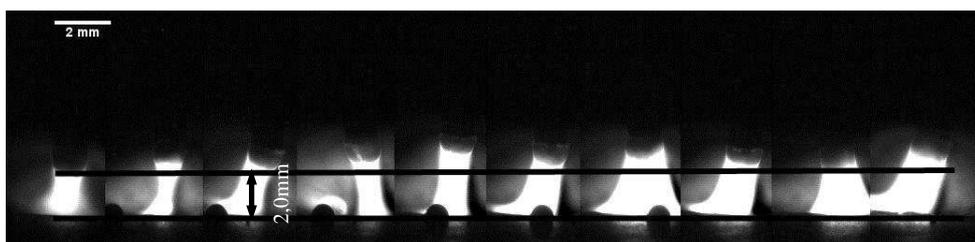


FIGURA 4.29 Medição do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tensão de base de 21V (2,0 mm)

A Figura 4.30 apresenta os valores de tensão e corrente do processo com tensão de base de 21V. A corrente de base variou em uma faixa de 58A, entre 18A e 76A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 3A, entre 560A e 563A.

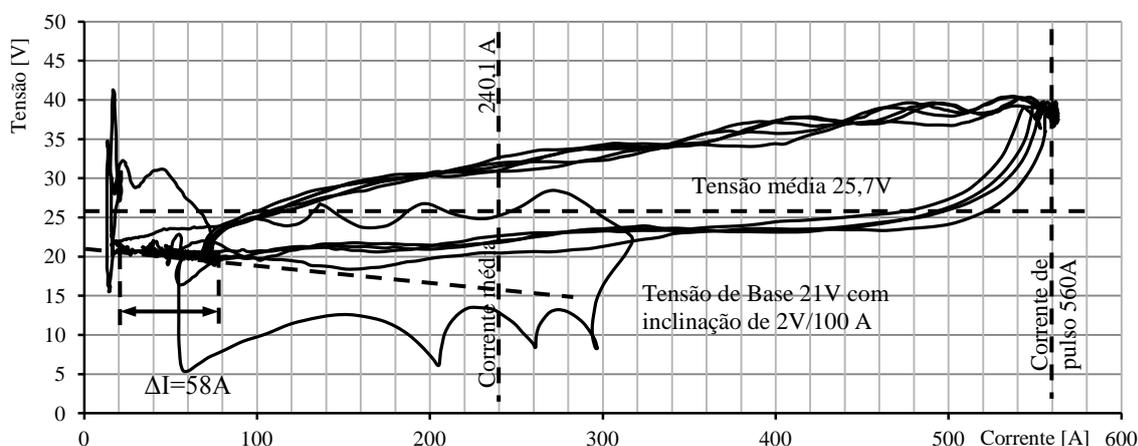


FIGURA 4.30 Diagrama U-I com tensão de base de 21V

A Tabela 4.11 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com tensão de base de 21V.

TABELA 4.11 Análise da corrente e tensão dos ensaios com tensão de base de 21V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,10	2,06	2,00	45,89	25,9	239,2	6187
2	8,64	1,73	2,06	43,98	25,4	241,0	6124
ME	8,37	1,89	2,03	44,93	25,7	240,1	6156

4.3.2 Discussão dos resultados dos parâmetros principais da fase de base

Durante a soldagem, em todos os ensaios, os comprimentos dos arcos foram mantidos constantes. Com a redução da tensão de base de 27V até 21V, os comprimentos dos arcos foram reduzidos de 4mm para 2mm (Figura 4.31).

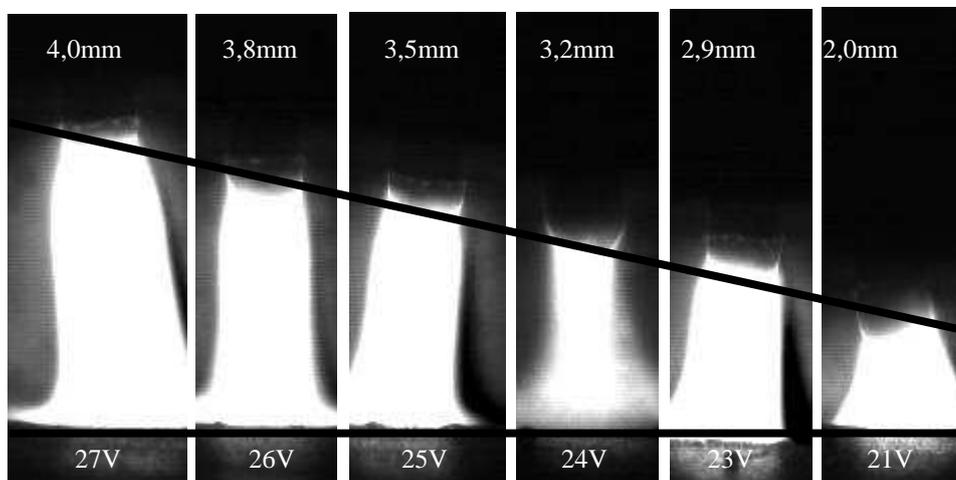


FIGURA 4.31 Redução do comprimento do arco de 4mm (27V) até 2mm (21V)

Entre os ensaios de 27V até 23V, a transferência do metal não apresentou variações. A gota foi transferida sem curtos-circuitos e sem formação de respingos. Com o comprimento de 4mm (27V), a distância entre eletrodo e poça de fusão foi grande demais. A solda apresentou descontinuidades laterais, como apresentado na Figura 4.32, provocadas pela falta de material.

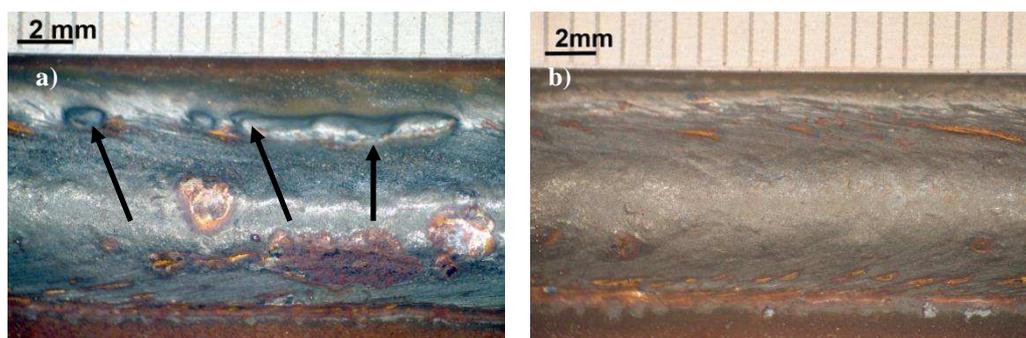


FIGURA 4.32 Comparação da solda a) comprimento do arco de 4mm (27V) com falta de material lateral e b) comprimento do arco 3,2mm (24V)

Nos ensaios com uma tensão de base de 21V, com o comprimento do arco 2mm, o processo apresentou curtos-circuitos que foram provocados pela pouca distância entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão.

Nos ensaios a característica da fase de base foi definida pelos valores da tensão e da inclinação ($2V/100A$). Pela modulação I_p-U_B , a corrente varia nesta fase (efeito de auto-correção). A corrente de base variou em diferentes faixas, como apresentado na Figura 4.33. A variação foi maior nos testes com tensão de base de 27V e 21V. Estes representam os ensaios com o comprimento grande demais e curto demais, respectivamente, os pontos de operação do arco variaram mais do que nos outros na fase de auto-correção. Isto é um indicador para a estabilidade do processo, maior variação significa menor estabilidade do ponto de operação. A menor variação foi encontrada na soldagem com uma tensão de base de 24V.

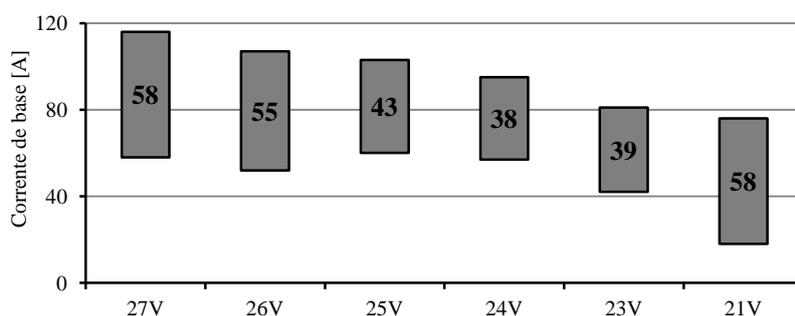


FIGURA 4.33 Variação da corrente de base

A fase de pulso foi definida pela corrente de pulso de 560A com uma duração de 2,5ms. A análise dos diagramas U-I apresentou uma variação da corrente de pulso em diferentes faixas (Figura 4.34). A maior variação foi observada no ensaio com tensão de base de 27V, o ensaio com o maior comprimento do arco. A menor variação foi observada no ensaio com tensão de base de 21V, o ensaio com menor comprimento do arco. A fonte tenta manter a corrente de pulso constante pela variação da tensão de pulso, uma variação da corrente é não desejada.

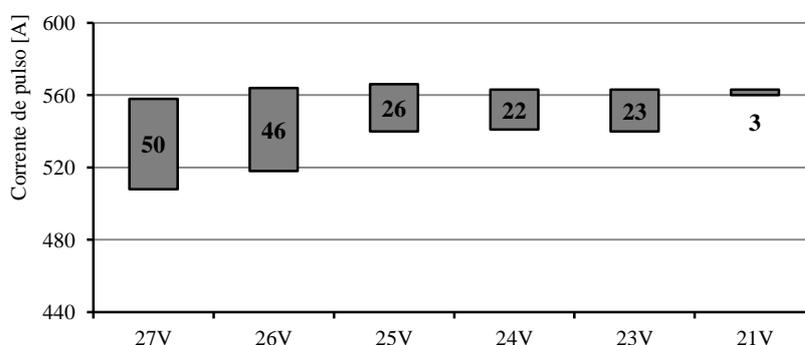


FIGURA 4.34 Variação da corrente de pulso dos diferentes ensaios, com maior variação no 27V e menor no 21V

As variações foram provocadas por dois efeitos. Primeiro, a comparação dos fatores da subida da corrente apresentou (Tabela 4.12), nos ensaios com 27V a corrente subiu em média de 485,8A/ms, nos ensaios com 21V a corrente subiu mais rápido em média de 567,2A/ms. Os parâmetros da fase de pulso não foram mudados durante dos testes. Isto significa que os comprimentos dos arcos influíram o fator de subida da corrente. No arco menor (2mm) a corrente subiu 81A/ms mais rápido causado por a menor resistência do arco, do que no arco maior com comprimento de 4mm.

TABELA 4.12 Comparação fator de subida

	T1	I1	T2	I2	ΔT	ΔI
27V	0,0594sec	170,41A	0,0599sec	416,50A	0,5ms	246,09A
	0,2239sec	168,45A	0,2244sec	408,60A	0,5ms	240,24A
	0,3296sec	149,41A	0,3301sec	405,76A	0,5ms	256,35A
	0,4589sec	187,99A	0,4594sec	422,85A	0,5ms	234,86A
	0,5294sec	184,08A	0,5299sec	421,38A	0,5ms	237,3A
21V	0,0946sec	121,09A	0,0951sec	403,32A	0,5ms	282,23A
	0,1181sec	117,18A	0,1186sec	405,76A	0,5ms	288,58A
	0,2474sec	149,41A	0,2479sec	428,22A	0,5ms	278,81A
	0,3179sec	144,04A	0,3184sec	421,39A	0,5ms	277,35A
	0,4941sec	144,53A	0,4946sec	435,54A	0,5ms	291,01A

Segundo, a fase de pulso é definida pela corrente de pulso, duração do pulso e característica da subida da corrente. A característica da subida da corrente foi programada para subir o mais breve possível, com a velocidade máxima da fonte de soldagem. Para o processo da soldagem com o comprimento do arco com 4mm o valor da corrente de pulso foi alta demais e duração foi curto demais. A fonte de soldagem rompeu a fase de subida da corrente para manter o tempo de pulso constante, com este efeito a corrente de pulso foi variada.

A análise da tensão e da corrente (Figura 4.35) dos diferentes ensaios apresentou uma variação da tensão média. Esta variação foi provocada pela variação da tensão de base e pela variação do comprimento do arco. A corrente média não apresentou uma variação.

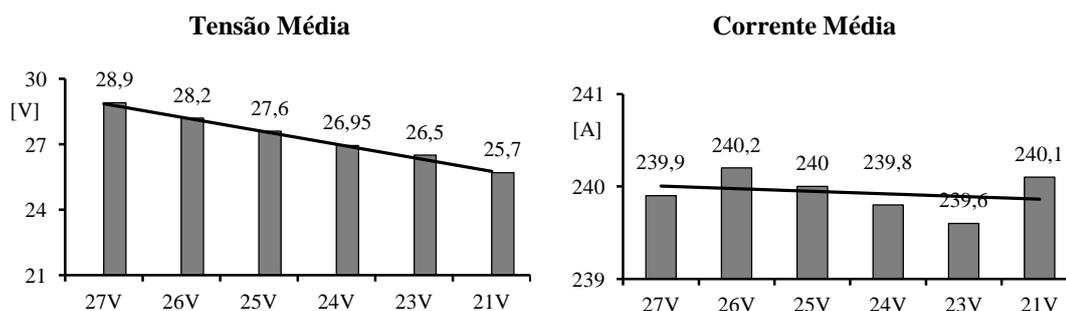


FIGURA 4.35 Tensão média e corrente média dos ensaios

Durante dos ensaios a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação do arame não foram mudadas. O aporte térmico apresentou uma variação entre 6931 J/cm e 6156 J/cm, provocado pela variação da tensão de base.

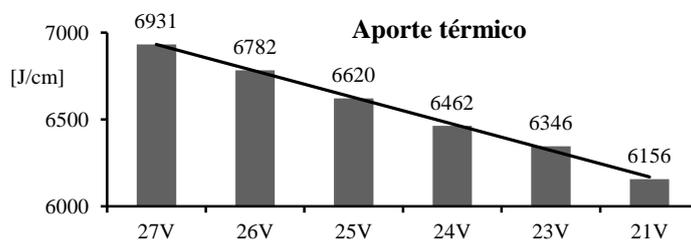


FIGURA 4.36 Aporte térmico com a variação da tensão de base.

A análise das seções transversais (Figura 4.37) não apresentaram uma variação grande da largura, penetração e diluição provocadas pela variação da tensão de base.

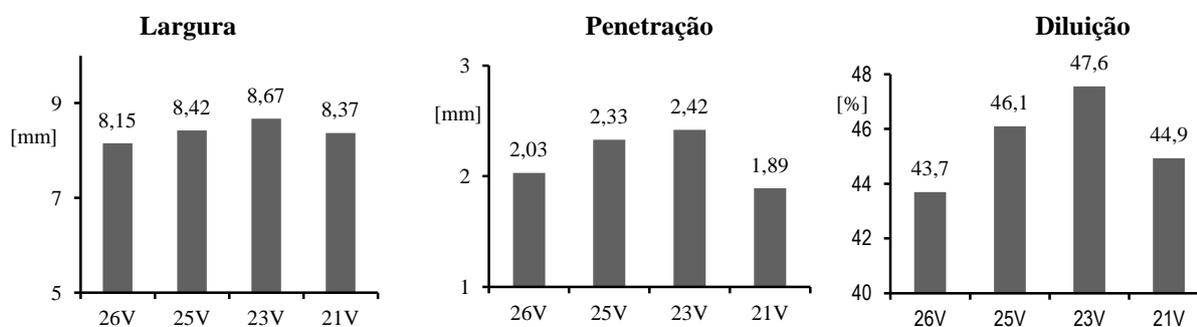


FIGURA 4.37 Análise das seções transversais

Resumindo, pela tensão de base foi possível controlar o comprimento do arco. A redução da tensão de base reduziu o comprimento do arco. As propriedades geométricas não foram influenciadas. O comprimento do arco influenciou a subida da corrente na fase de pulso.

4.4 Parâmetros principais da fase de pulso

Neste item, os parâmetros da fase de pulso foram investigados. A fase de pulso é definida pelos parâmetros, frequência de pulsação, característica da subida da corrente/tensão, duração do pulso, corrente/tensão de pulso e tempo de descida da corrente/ tensão. Nos subitens, os resultados dos ensaios dos diferentes parâmetros são apresentados.

Pelo sistema de programação da fonte de soldagem não foi possível manipular o tempo da subida da corrente de pulso separadamente. O tempo da subida foi conectado com a duração do pulso. Para não influenciar a duração do pulso, em todos os ensaios, a característica da subida foi programada com a velocidade máxima de subida da fonte de soldagem.

4.4.1 Influência da variação do tempo de descida da corrente de pulso

A fase de descida da corrente é definida pelo tempo. Este tempo define em quanto tempo a corrente diminuirá do nível da corrente de pulso para o nível da corrente de base. Nos ensaios foi investigado a influência da variação do tempo entre 2,5ms até 0,5ms, em passos de 0,5ms. Os parâmetros principais do pulso e da base foram definidos com uma velocidade de alimentação de 5m/min, com a frequência de pulsação de 85Hz, com uma corrente de pulso de 560A com a duração de 2,5ms e uma tensão de base de 26V. A velocidade de soldagem foi 0,6m/min.

4.4.1.1 Resultados da variação do tempo de descida

Os primeiros ensaios foram feitos com o tempo da descida da corrente de 2,5ms. A Figura 4.38 apresenta as ondas de tensão e corrente dos ensaios. A transferência do metal foi uniforme, uma gota por um pulso durante a soldagem. As imagens da câmera mostram que a transferência da gota foi feita na fase de descida e antes a corrente chegar ao nível da fase de base.

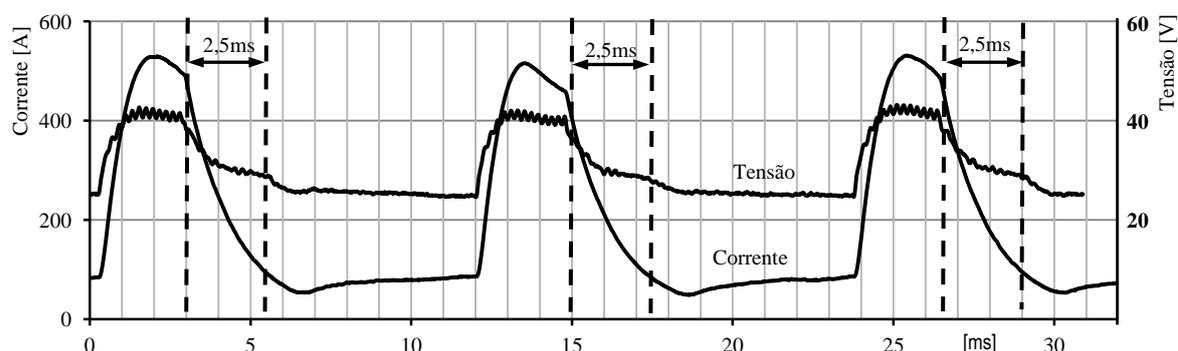


FIGURA 4.38 Tensão e corrente da seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 2,5ms

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 4,7mm, como apresentado na Figura 4.39.

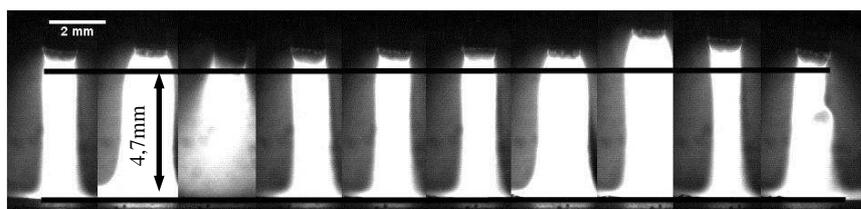


FIGURA 4.39 Comprimento do arco (4,7mm) em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 2,5ms

A Tabela 4.13 apresenta os valores médios da corrente e da tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com o tempo de descida de 2,5ms.

TABELA 4.13 Análise da corrente e tensão dos ensaios com 2,5ms

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,59	2,21	2,30	44,58	31,1	253,1	7868
2	8,47	2,16	2,33	44,65	30,8	254,1	7820
ME	8,53	2,19	2,32	44,62	31,0	253,6	7844

Em seguida foram feitos os ensaios com o tempo da descida de 2ms. A Figura 4.40 apresenta as ondas de tensão e de corrente dos ensaios. A transferência do metal não apresentou uma variação em comparação com os ensaios com tempo de descida de 2,5ms.

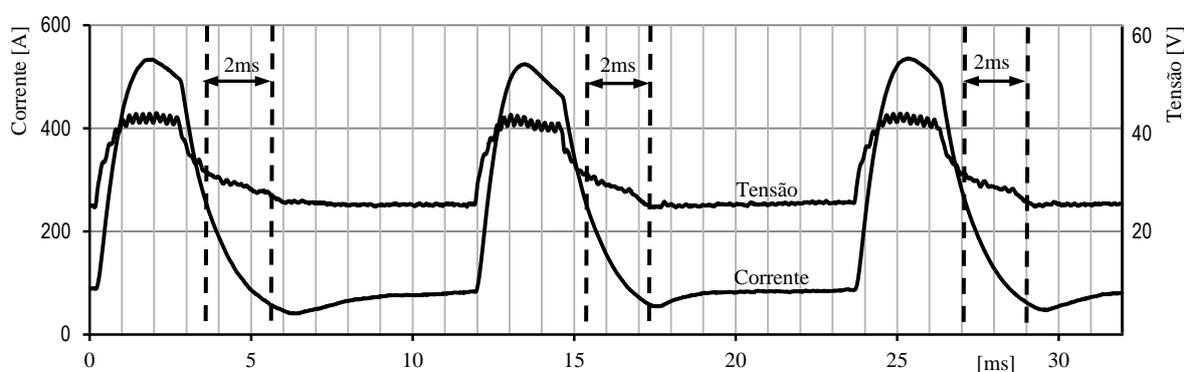


FIGURA 4.40 Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 2ms

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 4,6mm, como apresentado na Figura 4.41.

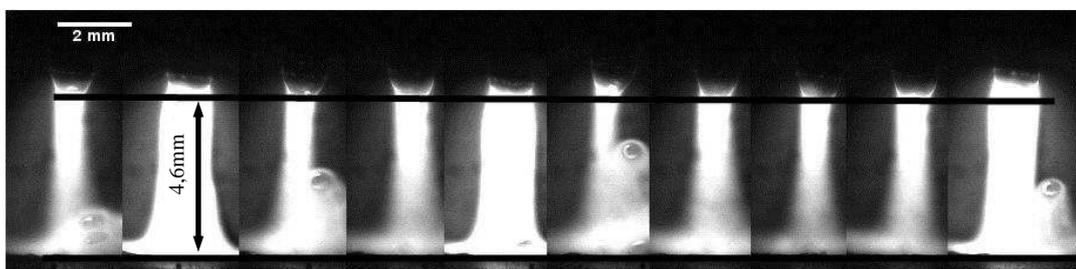


FIGURA 4.41 Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 2,0ms

A Tabela 4.14 apresenta os valores médios da corrente e da tensão em combinação com o aporte térmico dos ensaios com a descida de 2ms.

TABELA 4.14 Análise da corrente e tensão dos ensaios com 2,0ms

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	30,4	248,4	7545
2	30,3	250,3	7573
ME	30,4	249,4	7559

Em seguida foram feitos os ensaios com o tempo da descida de 1,5ms. A Figura 4.42 apresenta as ondas de tensão e corrente dos ensaios. A transferência do metal não apresentou uma variação em comparação com os ensaios com tempo de descida de 2,5ms.

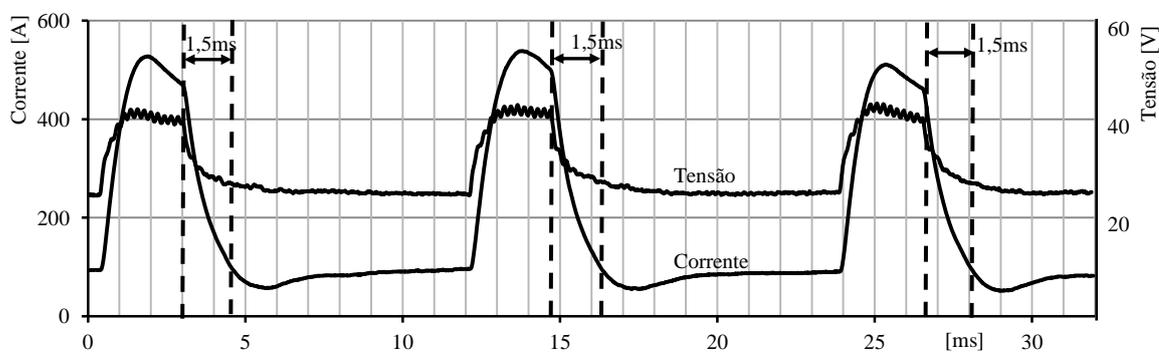


FIGURA 4.42 Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 1,5ms

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 4,6mm, como apresentado na Figura 4.43

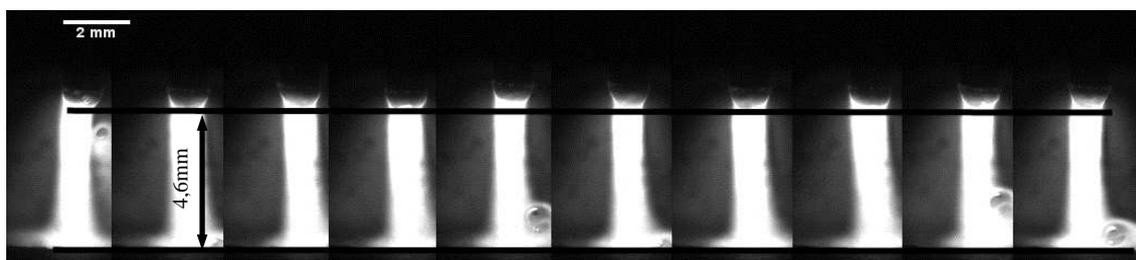


FIGURA 4.43 Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 1,5ms

A Tabela 4.15 apresenta os valores médios da corrente e da tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com o tempo de descida de 1,5ms.

TABELA 4.15 Análise da corrente e tensão dos ensaios com 1,5ms

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,53	2,19	2,00	46,58	29,8	245,0	7296
2	8,85	2,28	2,09	46,60	29,4	249,6	7346
ME	8,69	2,24	2,05	46,59	29,6	247,3	7321

Em seguida foram feitos os ensaios com o tempo da descida de 1ms. A Figura 4.44 apresenta as ondas de tensão e corrente dos ensaios. A transferência do metal não apresentou uma variação em comparação com os ensaios com tempo de descida de 2,5ms, mas a gota entrou na poça de fusão na fase de base.

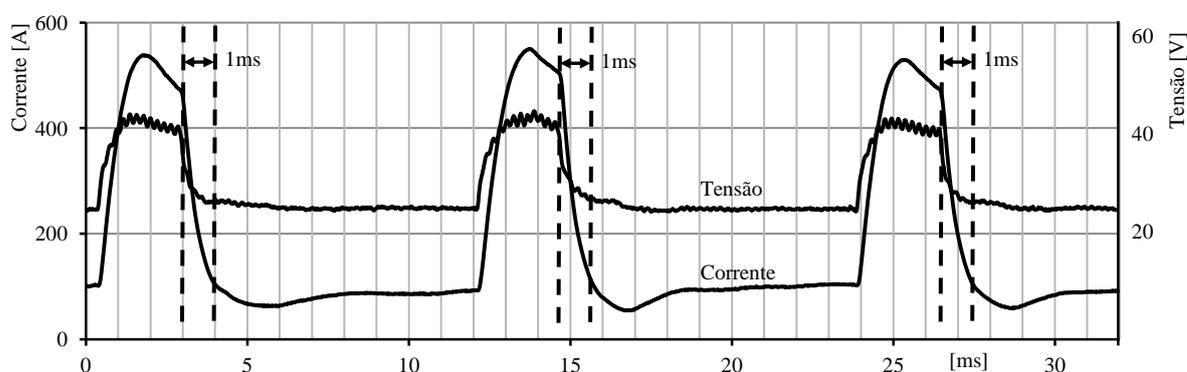


FIGURA 4.44 Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 1ms

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no 4,6mm, como apresentado na Figura 4.45.

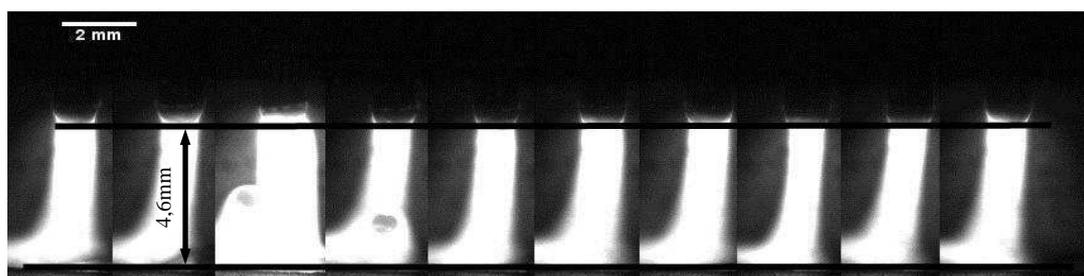


FIGURA 4.45 Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 1ms

A Tabela 4.16 mostra os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com o tempo de descida de 1ms.

TABELA 4.16 Análise da corrente e tensão dos ensaios com 1ms

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	9,42	2,09	2,15	42,92	29,1	244,4	7103
2	8,25	2,32	2,05	45,87	28,9	246,1	7103
ME	8,83	2,21	2,1	44,40	29,0	245,3	7103

Em seguida foram feitos os ensaios com o tempo da descida de 0,5ms. A Figura 4.46 apresenta as ondas de tensão e corrente dos ensaios. A transferência do metal não apresentou uma variação em comparação com os ensaios com tempo de descida de 2,5ms, mas a gota entrou na poça de fusão na fase de base.

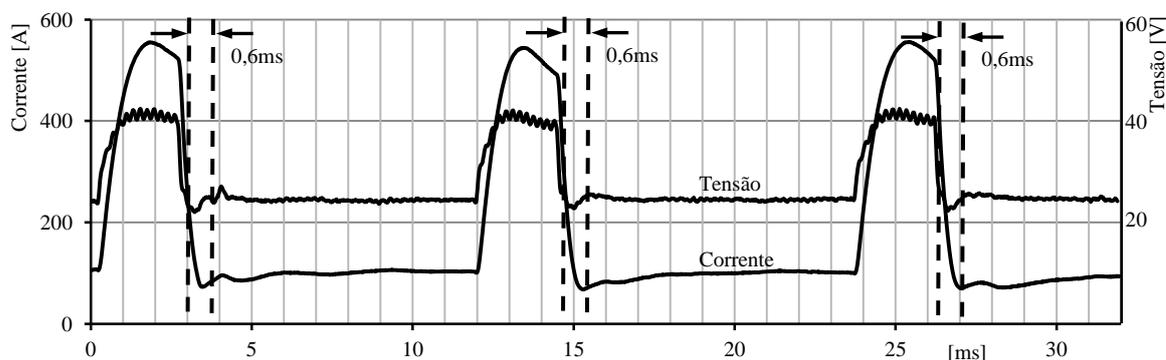


FIGURA 4.46 Tensão e corrente da uma seqüência de três pulsos com o tempo de descida de 0,5ms

A análise da corrente e tensão, sincronizadas com as imagens da câmera da alta velocidade mostram, que a corrente não chegou ao nível da corrente de base no tempo programado de 0,5ms. A fonte de soldagem precisou 0,6ms para chegar ao nível da corrente de base. O limite da fonte foi encontrado.

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 4,6mm, como apresentado na Figura 4.47.



FIGURA 4.47 Medição (4,6mm) do comprimento do arco em 10 diferentes momentos da soldagem com tempo de descida de 0,5ms

A Tabela 4.17 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios com o tempo de descida de 0,5ms.

TABELA 4.17 Análise da corrente e tensão dos ensaios com 0,5ms

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	7,92	2,02	2,38	40,79	28,6	240,6	6873
2	8,28	2,07	2,30	45,73	28,5	242,6	6921
ME	8,1	2,05	2,34	43,26	28,6	241,6	6897

4.4.1.2 Discussão variação do tempo da descida

Durante as soldagens, os comprimentos dos arcos foram constantes e estáveis. A variação do tempo da descida da corrente entre os valores de 2,5ms a 0,5ms não apresentou uma influência no comprimento do arco. Em todos os ensaios, o comprimento se estabilizou no valor de cerca 4,6 mm. A Figura 4.48 apresenta os comprimentos dos diferentes ensaios.

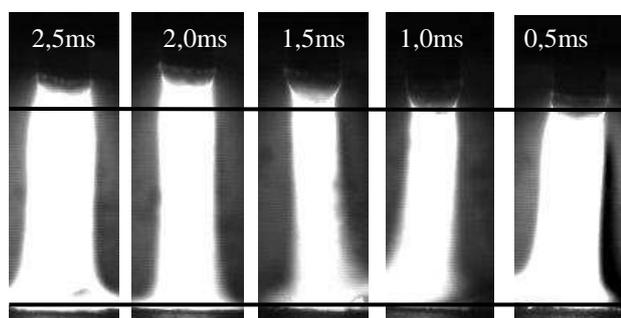


FIGURA 4.48 Comparação dos comprimentos do arco entre 2,5ms e 0,5ms

A transferência do metal não foi influenciada. Ela foi uniforme em todos os ensaios. O momento em que a gota entrou na poça de fusão não variou e foi detectada cerca 1,5ms depois do início da fase de descida da corrente, o que significa a velocidade da transferência não foi influenciada pela velocidade da descida da corrente.

Com a variação do tempo, a fase do processo em que a gota entrou na poça de fusão mudou. Nos ensaios com tempo de descida de 1ms e 0,5ms a transferência da gota na poça de fusão foi feita na fase de base (Figura 4.49).

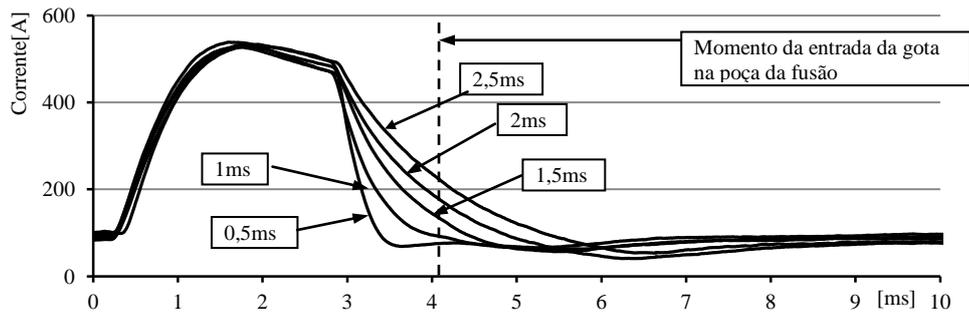


FIGURA 4.49 Comparação das ondas da corrente com a variação do tempo de descida da corrente de pulso (Valores reais)

Pela variação do tempo de descida, os valores de corrente a tensão foram influenciadas (Figura 4.50). Com a redução do tempo, a tensão média foi reduzida de 31V para 28,6V, uma variação de 2,4V. A corrente média foi reduzida de 253,6A para 241,6A, uma variação de 12A. Pela tensão e corrente, o aporte térmico variou entre 7844J/cm e 6897J/cm, uma variação de 947 J/ cm. Isto significa que com a redução do tempo de descida é possível reduzir a energia no processo e manipular a aporte térmico.

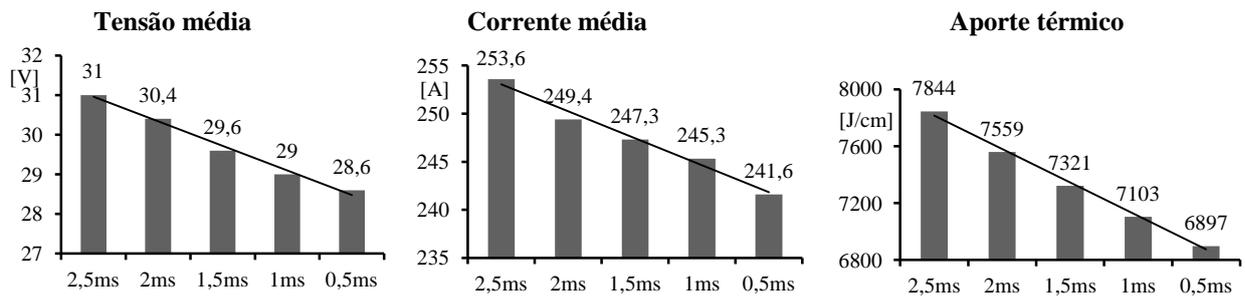


FIGURA 4.50 Comparação da tensão/ corrente médias e aporte térmico com a variação do tempo de descida da corrente

A análise das seções transversais de cordões (Figura 4.51), e as características de largura, penetração e diluição não apresentaram uma influência da variação.

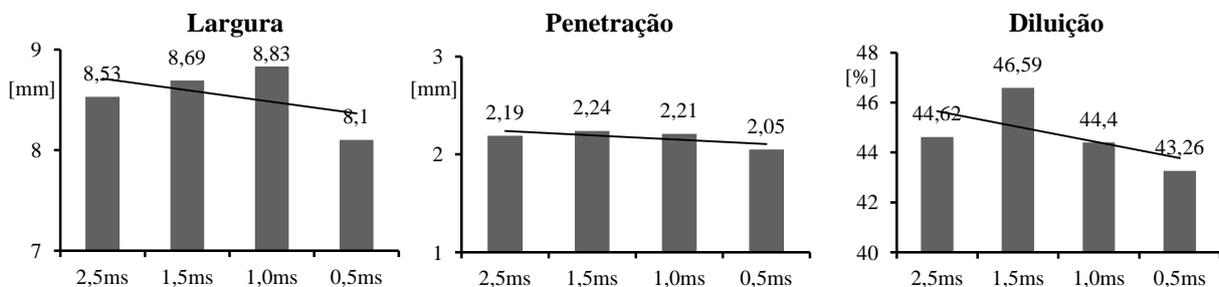


FIGURA 4.51 Comparação largura, penetração e diluição dos ensaios

Resumindo, a variação do tempo da descida de corrente não apresentou um efeito no comprimento do arco. O momento da entrada da gota na poça de fusão não variou nos ensaios, o que significa a variação do tempo da descida da corrente não influenciou na aceleração da gota. Com a redução do tempo, o momento de entrada da gota alterou para a fase de base. Isto significa que a gota não estava mais sob a influência do jato de plasma do arco de pulso, isto pode influir a transferência do metal na soldagem fora da posição. Com a variação do tempo da descida, a tensão média e o aporte térmico foram influenciados. Com a redução do tempo, foi possível reduzir o aporte térmico.

4.4.2 Variação corrente de pulso com variação da tensão de base

Neste subitem a influência da variação do corrente de pulso com a variação da tensão de base foi investigada. A subida da corrente foi programada com a característica de subir com a velocidade máxima da fonte de soldagem. O tempo da descida foi programada para 0,5ms, o mínimo da máquina da soldagem. Os parâmetros principais foram definidos com uma velocidade de alimentação de 5m/min, com a frequência de pulsação de 85Hz. O tempo de pulso foi 2,5ms. A velocidade de soldagem foi 0,6m/min.

A variação do corrente de pulso foi feita nos valores de 430A, 470A, 510A e 550A com uma tensão de base de 26V. Depois, com uma corrente de pulso de 550A, a tensão de base foi reduzida de 26V para 24V e 22V. Em seguida foi testada, a corrente de pulso de 570A com uma tensão de base de 20V.

Os ensaios foram repetidos duas vezes. A análise dos resultados foi concentrada na avaliação do comprimento do arco, transferência do metal, na corrente e tensão, aporte térmico e nas características geométricas do cordão de solda.

4.4.2.1 Resultados da variação da corrente de pulso e tensão de base

Os primeiros ensaios foram feitos com a corrente de pulso de 430A e com uma tensão de base de 26V. A Figura 4.52 apresenta os valores de tensão e corrente do processo. A corrente de base variou em uma faixa de 93A, entre 60A e 156A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 7A, entre 429A e 436A. A Tabela 4.18 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios.

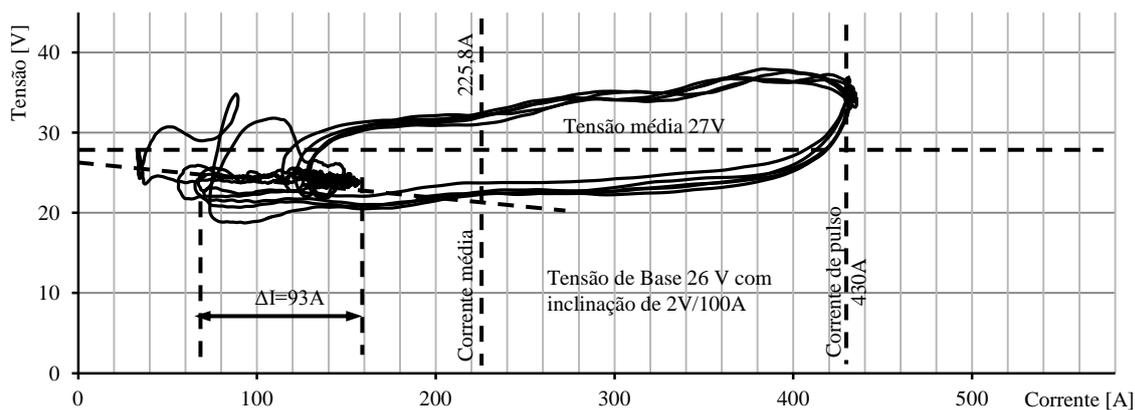


FIGURA 4.52 Diagrama U-I com corrente de pulso de 430A / 26V

TABELA 4.18 Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 430A/26V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,0	1,9	2,0	48,9	27,0	226,6	6109
2	8,6	2,0	2,1	49,0	26,9	224,9	6042
ME	8,3	2,0	2,1	49,0	27,0	225,8	6076

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 2,2mm, como apresentado na Figura 4.53.



FIGURA 4.53 Medição do comprimento do arco (2,2mm) em 10 momentos

A transferência da gota para a poça de fusão não foi uniforme e não foi feita a cada pulso. Entre 1 e 3 pulsos foram necessários para estrangular e separar a gota do eletrodo. Várias vezes, curtos-circuitos foram detectados. A Figura 4.54 apresenta uma seqüência típica de um pulso com as diferentes fases de estrangulando da gota.

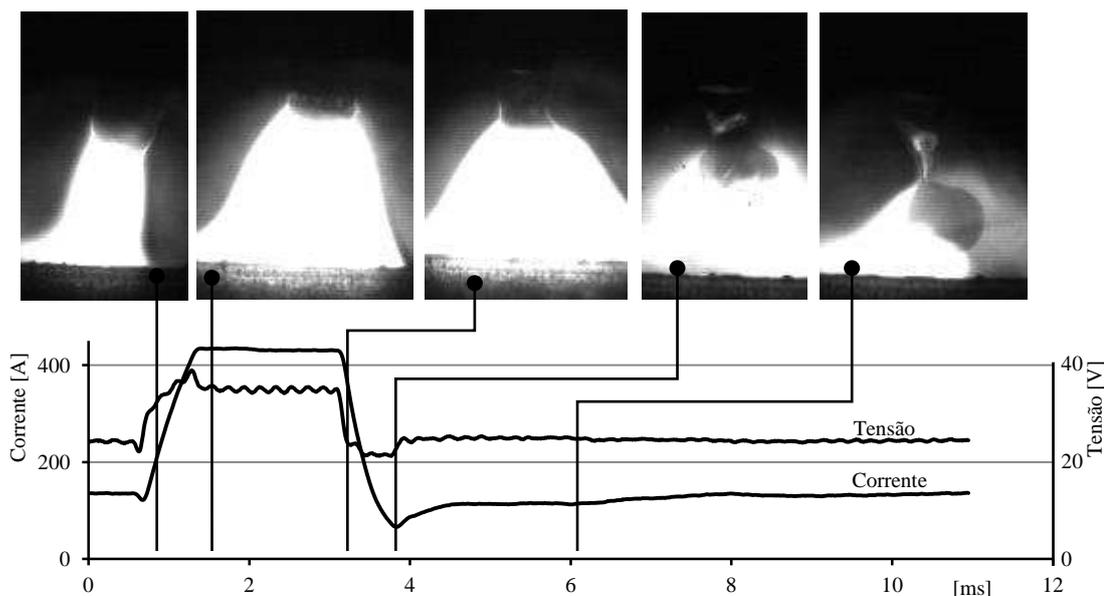


FIGURA 4.54 Sequência típica, tensão e corrente, ensaios 430A / 26V, combinado com imagens da câmera

A Figura 4.54a representa o início da fase de subida da corrente com uma corrente de 123A e uma tensão de 27V. O arco está localizado embaixo da gota com um diâmetro da coluna aproximadamente igual ao da gota. Figura 4.54b, depois de 0,7ms, a fase com uma corrente de pulso constante se inicia, com a corrente de 434A e uma tensão de 35V. Figura 4.54c, depois de 1,7ms, o final da fase com uma corrente de pulso constante. O estrangulamento completo da gota ainda não aconteceu, mas é possível observar o diâmetro está reduzindo. Figura 4.54d, depois de 0,4ms, no final da descida da corrente, com 142A e 21,8V. O diâmetro da conexão entre eletrodo e gota se reduziu mais. Figura 4.54e, depois de 2,3ms, o diâmetro da conexão reduziu significativamente e a gota está quase separada do eletrodo.

A corrente de pulso não foi sempre suficiente para reduzir o diâmetro da conexão entre eletrodo e gota significativamente até final da descida da corrente. Nestes casos, pulsos adicionais foram necessários ou, se a transferência não ocorresse depois de 2 pulsos adicionais, ocorria em curto-circuito com a poça de fusão. Foram também observados casos em que a corrente de pulso (Força de Lorentz) estrangulou a gota, com uma redução do diâmetro da conexão, mas depois a corrente chegou ao nível de base, a gota voltou para o eletrodo (Força de tensão superficial). Se uma transferência da gota ocorresse, ela era feita sempre na fase de base.

A Figura 4.55 apresenta os valores de tensão e corrente do processo com a corrente de pulso de 470A e a tensão de base de 26V. A corrente de base variou em uma faixa de 70A, entre 60A e 130A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 6A, entre 467A e 473A.

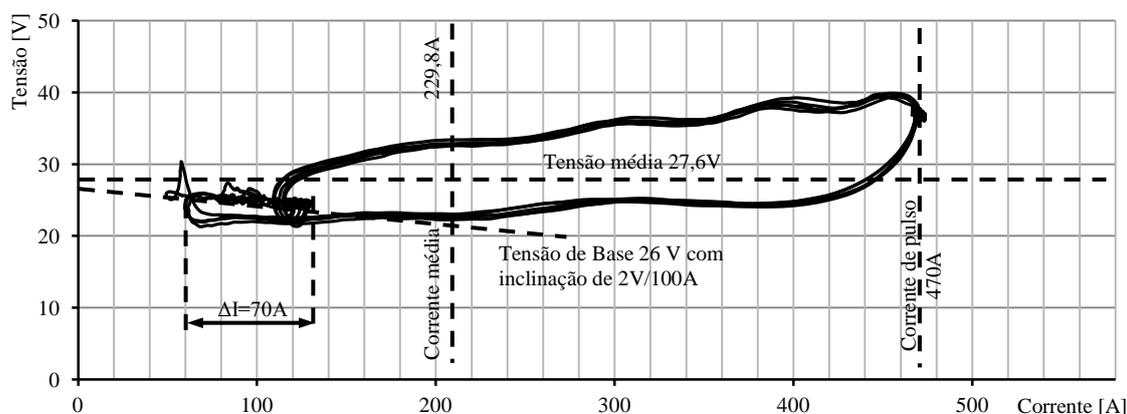


FIGURA 4.55 Diagrama U-I com corrente de pulso de 470A / 26V

A Tabela 4.19 apresenta os valores médios da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 470A e uma tensão de base de 26V, em combinação com a análise das seções transversais de cordões.

TABELA 4.19 Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 470A/26V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,65	2,13	2,06	49,97	27,6	229,3	6329
2	8,41	2,22	2,01	50,22	27,5	230,3	6322
ME	8,5	2,2	2,0	50,1	27,6	229,8	6326

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 2,8mm. A Figura 4.56 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

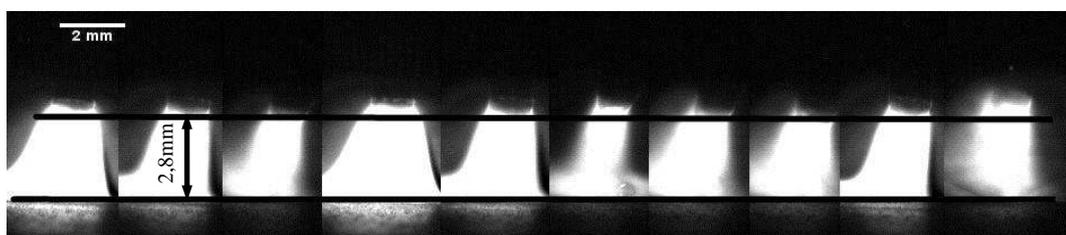


FIGURA 4.56 Comprimento do arco (2,8mm) com corrente de pulso de 470A / 26V

O aumento da corrente de pulso resultou em uma transferência da gota para a poça de fusão de forma uniforme e ela foi feita a cada pulso. A Figura 4.57 apresenta uma seqüência típica de um pulso com as diferentes fases de estrangulando da gota. Figura 4.57a, representa o início da fase de subida da corrente com uma corrente de 112A e uma tensão de 23,5V.

O arco está localizado em baixo da gota com um diâmetro da coluna aproximadamente igual ao da gota. Figura 4.57b, depois de 0,8ms, o início da fase com uma corrente de pulso constante, com a corrente de 470A e uma tensão de 37,8V. Figura 4.57c, depois de 1,6ms, ocorre o fim da fase com a corrente de pulso constante. O estrangulamento está quase completo, o diâmetro da conexão reduziu significativamente. Figura 4.57d, depois de 0,5ms, atinge-se o final da descida da corrente, com 112A e 22,3V. A gota foi separada do eletrodo. Figura 4.57e, depois de 1,6ms, a gota está entrando na poça da fusão.

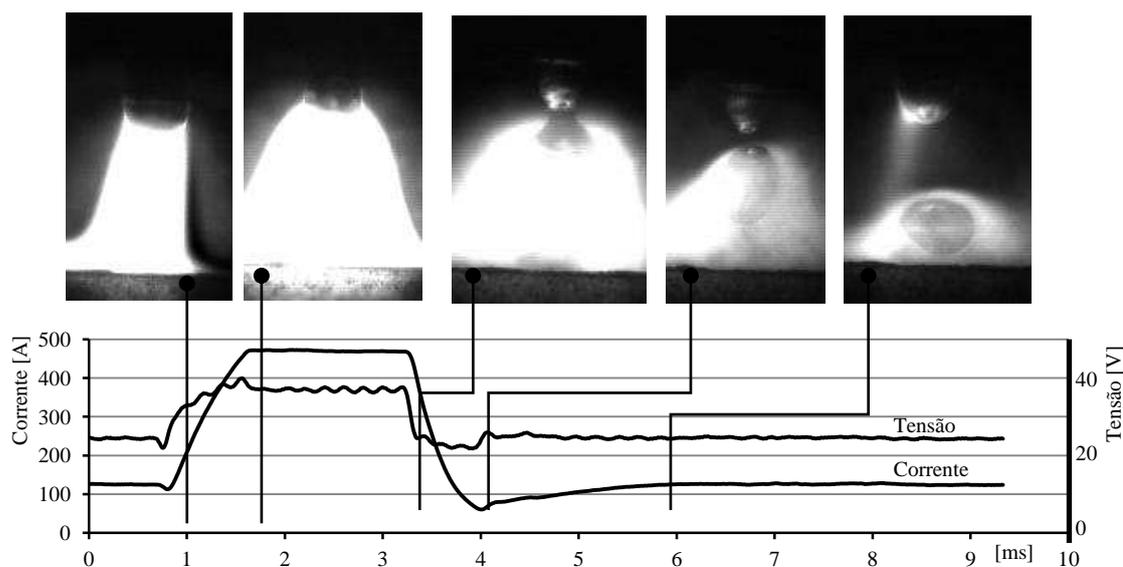


FIGURA 4.57 Sequência típica, tensão e corrente, ensaios 470A /26V, combinado com imagens da câmera

A Figura 4.58 apresenta os valores de tensão e corrente dos ensaios com a corrente de pulso de 510A e com uma tensão de base de 26V. A corrente de base variou em uma faixa de 56A, entre 60A e 116A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 5A, entre 504A e 509A.

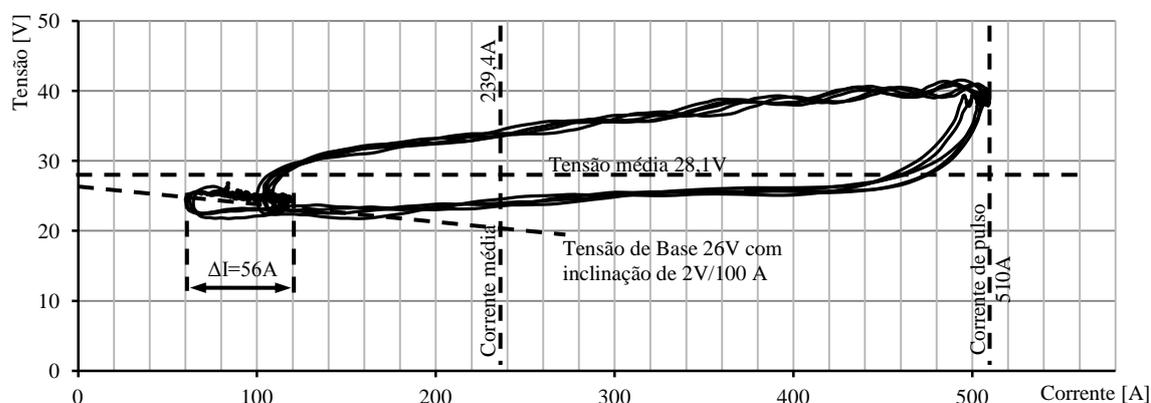


FIGURA 4.58 Diagrama U-I com corrente de pulso de 510A / 26V

A Tabela 4.20 apresenta os valores médios da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 510A e uma tensão de base de 26V, em combinação com a análise das seções transversais de cordões.

TABELA 4.20 Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 510A/26V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,5	1,6	2,4	42,4	28,2	236,8	6669
2	8,1	2,0	2,3	42,0	27,8	242,0	6737
ME	8,3	1,8	2,4	42,2	28,1	239,4	6703

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 3,2mm. A Figura 4.59 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

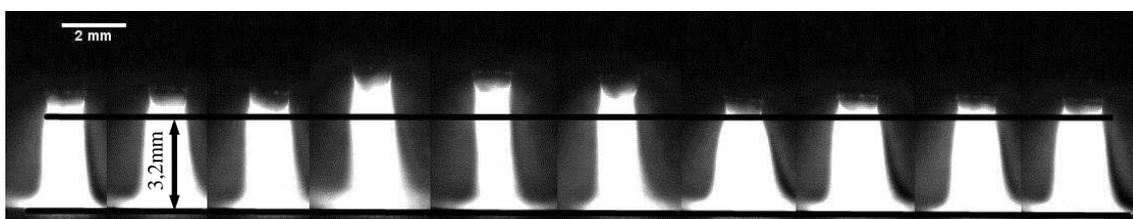


FIGURA 4.59 Comprimento do arco (3,2 mm) com corrente de pulso de 510A / 26V

A transferência do metal na soldagem com a corrente de pulso de 510A e tensão de base de 26V, foi uniforme e feita a cada pulso. A maneira da transferência foi comparável com os resultados da soldagem com 470A, mas ocorreu esporádico a formação de uma gota adicional, transferida depois da gota principal.

A seguir foram feitos os ensaios com a corrente de pulso de 550A e com uma tensão de base de 26V. A Figura 4.60 apresenta os valores de tensão e corrente do processo. A corrente de base variou em uma faixa de 58A, entre 60A e 118A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 58A, entre 490A e 548A.

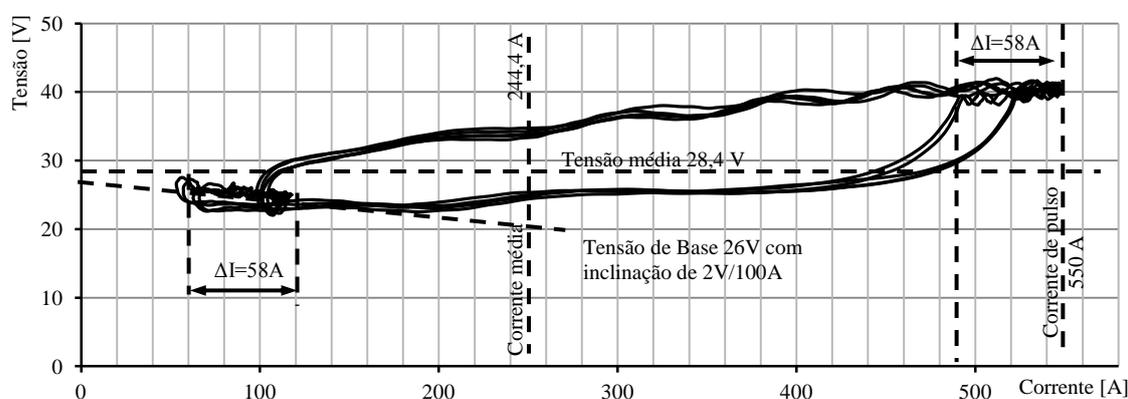


FIGURA 4.60 Diagrama U-I com corrente de pulso de 550A / 26V

A Tabela 4.21 apresenta os valores médios da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A e uma tensão de base de 26V.

TABELA 4.21 Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A/26V

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	28,3	245,7	6959
2	28,4	243,0	6909
ME	28,4	244,4	6934

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 3,8mm. A Figura 4.61 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

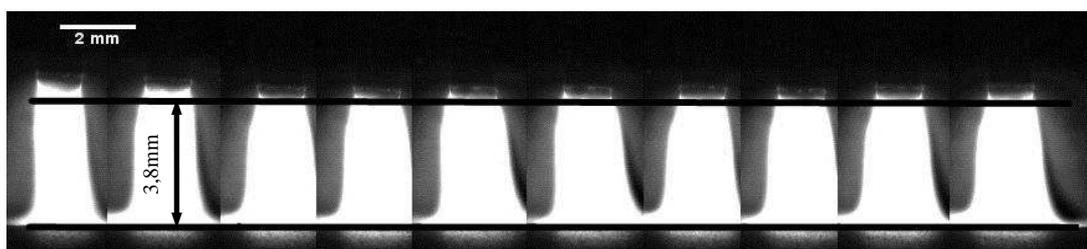


FIGURA 4.61 Comprimento do arco (3,8mm) com corrente de pulso de 550A / 26V

A transferência do metal na soldagem com a corrente de pulso de 550A e tensão de base de 26V, foi uniforme e feita a cada pulso. A maneira da transferência foi comparável com os resultados da soldagem com 510A. Foi observada a formação esporádica de gotas adicionais.

A seguir foram feitos os ensaios com a corrente de pulso de 550A e com a redução da tensão de base de 26V para 24V. A Figura 4.62 apresenta os valores de tensão e corrente do processo. A corrente de base variou em uma faixa de 46A, entre 60A e 106A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 30A, entre 520A e 550A.

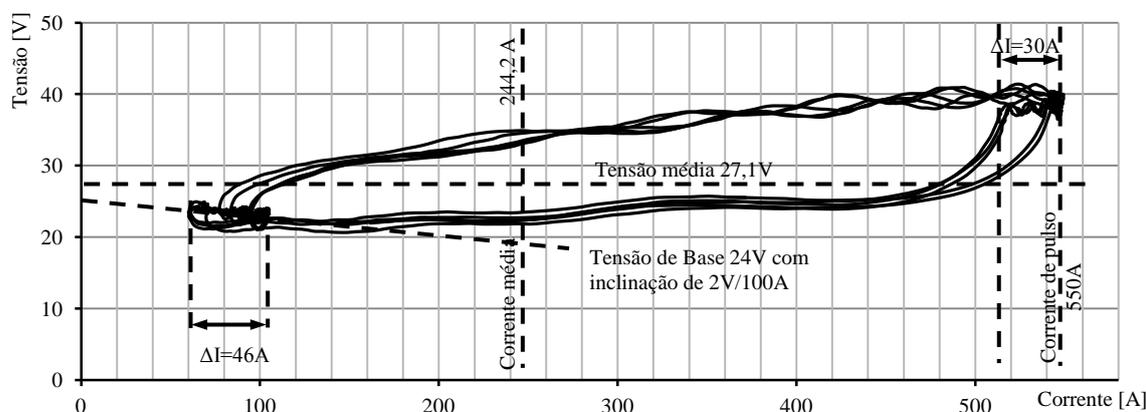


FIGURA 4.62 Diagrama U-I com corrente de pulso de 550A / 24V

A Tabela 4.22 apresenta os valores médios da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A e uma tensão de base de 24V, em combinação com a análise das seções transversais de cordões.

TABELA 4.22 Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A/24V

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,05	2,81	2,08	49,72	27,0	244,4	6589
2	8,60	2,54	2,14	47,28	27,1	244,0	6620
ME	8,3	2,7	2,1	48,5	27,1	244,2	6605

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 3,0mm. A Figura 4.63 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

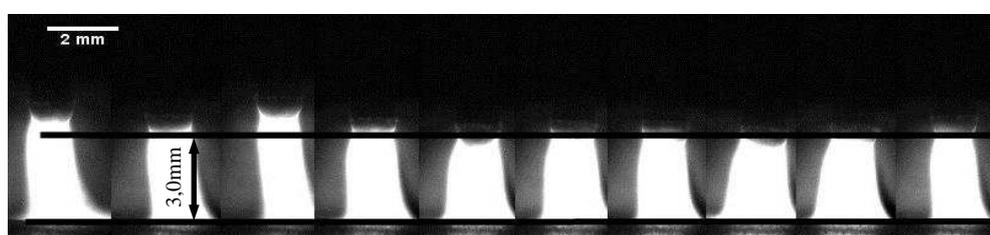


FIGURA 4.63 Comprimento do arco (3,0mm) com corrente de pulso de 550A / 24V

A transferência do metal na soldagem com a corrente de pulso de 550A e tensão de base de 24V, foi uniforme e feita a cada pulso. A maneira da transferência foi comparável com os resultados da soldagem com a corrente de pulso de 550A e tensão de base de 26V, mas, com 24V, em quase todos os pulsos uma gota adicional foi formada.

A seguir foram feitos os ensaios com a corrente de pulso de 550A e com a redução da tensão de base de 24V para 22V. A Figura 4.64 apresenta os valores de tensão e corrente do processo. A corrente de base variou em uma faixa de 31A, entre 63A e 94A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 5A, entre 544A e 549A.

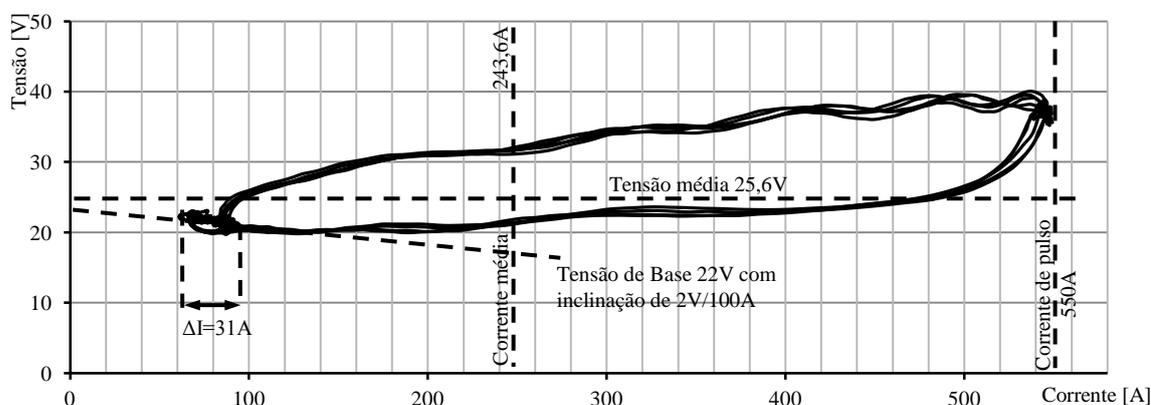


FIGURA 4.64 Diagrama U-I com corrente de pulso de 550A / 22V

A Tabela 4.23 apresenta os valores médios da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A e uma tensão de base de 22V.

TABELA 4.23 Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 550A /22V

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	25,5	244,0	6232
2	25,7	243,1	6246
ME	25,6	243,6	6239

O comprimento do arco permaneceu constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 2,2mm. A Figura 4.65 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

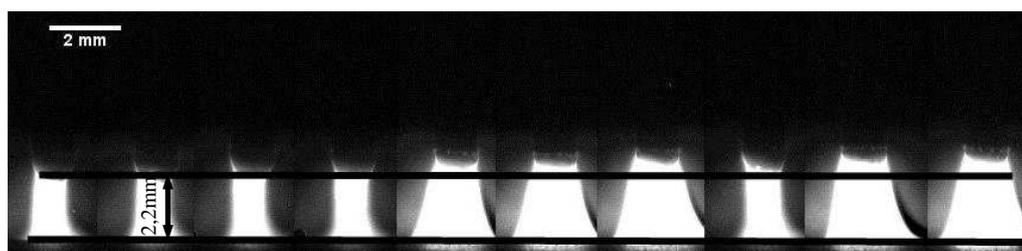


FIGURA 4.65 Comprimento do arco (2,2mm) com corrente de pulso de 550A e tensão de base de 22V

A transferência do metal na soldagem com a corrente de pulso de 550A e tensão de base de 22V, foi uniforme e feita a cada pulso. A maneira da transferência foi comparável com os resultados da soldagem com a corrente de pulso de 550A e tensão de base de 26V e 24V. Em todos os pulsos, uma gota adicional foi formada.

A seguir foram feitos os ensaios com o aumento da corrente de pulso de 550A para 570A e com a redução da tensão de base de 22V para 20V. A Figura 4.66 apresenta os valores de tensão e corrente do processo. A corrente de base variou em uma faixa de 32A, entre 37A e 69A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 34A, 534A e 568A.

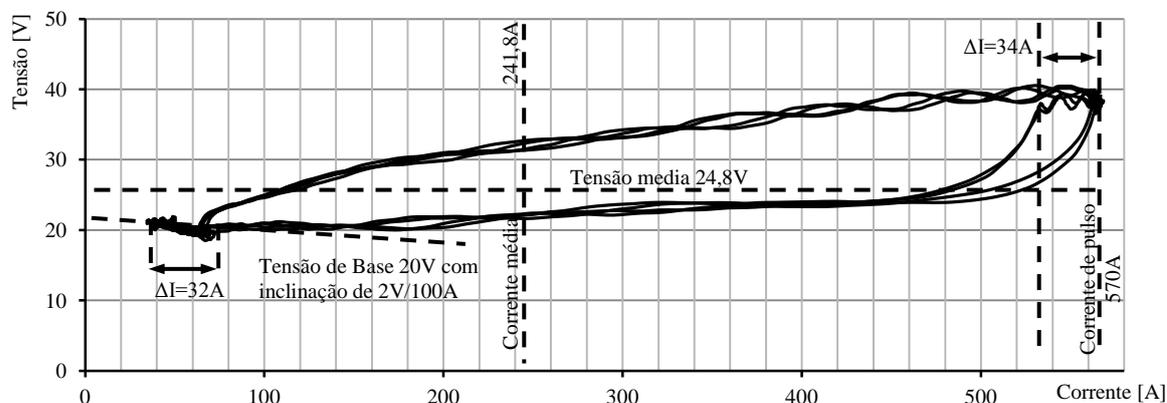


FIGURA 4.66 Diagrama U-I com corrente de pulso de 570A / 20V

A Tabela 4.24 apresenta os valores médios da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 570A e uma tensão de base de 20V.

TABELA 4.24 Análise da corrente e tensão dos ensaios com corrente de pulso de 570A/20V

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	25,0	241,2	6038
2	24,6	242,4	5965
ME	24,8	241,8	6002

O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 2,2mm. A Figura 4.67 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

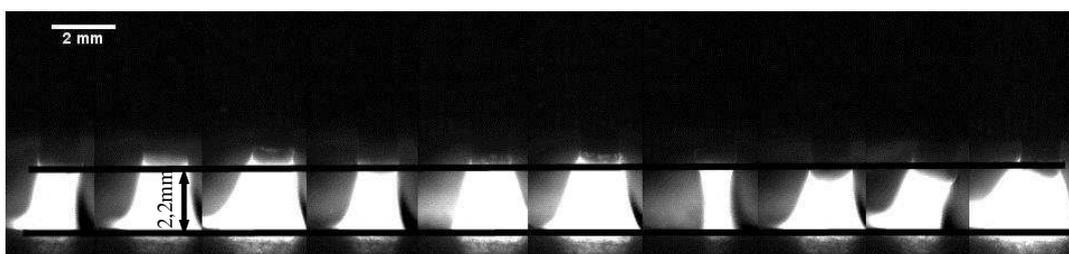


FIGURA 4.67 Comprimento do arco (2,2mm) com corrente de pulso de 570A/20V

A transferência do metal foi uniforme e feita a cada pulso. Em todos os pulsos, gotas adicionais foram formadas.

4.4.2.2 Discussão sobre a variação da corrente de pulso com tensão de base

Durante as soldagens, a inclinação da subida da corrente, a inclinação da descida da corrente, tempo de pulso e a frequência de pulsação foram constantes. A Figura 4.68 apresenta as variações da corrente de pulso com os parâmetros principais constantes dos diferentes ensaios.

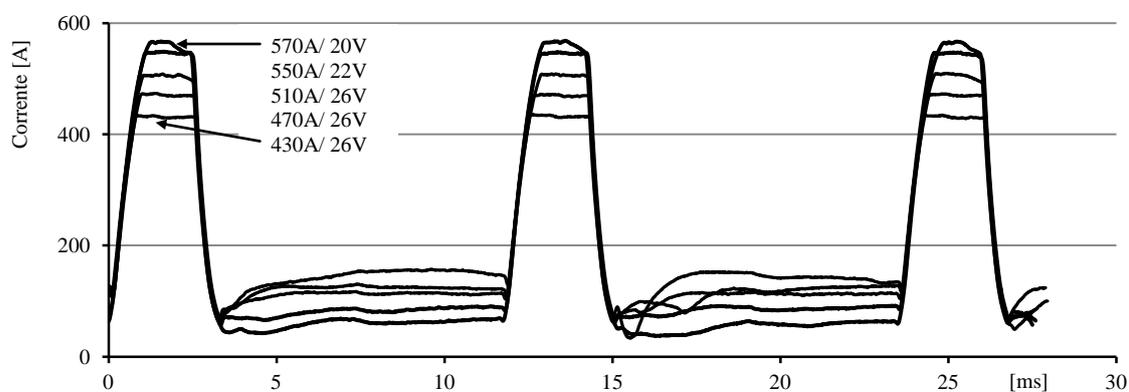


FIGURA 4.68 Comparação das ondas da corrente com variação da corrente de pulso com os parâmetros principais constante

Os comprimentos dos arcos permaneceram estáveis durante dos ensaios, o que apresentou mais uma vez que a modulação I_P-U_B tem propriedades de auto-correção suficiente.

Com o aumento da corrente de pulso de 430A até 550A e sem variação dos parâmetros principais, o comprimento de arco aumentou de 2,2mm para 3,8mm (Figura 4.69), o que apresenta a influência da corrente de pulso no comprimento do arco com uma tensão de base constante.

Quando a tensão de base foi reduzida de 26V até 22V com uma corrente de pulso constante de 550A com, o comprimento de arco foi reduzido de 3,8mm até 2,2mm (Figura 4.69), o que apresenta de novo a possibilidade da manipulação do comprimento do arco com a tensão de base.

Quando a corrente foi aumentada de 550A para 570A com a redução da tensão de base de 22V para 20V obteve-se o mesmo comprimento do arco. Este apresenta a influência da variação do comprimento do arco pelo corrente de pulso e tensão de base são compensáveis.

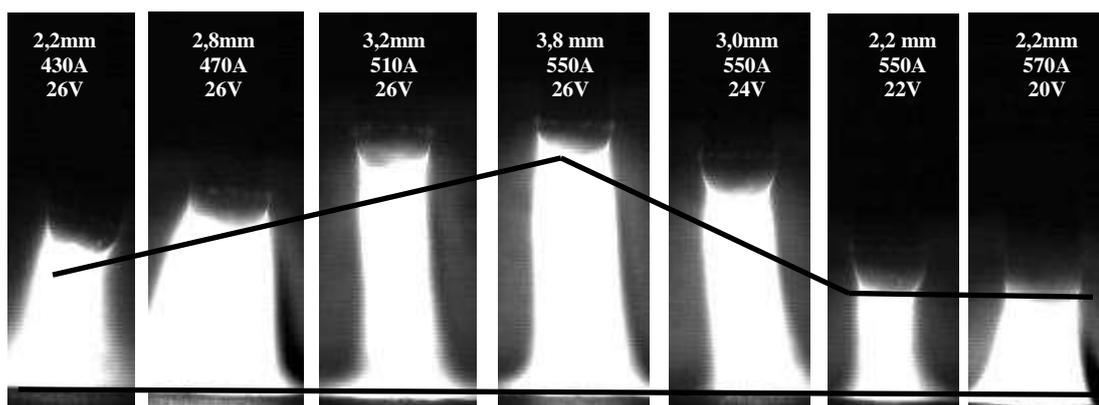


FIGURA 4.69 Comparação dos comprimentos dos arcos com variação das correntes de pulso e variação da tensão de base

O comprimento do arco apresentou uma influência na corrente de pulso máxima e na faixa da variação da corrente de pulso. A Figura 4.70 apresenta a variação da corrente de pulso.

A modulação I_P-U_B tenta manter a corrente de pulso constante, mas não consegue sempre por causa da limitação do tempo de pulso e a limitação da velocidade máxima da subida da corrente. Nos ensaios com menor comprimento do arco foi possível soldar com uma corrente de pulso mais alta sem variação da corrente. Por exemplo, com a corrente de pulso de 550A e comprimento do arco de 3,8mm, a variação foi 58A. Com a redução do comprimento do arco para 2,2mm, pela redução da tensão de base, a fonte de soldagem conseguiu manter a corrente

quase constante (Variação de 5A), o que significa com um menor comprimento do arco, a corrente passou mais rápida.

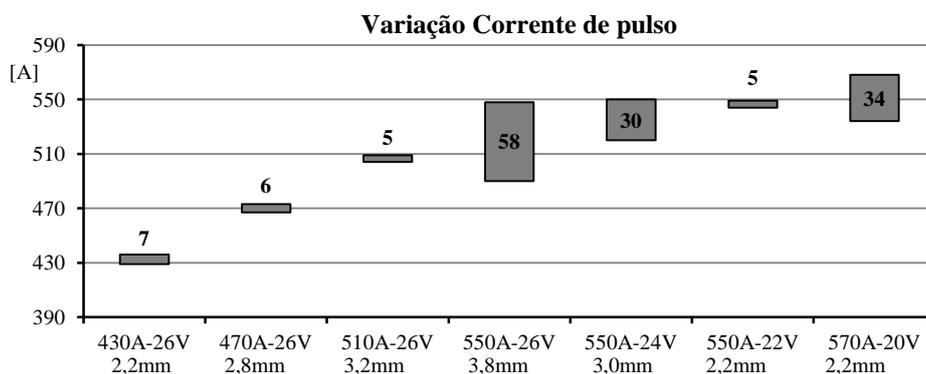


FIGURA 4.70 Comparação das faixas de variação do corrente de pulso dos diferentes ensaios com os diferentes comprimentos dos arcos.

A variação da corrente de pulso provocou uma variação na transferência do metal. Com uma corrente de pulso de 430A não foi possível transferir sempre uma gota para a poça da fusão. A corrente de pulso (Força de Lorentz), não foi suficiente para estrangular a gota até final da descida da corrente. A separação da gota do eletrodo e a transferência foram feitas na fase de base, quando a força de Lorentz era baixa, por uma corrente de base baixa. Neste caso a força de Lorentz não foi suficiente para a transferência do metal para a poça de fusão.

Com o aumento da corrente de pulso de 430A para 470A, um aumento de 40A, a força de Lorentz foi suficiente para o estrangulamento e a separação da gota do eletrodo. A separação foi feita até final da fase de descida da corrente, a transferência para a poça de fusão foi feita na fase de base.

Com o aumento da corrente de pulso para 510A foi possível observar o formação esporádica de uma gota adicional transferida depois da gota principal. Esta formação de uma gota adicional foi reforçada pelo aumento da corrente de pulso. Com uma corrente de pulso de 550A sempre uma gota adicional foi formada.

A formação de gotas adicionais pode sugerir que a variação da corrente de pulso provocou uma variação do volume da gota transferida, portanto, o aumento do comprimento do arco.

A análise dos comprimentos dos arcos e da potência na fase de pulso não confirmou esta teoria. A Figura 4.71 apresenta as diferentes potências na fase de pulso com as potências quase iguais as Figura 4.71b e Figura 4.71c, com diferentes comprimentos dos arcos e com a mesma maneira da transferência de metal e da formação de gotas adicionais.

A comparação de Figura 4.71a com 4.71c, apresenta na Figura 4.71c o comprimento menor do arco e a potência maior do que na Figura 4.71a, onde a transferência do metal não ocorreu com a formação de gotas adicionais. Este apresenta, com uma frequência de pulsação e velocidade de alimentação do arame constante na soldagem, o volume do metal transferido do eletrodo para a poça de fusão não variou com o comprimento do arco.

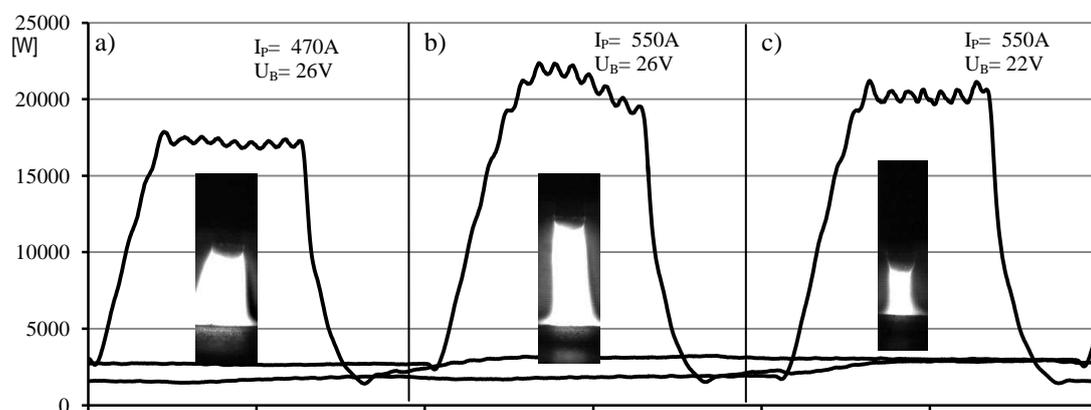


FIGURA 4.71 Comparação da potência das diferentes soldagens e comprimentos dos arcos com a) corrente de pulso 470A, tensão de base 26V (2,8mm), b) corrente de pulso 550A e tensão de base 26V (3,8mm) e c) corrente de pulso 550V e tensão de base 22V (2,2mm)

Duas maneiras de formação da gota adicional foram observáveis. Primeiro, a gota principal se dividiu em menores gotas e segundo, depois da separação da gota principal foi formada mais uma pequena no eletrodo.

O fenômeno da formação da gota adicional pode ser explicado pela maior força de Lorentz, maior temperatura da gota e menor força da tensão superficial.

No primeiro, com mais potência no processo, a temperatura da gota aumentou, com o aumento da temperatura, a força superficial reduziu e não conseguiu formar uma gota esférica.

No segundo, nos ensaios com menor corrente de pulso foi observado, que a força de Lorentz forma um cone no fim de eletrodo e estrangula a gota (Figura 4.72a). Depois do estrangulamento, a força da tensão superficial suga o material do cone de volta ao eletrodo (Figura 4.72b), a transferência da gota principal foi feita (Figura 4.72c). No processo com maior corrente de pulso, o ângulo do cone formado pela força da tensão superficial foi mais fino (Figura 4.72d). Causado pela maior temperatura, a força da tensão superficial foi não suficiente para sugar o material de cone inteira de volta, uma gota adicional foi formada (Figura 4.72e) e com a gota principal, uma gota adicional foi transferida (Figura 4.72f).

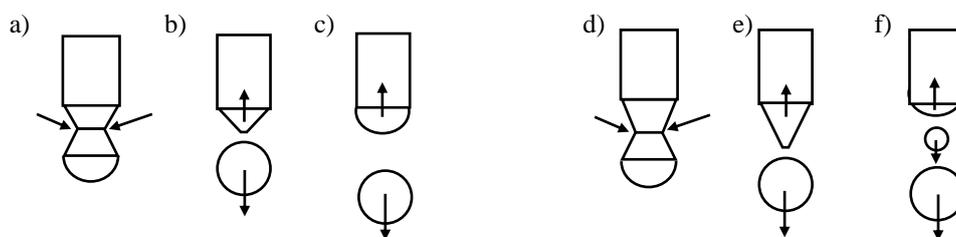


FIGURA 4.72 Esquemáticamente o processo de estrangulamento com diferentes correntes de pulso

A variação da corrente de pulso de 430A para 550A provocou uma variação da corrente média de 225,8A a 244,4A, como apresentado na Figura 4.73. A variação da tensão de base, portanto, a comprimento do arco resultou uma variação de 2,6A, na corrente média.

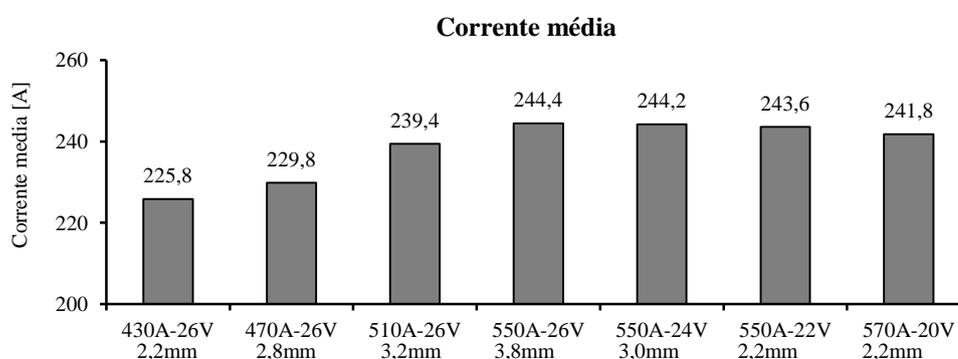


FIGURA 4.73 Comparação das correntes médias com variação da corrente de pulso e variação da tensão de base

A comparação da largura e penetração (Figura 4.74), não apresentou uma variação por variação da corrente média de 18,6A nos ensaios, também o reforço e a diluição (Figura 4.75).

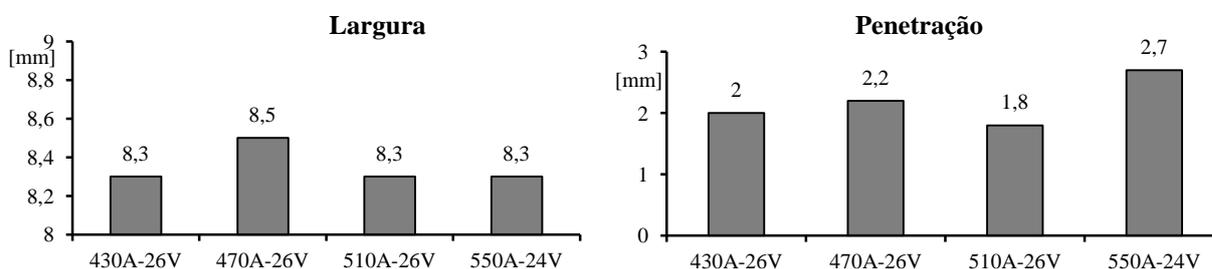


FIGURA 4.74 Comparação da largura e penetração com variação da corrente de pulso

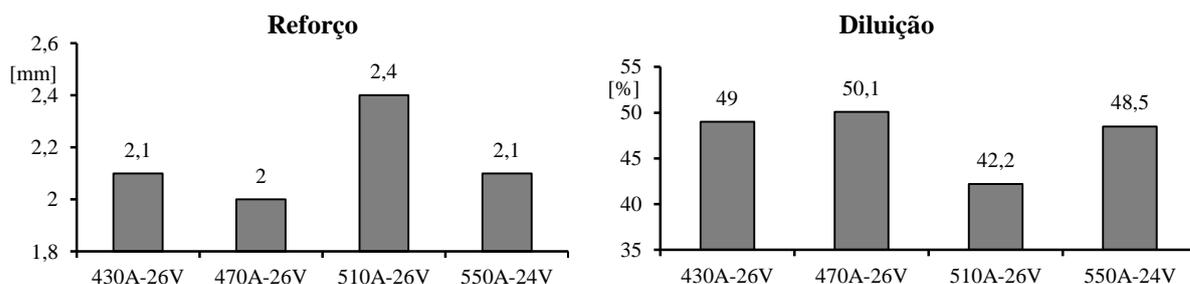


FIGURA 4.75 Comparação do reforço e diluição com variação da corrente de pulso

A variação do comprimento do arco provocou uma variação na tensão média em uma faixa de 3,6V, entre 28,4V e 24,8V (Figura 4.76).

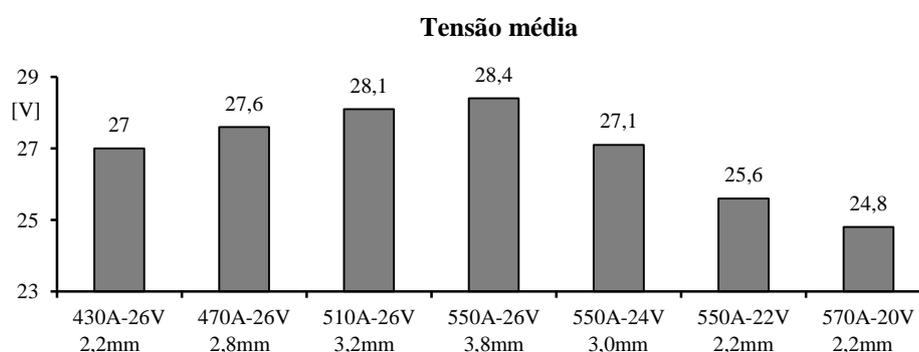


FIGURA 4.76 Comparação da tensão média com variação do comprimento do arco

No aporte térmico, a variação da tensão provocou uma variação de 932 J/cm (Figura 4.77).

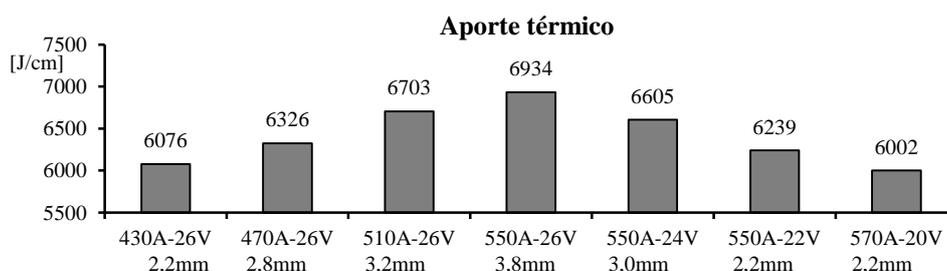


FIGURA 4.77 Comparação do aporte térmico com variação do comprimento do arco

Resumindo, a corrente de pulso influenciou o comprimento do arco e a maneira de transferência do metal. Com um valor da corrente de pulso em cima do valor necessário para estrangular a gota uniforme, a força de Lorentz foi maior que o necessário, e provocou a formação de gotas adicionais. Os efeitos da manipulação do comprimento do arco com a corrente de pulso e a tensão de base podem ser compensáveis. O aumento da corrente de pulso aumenta o comprimento do arco, e a redução da tensão de base reduziu o comprimento do arco.

Com o aumento do comprimento do arco, o aporte térmico aumentou. Arcos com mesmo comprimento, mas com diferentes correntes de pulso resultaram no mesmo aporte térmico. Com a variação da corrente de pulso de 430A para 550A as características geometrias das soldagens não foram influenciadas. A variação do comprimento do arco, por aumento da corrente de pulso, não provocou uma variação do volume do material transferido.

4.4.3 Variação do tempo de pulso

Neste subitem foi investigada a influência da variação do tempo de pulso. A subida da corrente foi programada com a velocidade máxima da fonte de soldagem. O tempo da descida foi programado para 0,5ms, o mínimo da máquina da soldagem. Os parâmetros principais foram definidos com uma velocidade de alimentação de 5m/min, com a frequência de pulsação de 85Hz. A velocidade de soldagem foi 0,6m/min. Um arame com diâmetro de 1,2mm foi usado.

A variação do tempo de pulso foi feita nos valores de 3,0ms, 3,5ms e 4ms com uma corrente de pulso de 430A, os ensaios foram repetidos duas vezes. A análise dos resultados foi concentrada na avaliação do comprimento do arco, transferência do metal, na corrente e tensão, aporte térmico e das características geométricas.

4.4.3.1 Resultados variação do tempo de pulso

Os primeiros ensaios foram feitos com a corrente de pulso de 430A, com o tempo de pulso de 3,0ms e uma tensão de base de 26V. A Figura 4.78 apresenta as ondas de tensão e corrente dos ensaios.

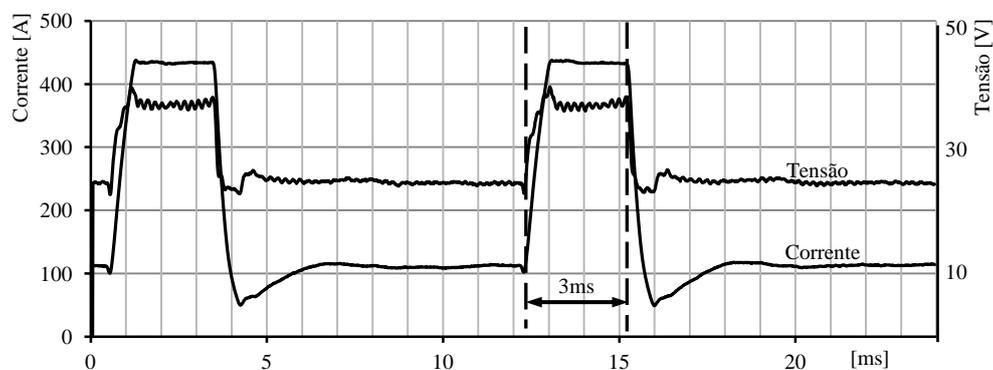


FIGURA 4.78 Tensão e corrente dos ensaios, $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$

A corrente de base variou em uma faixa de 68A, entre 50A e 118A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 6A, entre 431A e 437A. A Tabela 4.25 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios.

TABELA 4.25 Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,00	1,90	2,23	44,87	28,0	228,2	6390
2'	8,71	1,38	2,27	39,31	27,8	232,8	6469
ME	8,4	1,6	2,3	42,1	27,9	230,5	6430

O comprimento do arco foi constante durante das soldagens e se estabilizou no valor de 3,2mm. A Figura 4.79 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

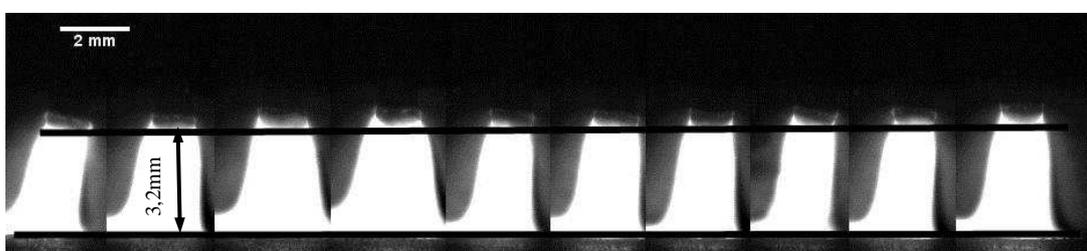


FIGURA 4.79 Medição do comprimento do arco (3,2mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$

A transferência do metal foi uniforme durante da soldagem (uma gota por pulso). As imagens da câmera apresentaram o estrangulamento e a separação da gota do eletrodo ocorrendo no final da fase da descida da corrente. Uma única gota com forma esférica foi formada.

A seguir foram feitos os ensaios com o tempo do pulso de 4,0ms e a tensão de base de 26V. A Figura 4.80 apresenta as ondas de tensão e corrente do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$.

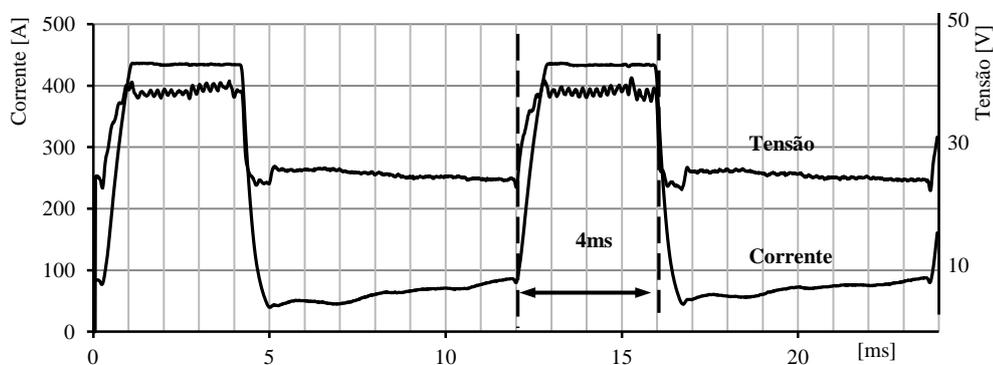


FIGURA 4.80 Tensão e corrente dos ensaios, $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$

A corrente de base variou em uma faixa de 48A, entre 40A e 88A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 5A, entre 432A e 437A. Tabela 4.26 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios.

TABELA 4.26 Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B= 26V$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,46	2,23	2,12	50,68	30,5	250,2	7635
2	8,75	1,77	2,11	45,58	29,9	252,6	7546
ME	8,6	2,0	2,1	48,1	30,2	251,4	7591

O aumento do tempo de pulso, de 3,0ms para 4,0ms, resultou um aumento do comprimento do arco. O comprimento foi constante durante das soldagens e se estabilizou no valor de 5mm. A Figura 4.81 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

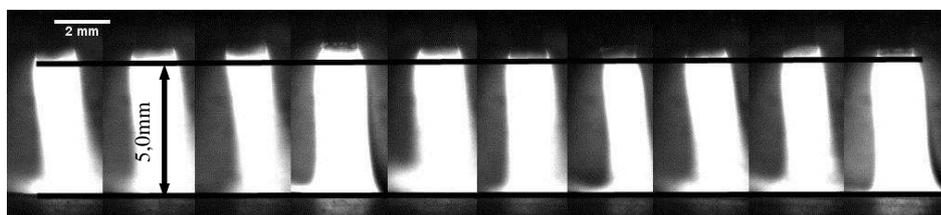


FIGURA 4.81 Medição do comprimento do arco (5,0mm) com $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B= 26V$

Nos ensaios com o tempo de pulso de 4,0ms, a transferência do metal foi feita a cada pulso, mas a forma da gota variou muito. A Figura 4.82 apresenta uma seqüência de imagens da transferência do metal de um pulso. Figura 4.82a mostra o arco na fase de base com uma corrente de 80A e 25V. Figura 4.82b, depois de 4ms, no final de fase de pulso, com corrente de pulso de 432A e tensão de pulso de 36,2V. A imagem é muito iluminada causada pela intensidade elevado do arco. A Figura 4.82c, depois de 1,0ms (final da descida da corrente, no início da fase de base) mostra a gota totalmente deformada. A Figura 4.82d, depois 0,5ms a gota entra na poça de fusão e o material fundido não transferido volta para o eletrodo.

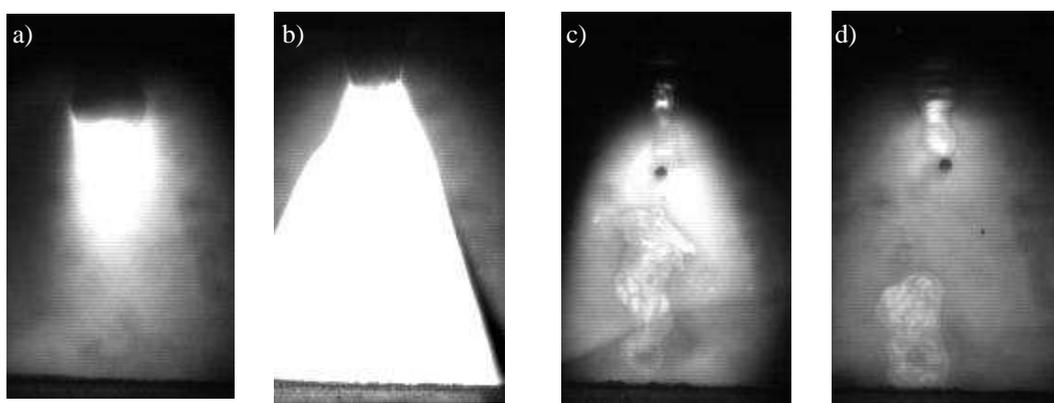


FIGURA 4.82 Seqüência de um pulso com $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B= 26V$

A seguir o tempo de pulso foi reduzido para 3,5ms e a tensão de base para 23V (para reduzir o comprimento do arco). A Figura 4.83 apresenta as ondas de tensão e corrente do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B=23V$.

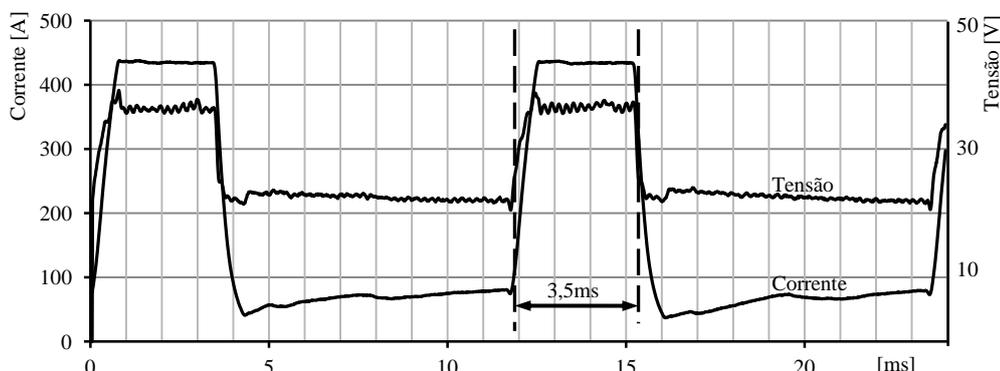


FIGURA 4.83 Tensão e corrente dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B= 23V$

A corrente de base variou em uma faixa de 41A, entre 37A e 78A. A corrente de pulso variou em uma faixa de 6A, entre 432A e 438A. A Tabela 4.27 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais de cordões dos ensaios.

TABELA 4.27 Análise da corrente e tensão dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B= 23V$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,51	1,91	2,33	41,82	27,3	235,8	6431
2	8,62	1,95	2,21	43,91	27,1	233,7	6342
ME	8,6	1,9	2,3	42,9	27,2	234,8	6387

A redução tempo de pulso, de 4,0ms para 3,5ms, e a redução da tensão de base para 23V resultou uma redução do comprimento do arco. O comprimento foi constante durante a soldagem e se estabilizou no valor de 3,4mm. A Figura 4.84 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

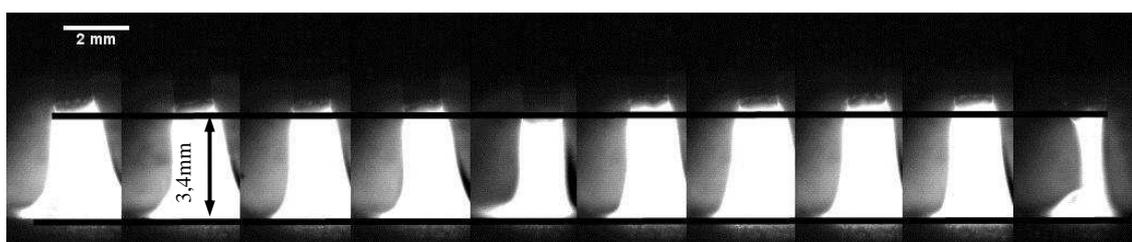


FIGURA 4.84 Medição do comprimento do arco (3,4mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B=23V$

A transferência do metal na soldagem com a corrente de pulso de 430A, tempo de pulso de 3,5ms e tensão de base de 23V, foi uniforme e feita a cada pulso, mas quase todos os pulsos, uma gota adicional foi formada.

4.4.3.2 Discussão sobre a variação da corrente e tempo de pulso

A variação do tempo de pulso resultou em uma variação do comprimento do arco. O aumento do tempo provocou um aumento do comprimento do arco, o qual foi compensado pela redução da tensão de base. A Figura 4.85 mostra a comparação dos diferentes comprimentos dos arcos durante as testes.

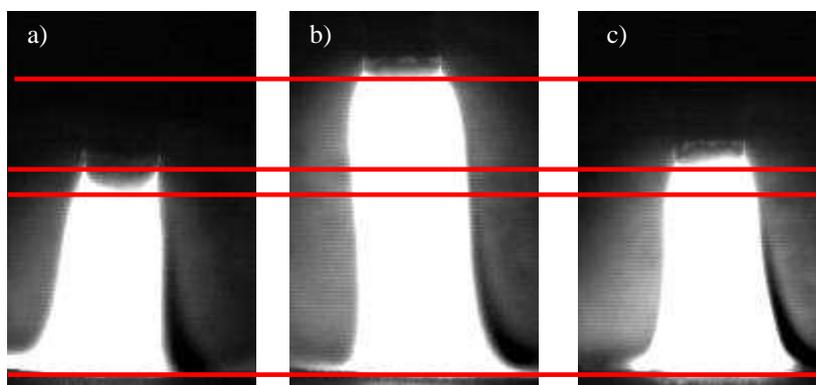


FIGURA 4.85 Comparação dos comprimentos dos arcos com a) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, b) $I_p=430A$, $t_p=4,0ms$, $U_B=26V$ e c) $I_p=430A$, $t_p=3,5ms$, $U_B=23V$

Durante as soldagens, os principais parâmetros permaneceram constantes. A Figura 4.86 apresenta as variações do tempo de pulso com os parâmetros principais constantes.

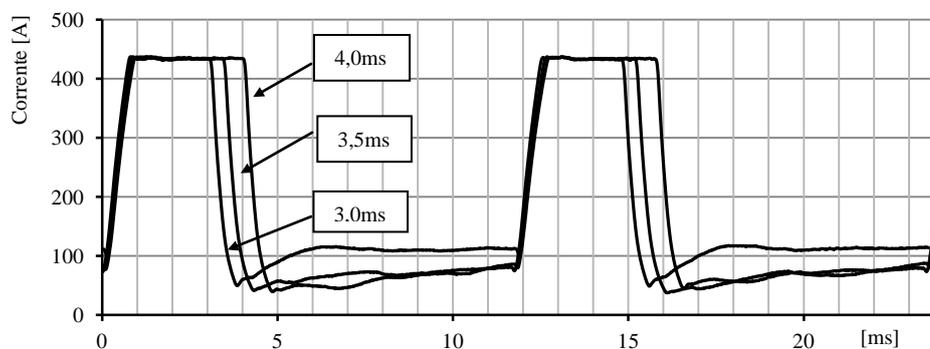


FIGURA 4.86 Comparação da tensão e corrente dos ensaios

A corrente de pulso foi constante durante as soldagens e não apresentou uma variação entre os testes com variação do tempo de pulso. A Figura 4.87 compara os valores das correntes e tensões no diagrama U-I.

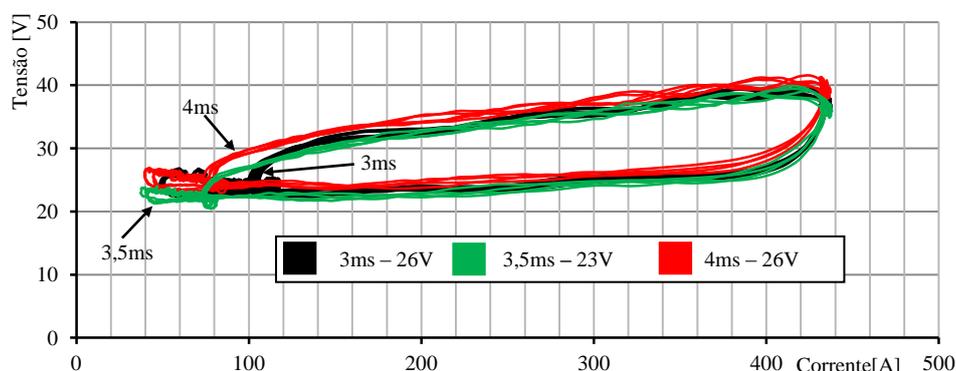


FIGURA 4.87 Comparação tensão e corrente dos ensaios no diagrama U-I

A variação do tempo influenciou a transferência do metal. Em comparação com os ensaios feitos no item 4.4.2 com os parâmetros $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$ e $U_B= 26V$, onde a transferência não foi feita a cada pulso e a força de Lorentz não foi suficiente para estrangular a cada pulso uma gota. O aumento do tempo de pulso para 3,0ms resultou uma transferência do metal uniforme. Nos ensaios com um tempo de pulso de 4ms a transferência do metal foi parecida como no modo globular até spray. Uma gota alongada foi formada. Com a prorrogação do tempo o tempo de atuação da força de Lorentz aumentou e a influência da força no processo de estrangulamento.

A Figura 4.88 mostra que a tensão média foi influenciada pelo comprimento do arco. Com o aumento do tempo de pulso o arco cresceu e a tensão média aumentou. Mesmos comprimentos de arco, com diferentes tempos de pulso resultaram valores parecidos da tensão média. Pela prorrogação do tempo de pulso, a corrente média não aumentou.

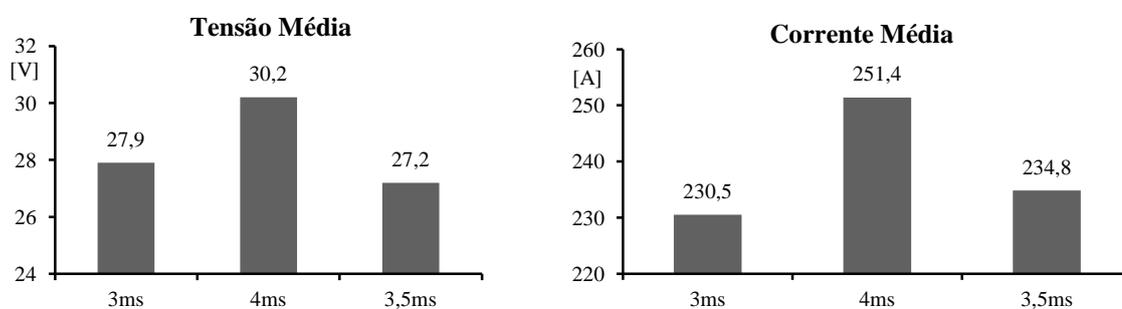


FIGURA 4.88 Comparação tensão média e corrente média

O aporte térmico (Figura 4.89) foi influenciado pela tensão média do arco. Com a redução do comprimento do arco e simultaneamente prorrogação do tempo de pulso foi possível reduzir o aporte térmico ao nível como com menor tempo de pulso.

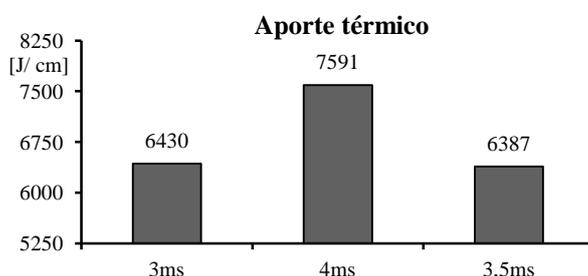


FIGURA 4.89 Comparação aporte térmico

As características geométricas (Figura 4.90) não foram influenciadas pela variação do tempo de pulso.

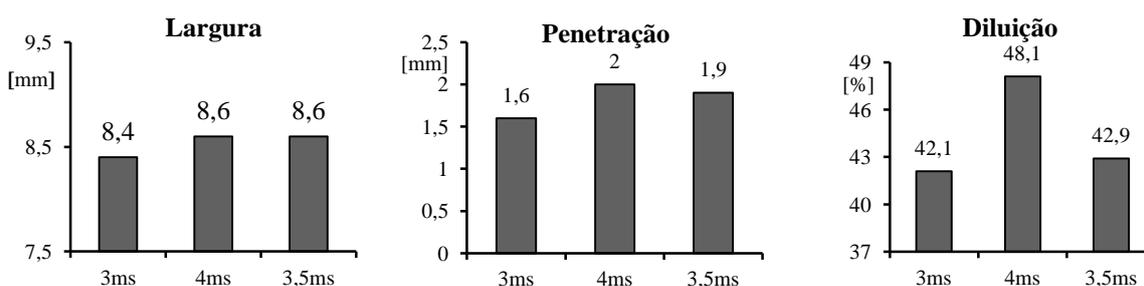


FIGURA 4.90 Comparação largura, penetração e diluição

Resumindo, a variação do tempo de pulso influenciou o comprimento do arco e a transferência do metal. A corrente de pulso e o tempo de pulso interagiram. Com o aumento do tempo foi possível resultar uma transferência uniforme com corrente de pulso menores. Correntes de pulso altas precisam menores tempos de pulsos para estrangular a gota. Um tempo longo demais provocou a formação de gotas adicionais até a deformação da gota. As características geométricas das soldagens não foram significativamente influenciadas pela variação do tempo de pulso.

4.4.3 Variação da frequência de pulsação

Neste subitem foi investigada a influência da frequência de pulsação. A subida da corrente foi programada com a velocidade máxima da fonte de soldagem. O tempo de descida foi programado para 0,5ms, o mínimo da máquina da soldagem. Os parâmetros principais foram definidos com uma velocidade de alimentação de 5m/min. A velocidade de soldagem foi 0,6m/min. Um arame com diâmetro de 1,2mm foi usado.

A variação da frequência de pulsação foi feita nos valores de 105Hz e 135Hz, para resultar gotas com diâmetro igual e menores do que o diâmetro do arame. A influência foi investigada com as correntes de pulso de 430A e 510A. Para manipular o comprimento do arco, a tensão de base foi alterada. Para manipular a transferência do metal, o tempo do pulso foi alterado. Os resultados foram comparados com os ensaios dos subitens anteriores com uma frequência de pulsação de 85Hz.

Os ensaios foram repetidos duas vezes. A análise dos resultados foi concentrada na avaliação do comprimento do arco, transferência do metal, na corrente e tensão, aporte térmico e das características geométricas.

4.4.3.1 Resultados da frequência de pulsação

Os primeiros ensaios foram feitos com a corrente de pulso de 430A, com o tempo de pulso de 3,0ms, uma tensão de base de 26V e uma frequência de pulsação de 105Hz. A frequência de 105Hz resultou em um diâmetro teórico da gota igual ao diâmetro do arame. Os parâmetros usados foram os mesmos dos testes com uma frequência de pulso de 85Hz foram anteriores usados (Item 4.4.3.1) e resultaram em uma transferência do metal uniforme.

Os parâmetros resultaram em um comprimento do arco constante e o arco se estabilizou no valor de 5,2mm. A Figura 4.91 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

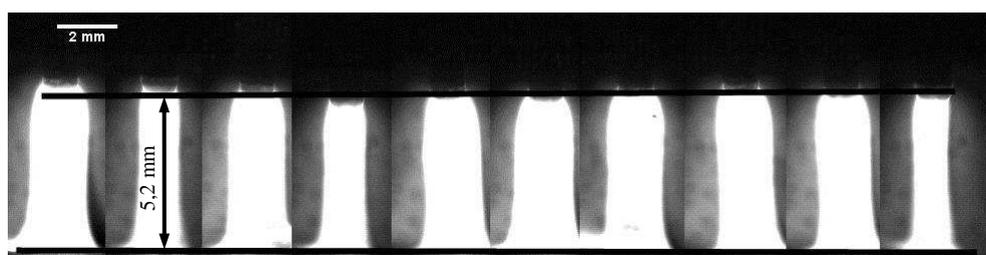


FIGURA 4.91 Medição do comprimento do arco (5,2mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, $F_p=105Hz$

A transferência da gota para a poça de fusão foi uniforme e ela foi feita a cada pulso. Foi observável a formação de uma gota adicional depois do estrangulamento da gota principal. A Figura 4.92 apresenta as ondas de tensão e corrente dos ensaios combinadas com as imagens da câmera de alta velocidade. A Figura 4.92a mostra o arco no momento da subida da corrente na fase de pulso. A Figura 4.92b mostra o final da fase do pulso com o estrangulamento da gota. A Figura 4.92c mostra o final da descida da corrente com a separação da gota principal do arame e com a formação de uma gota adicional. A Figura 4.92d mostra a entrada da gota principal na poça de fusão e a gota adicional voando.

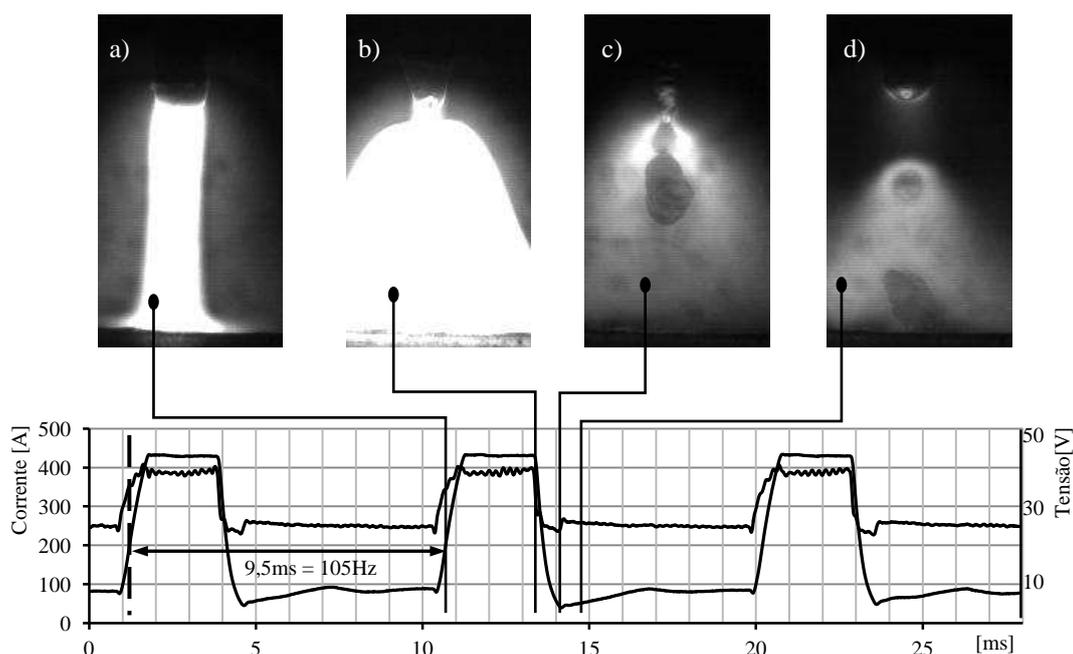


FIGURA 4.92 Corrente e tensão com as imagens da transferência do metal do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 26V$, $F_p= 105Hz$

Tabela 4.28 mostra os valores médios de corrente e tensão e o aporte térmico.

TABELA 4.28 Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 26V$, $F_p=105Hz$

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	29,8	236,0	7035
2	29,7	236,7	7023
ME	29,8	236,4	7029

A seguir a tensão de base foi alterada de 26V para 22V para resultar um comprimento do arco parecido com os dos ensaios com os parâmetros de 85Hz, corrente de pulso de 430A e tempo de pulso de 3,0ms. A variação da tensão de base resultou um comprimento do arco menor. O arco foi constante e se estabilizou no valor de 3,7mm. A Figura 4.93 mostra o arco em 10 momentos diferentes.

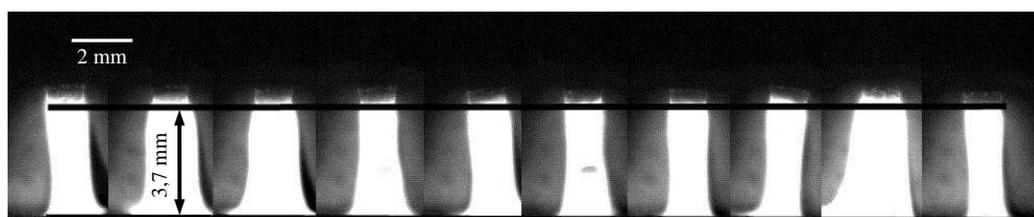


FIGURA 4.93 Comprimento do arco (3,7mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 22V$, $F_p=105Hz$

A variação da tensão de base não influenciou a transferência da gota. A transferência da gota para a poça de fusão foi uniforme e feita a cada pulso.

Ainda foi observada a formação de uma gota adicional depois do estrangulamento da gota principal. A Figura 4.94 apresenta as ondas de tensão e corrente dos ensaios combinado com as imagens da câmera de alta velocidade. A Figura 4.94c mostra o estrangulamento e a gota adicional.

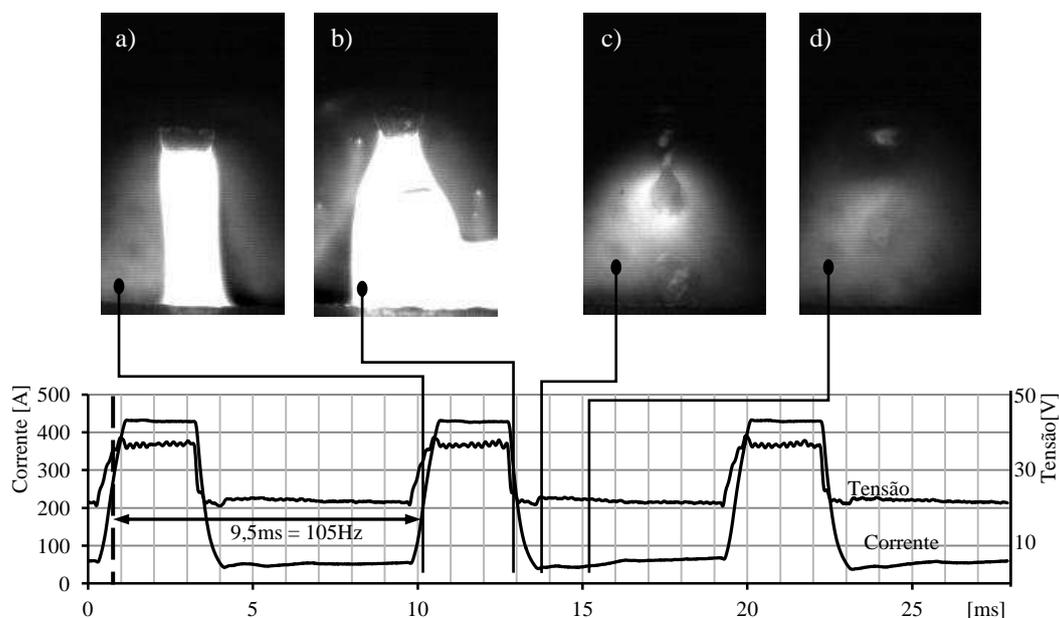


FIGURA 4.94 Corrente e tensão com as imagens da transferência do metal do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 22V$, $F_p=105Hz$

Tabela 4.29 apresenta os valores médios da corrente e da tensão em combinação com a análise das seções transversais dos cordões de solda dos ensaios.

TABELA 4.29 Análise da corrente e tensão dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 22V$, $F_p=105Hz$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,16	2,38	2,11	45,09	27,3	230,4	6293
2	7,95	2,37	2,00	45,82	27,2	230,4	6265
ME	8,1	2,4	2,1	45,5	27,3	230,4	6279

A seguir a frequência foi aumentada de 105Hz para 135Hz. Para provocar um comprimento do arco parecido como nas soldagens com 105Hz, a tensão de base foi reduzida para 21,5V. Para evitar a formação de uma gota adicional o tempo de pulso foi reduzido para 2,5ms.

O comprimento do arco se estabilizou no valor de 3,7mm e foi constante. A Figura 4.95 mostra o arco em 10 diferentes momentos.

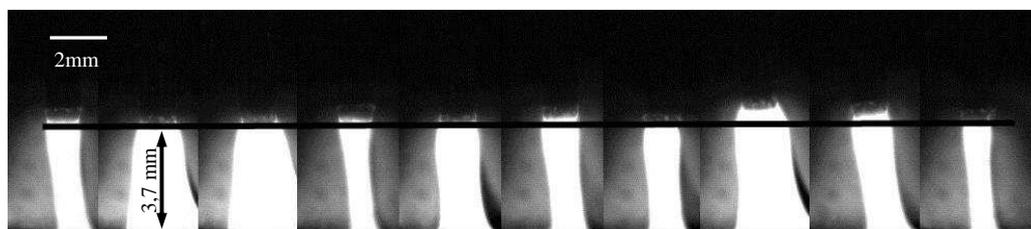


FIGURA 4.95 Comprimento do arco (3,7mm) com $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 21,5V$, $F_p=135Hz$

A transferência do metal é apresentada na Figura 4.96 com a corrente e tensão sincronizadas. A Figura 4.94c apresenta o estrangulamento da gota. A redução do tempo de pulso resultou a formação de uma gota única esférica.

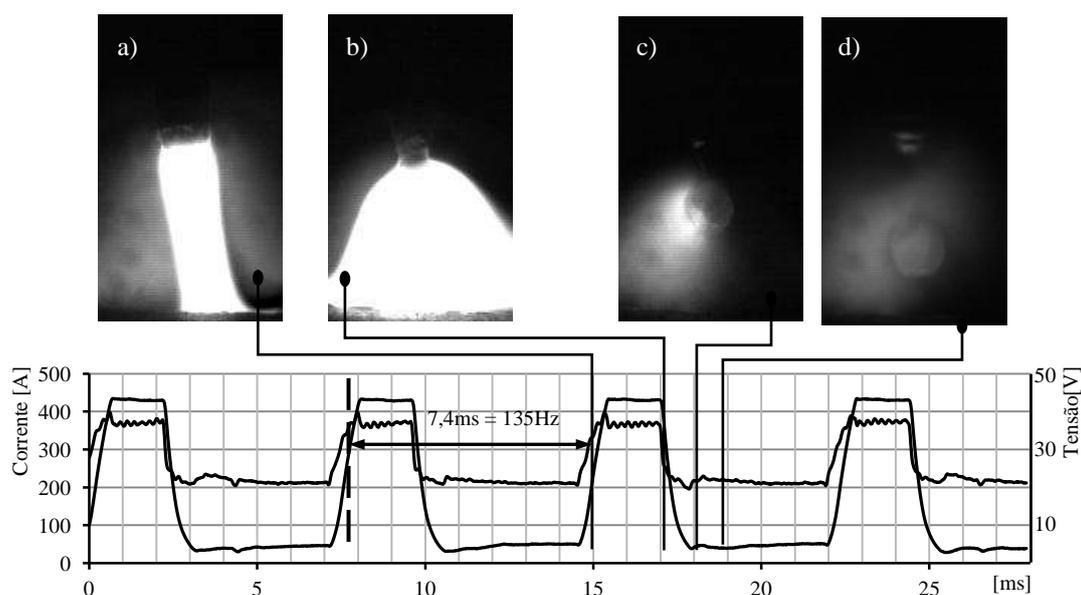


FIGURA 4.96 Corrente e tensão com as imagens da transferência do metal do ensaio com $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=21,5V$, $F_p=135Hz$

Tabela 4.30 apresenta os valores médios da corrente e da tensão em combinação com a análise das seções transversais dos cordões de solda dos ensaios.

TABELA 4.30 Análise da corrente e tensão dos ensaios $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 21,5V$, $F_p=135Hz$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	7,44	2,16	2,11	43,75	27,1	232,6	6290
2	8,46	2,30	2,21	47,09	27,0	234,5	6335
ME	8,0	2,2	2,16	45,4	27,1	233,6	6313

A seguir foram feitos os ensaios com uma corrente de pulso de 510A, tempo de pulso de 2,5ms e uma frequência de 105Hz. Para a comparação dos resultados com os ensaios feitos anteriores no item 4.4.2 com os parâmetros $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=26V$, $F_p=85Hz$, a tensão de base foi reduzida para 24V. Os parâmetros resultaram um comprimento do arco constante de 4,0mm. A Figura 4.97 apresenta o arco em 10 momentos diferentes.

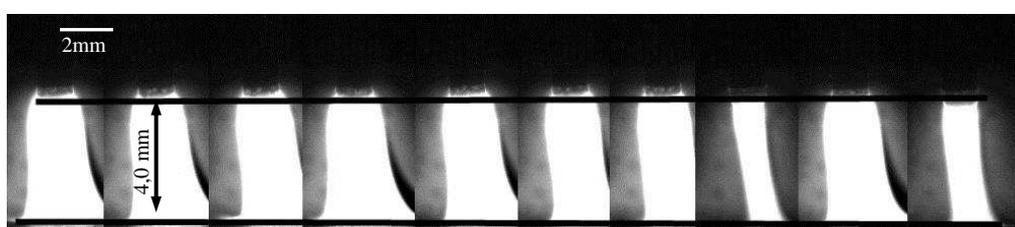


FIGURA 4.97 Comprimento do arco (4,0mm) com $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=24V$, $F_p=105Hz$

A transferência do metal foi comparável com os ensaios com 85Hz. A gota foi transferida uniforme com a formação esporádica de uma gota adicional (Figura 4.98c).

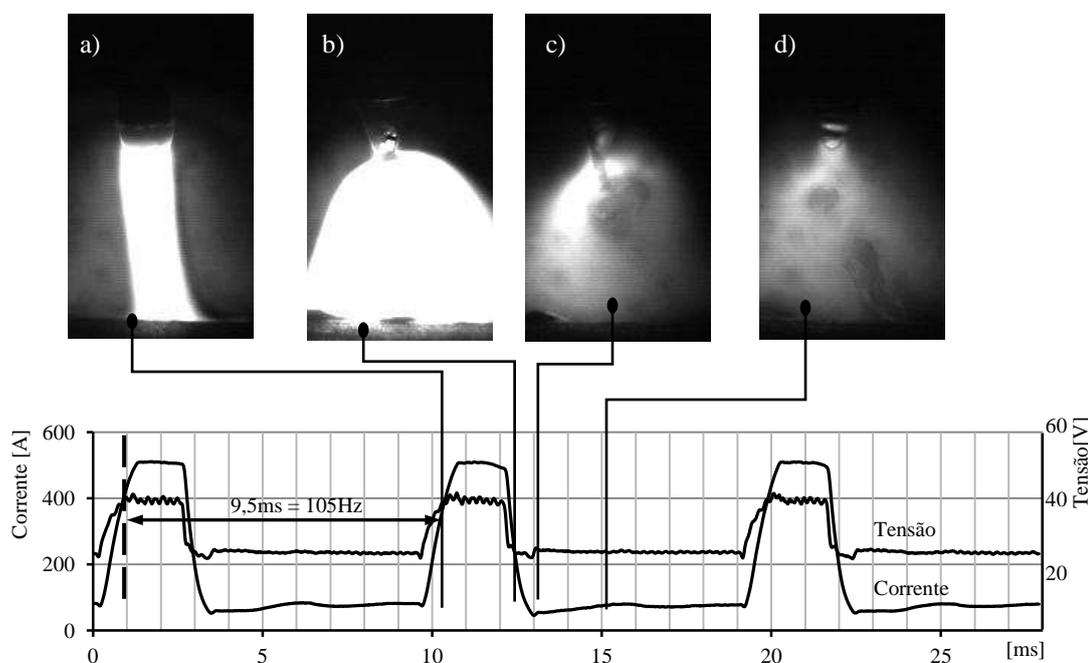


FIGURA 4.98 Corrente e tensão com as imagens da transferência do metal dos ensaios com $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=24V$, $F_p=105Hz$

Tabela 4.31 apresenta os valores médios da corrente e tensão com o aporte térmico.

TABELA 4.31 Análise da corrente e tensão com $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=24V$, $F_p=105Hz$

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	27,6	236,4	6523
2	28,0	243,6	6831
ME	27,8	240,0	6677

Em seguida a frequência foi aumentada de 105Hz para 135Hz. Para resultar um comprimento do arco parecido como os ensaios anteriores, a tensão de base foi reduzida para 23V. Por causa da formação das gotas adicionais nos ensaios com 85Hz e 105Hz, o tempo de pulso foi reduzido de 2,5ms para 2,0ms. Os parâmetros resultaram um arco com comprimento constante no valor de 3,9mm. A Figura 4.99 apresenta o arco em 10 diferentes momentos.

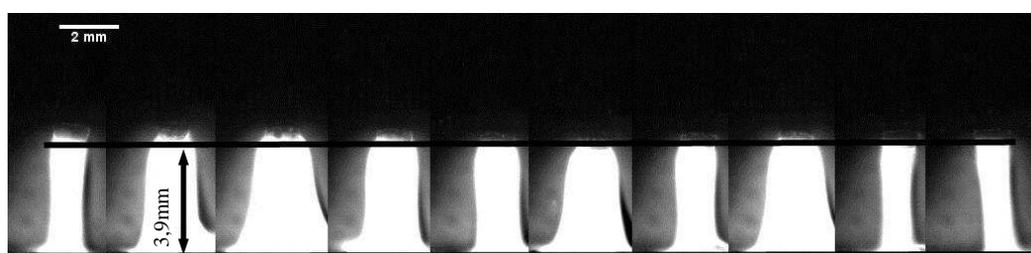


FIGURA 4.99 Comprimento do arco (3,9mm) com $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B=23V$, $F_p=135Hz$

A transferência do metal foi uniforme e a cada pulso feita. Com cada pulso uma gota foi transferida. Não foi observada a formação da gota adicional. A Figura 4.100 apresenta a corrente e tensão do ensaio em combinação com as imagens da câmera de alta velocidade.

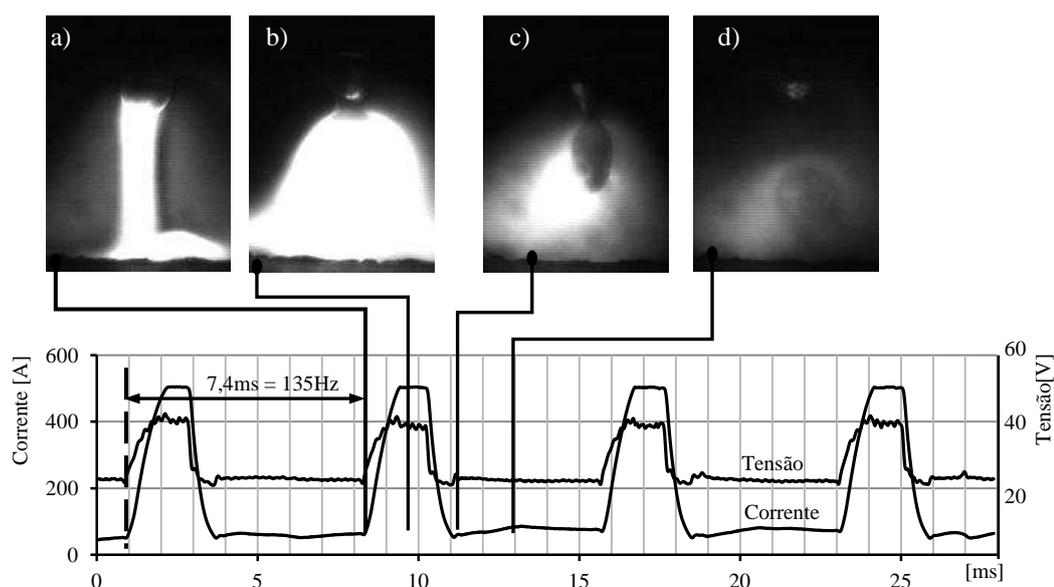


FIGURA 4.100 Corrente e tensão sincronizadas com as imagens da transferência do metal dos ensaios com $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B=23V$, $F_p=135Hz$

Tabela 4.32 apresenta os valores médios da corrente e tensão com o aporte térmico.

TABELA 4.32 Análise da corrente e tensão dos ensaios com $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B= 23V$, $F_P= 135Hz$

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	27,65	233,83	6466
2	27,81	233,07	6482
ME	27,7	233,5	6474

4.4.3.2 Discussão variação da frequência de pulsação

A comparação dos resultados dos ensaios com os mesmos parâmetros com uma variação da frequência de pulsação de 85Hz para 105Hz apresentou o aumento do comprimento do arco. O aumento de 85Hz para 105Hz significa, no tempo de 1 segundo, 20 pulsos a mais, portanto, a tensão média e corrente média do processo aumentaram e também o comprimento do arco. A Figura 4.101 apresenta a comparação dos comprimentos dos arcos com as diferentes frequências de pulsação. A variação do comprimento provocada pela frequência pode ser compensada pela tensão de base e tempo de pulso. A Figura 4.101c e 4.101d mostram mesmo comprimento do arco com a variação da frequência de 30Hz. A tensão de base e o tempo de pulso foram alterados.

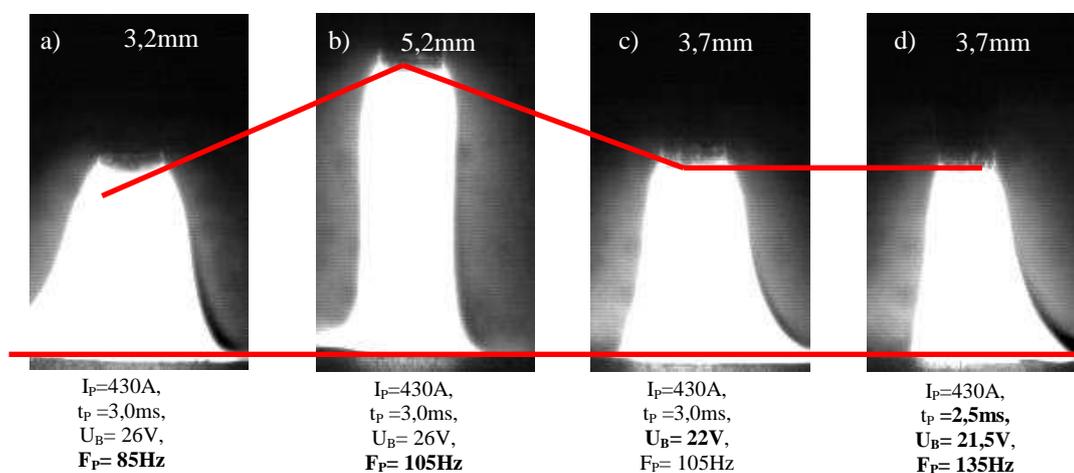


FIGURA 4.101 Comparação dos comprimentos dos arcos na fase de subida da corrente com os diferentes parâmetros

A transferência do metal foi influenciada pela frequência de pulsação. A Figura 4.102a e 4.102b apresentam os momentos da transferência das gotas dos ensaios com 85Hz e 105Hz. Com a frequência de 85Hz a formação e a transferência da gota foram uniformes. Com o aumento de mais 20Hz a formação de uma gota adicional foi observada.

Para excluir a formação da gota adicional provocada pelo aumento do comprimento do arco, a tensão de base foi reduzida para 22V (redução do comprimento do arco de 5,2mm para 3,7mm). A Figura 4.102c mostra o momento da transferência do metal com 105Hz e um tensão de base de 22V. Depois da redução, ainda foi observada a formação da gota adicional. Com o aumento da frequência de pulsação e do comprimento do arco, o volume da gota foi reduzido. Com a redução do volume, a potência necessária para a formação da gota foi reduzida. O que apresenta com o aumento da frequência de pulsação, a potência no pulso precisa ser reduzida para não provocar a formação de gotas adicionais. Isto pode ser feito pelo corrente de pulso ou pelo tempo de pulso. Para garantir mesmas condições de estrangulamento da gota, o tempo foi reduzido. A Figura 4.102d mostra a formação de uma única gota com o aumento da frequência para 135Hz (redução do volume da gota), a redução da tensão de base (provocar um comprimento dos arcos parecidos) e a redução do tempo de pulso (reduzir a potência na fase de pulso). A alteração dos parâmetros resultou uma transferência do metal uniforme sem a formação das gotas adicionais.

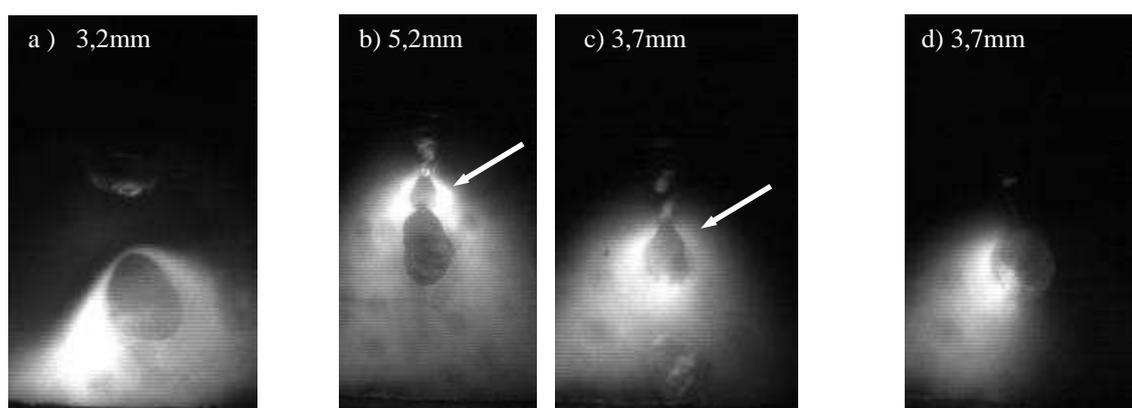


FIGURA 4.102 Comparação da transferência das gotas com
a)85Hz, b)105Hz, c)105Hz e d) 135Hz

A variação da frequência entre 85Hz e 135Hz não apresentou um influência na tensão média e na corrente média (Figura 4.103). O aumento do comprimento do arco, provocado pelo aumento da frequência, foi compensado pela redução da tensão de base. O aumento da corrente média foi compensado pela redução do tempo de pulso.

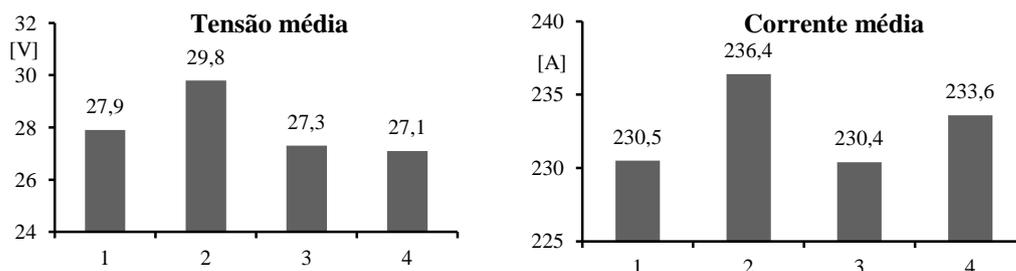


FIGURA 4.103 Comparação da tensão e corrente média com os parâmetros
 1) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, $F_p=85Hz$, 2) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=26V$, $F_p=105Hz$,
 3) $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=22V$, $F_p=105Hz$, 4) $I_p=430A$, $t_p=2,5ms$, $U_B=22V$, $F_p=135Hz$

Pela possibilidade da redução da tensão de base e do tempo do pulso, juntos com a variação da frequência, o aporte térmico (Figura 4.104) não foi influenciado. Mesmo resultado foi obtido na comparação das características geométricas (Figure 4.105).

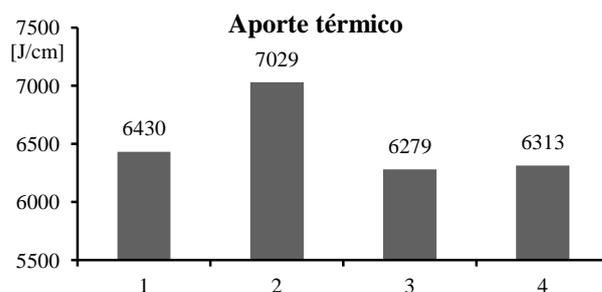


FIGURA 4.104 Comparação do aporte térmico

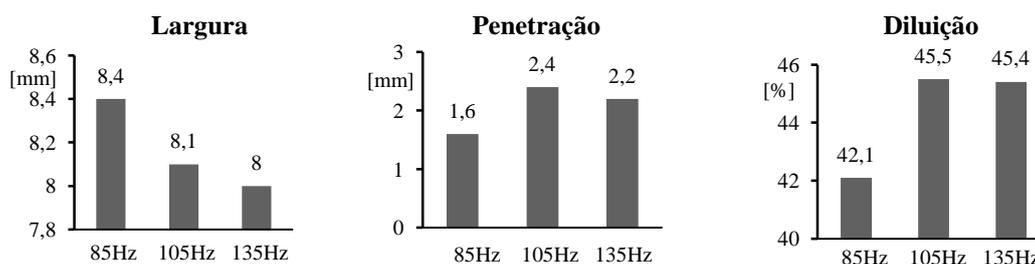


FIGURA 4.105 Largura, penetração e diluição com variação da frequência

Para confirmar os resultados com a corrente de pulso de 430A, os ensaios foram repetidos com a corrente de 510A com 85Hz, 105Hz e 135Hz. Para alterar o comprimento do arco a tensão de base foi reduzida. Para alterar a potência na fase de pulso, o tempo foi reduzido. Com uma frequência de 85Hz, tempo de pulso de 2,5ms e uma tensão de base de 26V,

a transferência apresentou a formação esporádico de gotas adicionais (Figura 4.106a). Com o aumento da frequência para 105Hz e a redução da tensão de base, a cada pulso uma gota adicional foi formada (Figura 4.106b). Com o aumento da frequência para 135Hz, com a redução do tempo de pulso e com a redução da tensão de base, a transferência do metal mudou. Não foi observada a formação de uma gota adicional (Figura 4.106c).

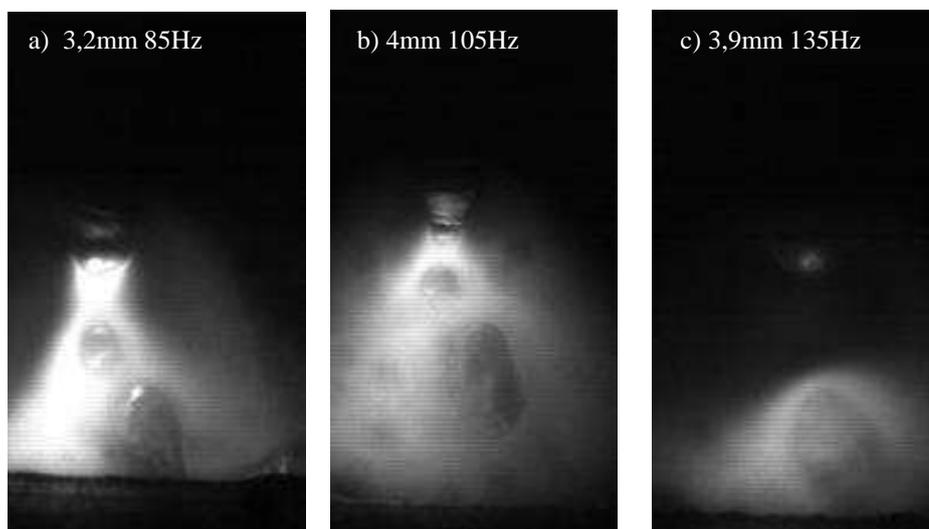


FIGURA 4.106 Comparação da transferência do metal com
 a) $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 26V$, $F_p= 85Hz$, b) $I_p=510A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 24V$,
 $F_p= 105Hz$ e c) $I_p=510A$, $t_p=2,0ms$, $U_B= 23V$, $F_p= 135Hz$

Os resultados apresentaram a mesma tensão média, a corrente média e o aporte térmico não foi influenciado. Pela redução do tempo de pulso, com uma frequência de 135Hz foi possível reduzir o aporte térmico (Tabela 4.33).

TABELA 4.33 Comparação tensão média, corrente média e aporte térmico dos ensaios com 510A

Ensaio	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
85Hz 2,5ms	28,1	239,4	6703
105Hz 2,5ms	27,8	240,0	6677
135Hz 2,0ms	27,7	233,5	6474

Resumindo, com a variação da frequência e os principais parâmetros iguais, o comprimento do arco foi influenciado pela frequência de pulso. Um aumento da frequência resultou um aumento do comprimento do arco.

Com frequências diferentes e com comprimento dos arcos iguais o volume da gota foi influenciado. Com a frequência maior e comprimentos dos arcos parecidos, menos potência foi necessário para formar uma única gota.

Com mesmas correntes de pulso, menores tempos de pulsos foram necessários. Pela redução do tempo de pulso foi possível reduzir o aporte térmico no processo com o aumento da frequência no mesmo tempo. As características geométricas não foram significativamente influenciadas.

4.5 Limite do processo

Para investigar o limite superior do processo a velocidade da alimentação foi aumentada até que uma relação do tempo de fase de pulso e fase de base igual a 1 foi obtida. Nesta velocidade de alimentação do arame, a frequência de pulsação foi variada para provocar diferentes volumes da gota. Com o limite da velocidade de alimentação, a corrente de pulso e tempo da corrente de pulso foram variados. A velocidade de soldagem foi definida para 1,3m/min.

Para investigar o limite inferior do processo, a velocidade da alimentação foi reduzida até o arco não apresentou condições estáveis. A velocidade de soldagem foi definida para 0,6m/min. Chapas com espessura de 2,5mm foram usadas.

4.5.1 Resultados limite do processo

O limite superior foi encontrado com uma velocidade de alimentação do arame de 10m/min, com a corrente de pulso de 430A, com o tempo de pulso de 3,0ms, uma tensão de base de 34V e uma frequência de pulsação de 160Hz. A Figura 4.107 apresenta a medição do comprimento do arco. O comprimento do arco foi constante durante da soldagem e se estabilizou no valor de 2,4mm.

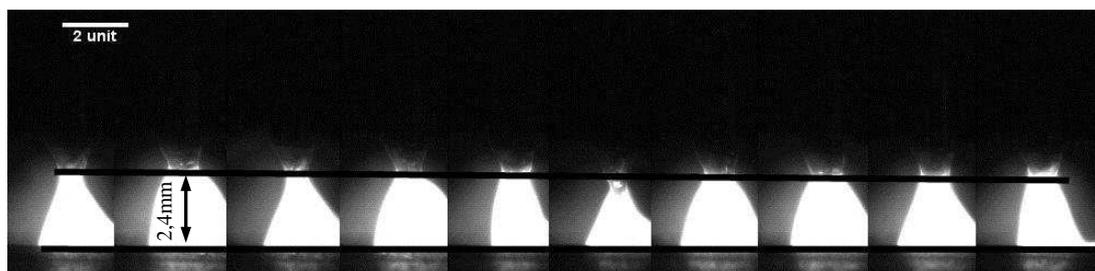


FIGURA 4.107 Medição do comprimento do arco (2,4mm) com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B=34V$, $F_p=160Hz$

A Figura 4.108 apresenta as ondas da corrente e tensão do processo com 160Hz e com a corrente de pulso de 430A. No final da fase de descida da corrente, a tensão caiu abaixo do valor programado da tensão de base. Depois de cerca 0,5ms a tensão de base se estabilizou no valor programado.

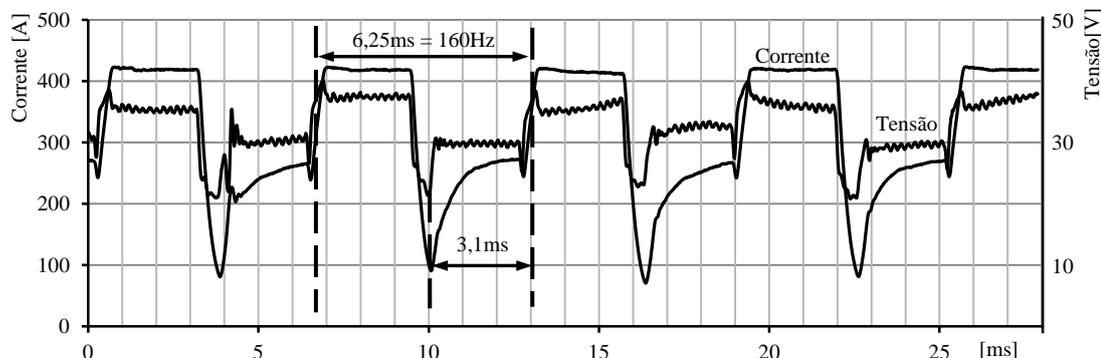


FIGURA 4.108 Corrente e tensão dos ensaios com $I_p=430A$, $t_p=3,0ms$, $U_B= 34V$, $F_p=160Hz$

A Figura 4.109 apresenta os valores de tensão e corrente do processo no diagrama U-I. A tensão de base variou no processo. A diferença entre tensão de base e tensão de pulso foi 10V. A corrente de pulso não variou.

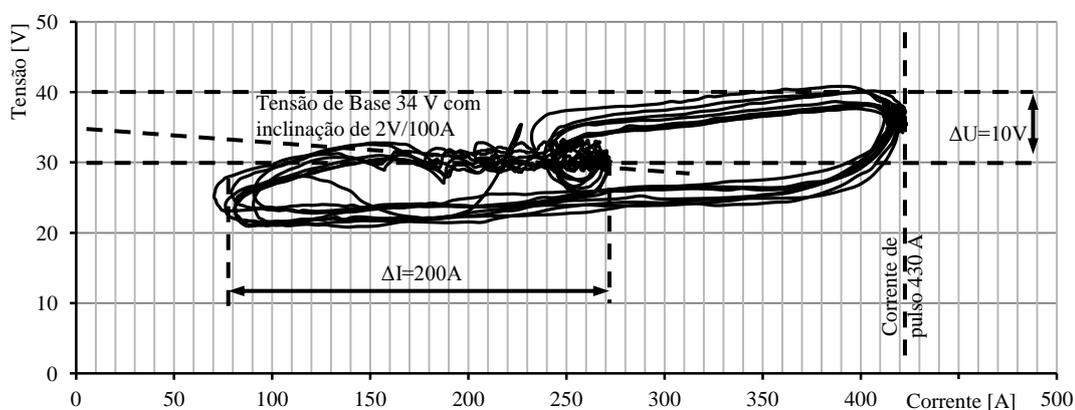


FIGURA 4.109 Diagrama U-I com 160Hz e corrente de pulso de 430A

A alteração da tensão de base para a tensão de pulso apresentou uma variação de 10V. Esta variação pequena provocou a iluminação simular das imagens na fase da base e na fase da corrente. A formação e o estrangulamento da gota foram não observados. Nas soldagens não ocorreram curtos-circuitos. Tabela 4.34 apresenta os valores médios de corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais dos cordões de solda dos ensaios.

TABELA 4.34 Corrente e tensão dos ensaios com $V_A=10\text{m/min}$, $I_p=430\text{A}$, $t_p=3,0\text{ms}$, $U_B=34\text{V}$, $F_p=160\text{Hz}$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	6,97	3,32	2,32	57,15	31,0	324,8	4647
2	7,47	3,02	2,50	52,95	30,5	330,7	4659
ME	7,2	3,2	2,4	55,1	30,8	327,8	4653

A seguir foram feitos os ensaios com uma corrente de pulso de 470A, com a redução do tempo de pulso para 2,5ms e uma tensão de base de 30V.

A frequência foi aumentada para 210Hz para provocar uma gota com mesmo diâmetro do eletrodo.

O comprimento do arco com uma frequência de 210Hz foi de 3,0mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.110). Durante a soldagem, o comprimento foi constante e não apresentou uma variação.

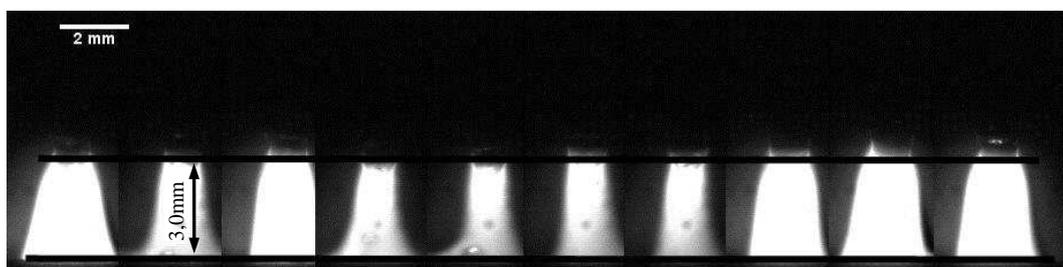


FIGURA 4.110 Medição do comprimento do arco (3,0mm) com $I_p=470\text{A}$, $t_p=2,5\text{ms}$, $U_B=30\text{V}$, $F_p=210\text{Hz}$

A Figura 4.111 apresenta os valores da tensão e da corrente do processo no diagrama U-I com a frequência de 210Hz. A corrente de base variou em uma faixa de 100A, entre 82A e 182A. A corrente de pulso não variou.

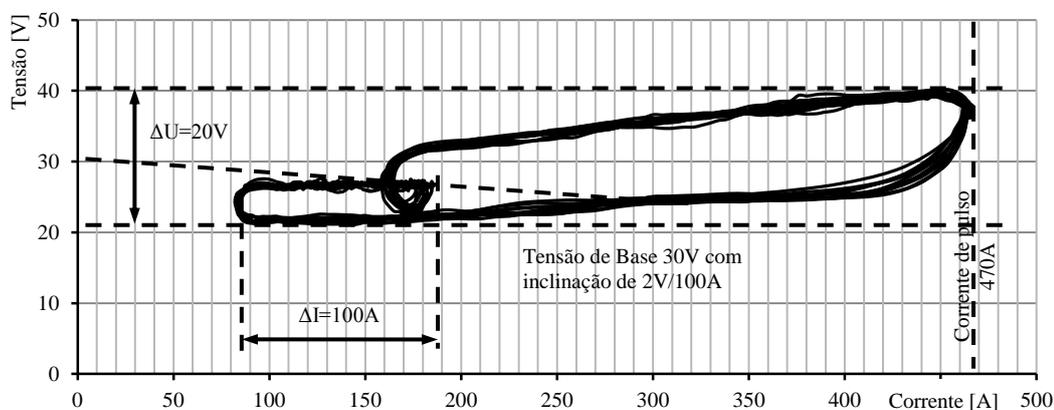


FIGURA 4.111 Diagrama U-I com a frequência de 210Hz

A Figura 4.112 apresenta as ondas da corrente e tensão do processo com 210Hz e com a corrente de pulso de 470A e tempo de base de 1,9ms.

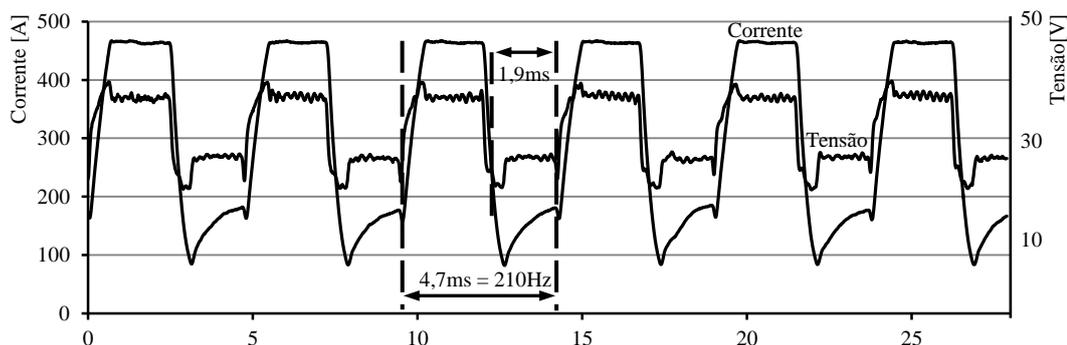


FIGURA 4.112 Corrente e tensão dos ensaios com $I_p=470A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 30V$, $F_P= 210Hz$

Figura 4.113 apresenta as diferentes fases da transferência do metal, com a) subida da corrente, b) fim da corrente de pulso, c) fim da descida da corrente com a separação da gota e d) na fase de base a entrada da gota na poça da fusão.

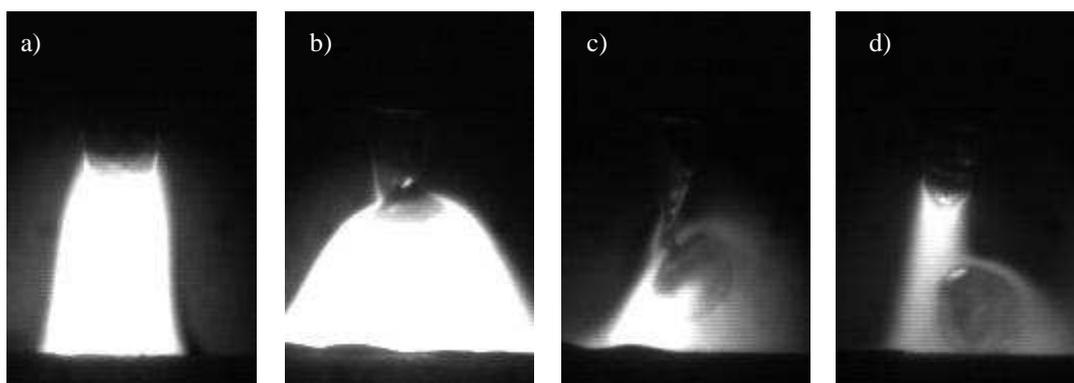


FIGURA 4.113 Transferência do metal com a frequência de 210Hz

A transferência do metal foi feita a cada pulso com uma gota por pulso da corrente. A Tabela 4.35 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais dos cordões de solda dos ensaios.

TABELA 4.35 Corrente e tensão dos ensaios com $V_A=10m/min$, $I_p=470A$, $t_p=2,5ms$, $U_B= 30V$, $F_P=210Hz$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,51	2,93	2,02	57,74	31,9	338,0	4978
2	8,32	2,82	1,96	56,92	32,2	336,5	4997
ME	8,4	2,9	2,0	57,3	32,1	337,3	4988

A seguir foram feitos os ensaios com uma corrente de pulso de 540A, com a redução do tempo de pulso para 1,85ms e uma tensão de base de 26V. A frequência foi aumentada para 270Hz, para provocar uma gota com diâmetro menor ao diâmetro do eletrodo. A análise do comprimento do arco com a frequência de 270Hz apresentou o valor de 2.9mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.14).

Durante a soldagem, o comprimento foi constante e não apresentou uma variação.

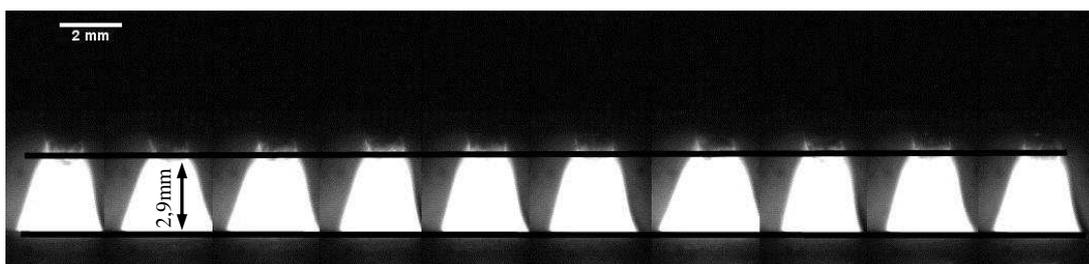


FIGURA 4.114 Comprimento do arco (2.9mm) com $I_p=540A$, $t_p=1,85ms$,
 $U_B= 26V$, $F_p= 270Hz$

A Figura 4.115 apresenta os valores da tensão e da corrente do processo no diagrama U-I com a frequência de 270Hz. A corrente de base variou em uma faixa de 45A, entre 80A e 125A. A corrente de pulso não apresentou uma variação.

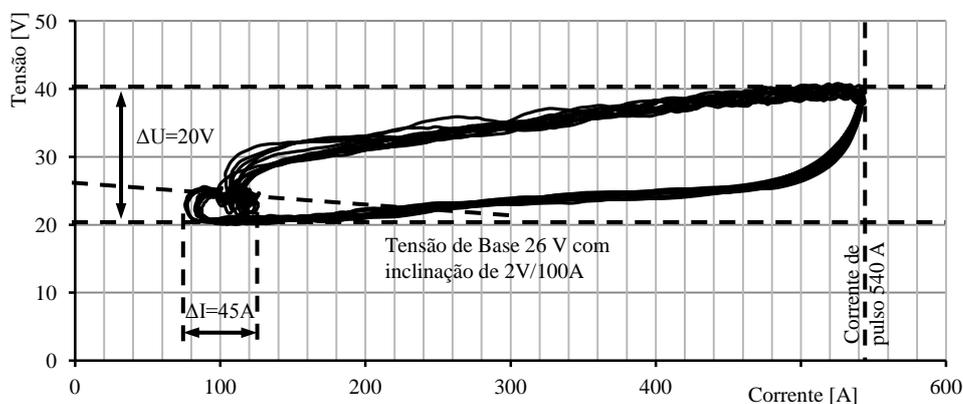


FIGURA 4.115 Diagrama U-I com a frequência de 270Hz

A Figura 4.116 apresenta as ondas da corrente e tensão do processo com 270Hz e com a corrente de pulso de 540A e tempo de base de 1,4ms.

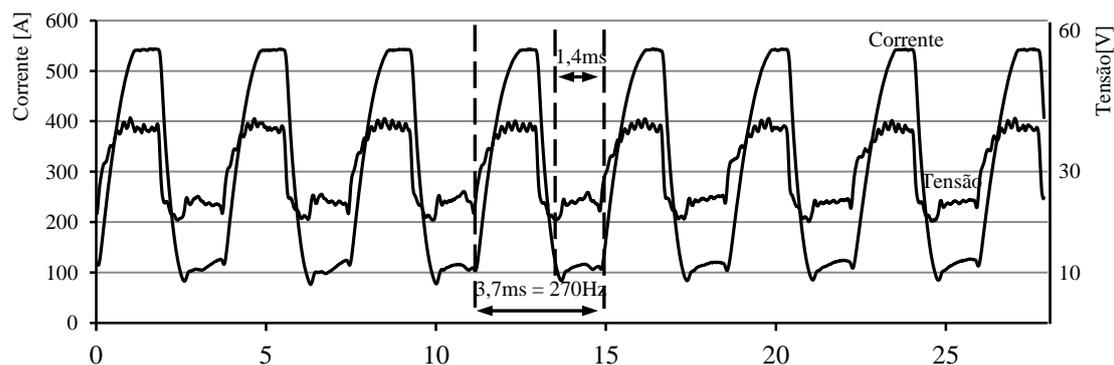


FIGURA 4.116 Corrente e tensão dos ensaios com $I_p=540A$, $t_p=1,85ms$,
 $U_B=26V$, $F_p= 270Hz$

A transferência do metal foi feita a cada pulso e não apresentou uma variação em comparação com os resultados com uma frequência de 210Hz. A Tabela 4.36 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais dos cordões de solda dos ensaios.

TABELA 4.36 Corrente e tensão dos ensaios com $V_A=10m/min$, $I_p=540A$, $t_p=1,85ms$, $U_B= 26V$, $F_p=270Hz$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	8,12	2,56	2,09	53,13	31,0	341,1	4874
2	8,45	2,69	2,14	52,32	30,9	343,8	4898
ME	8,3	2,6	2,2	52,7	31,0	342,5	4886

Para verificar o limite inferior do processo arco pulsado, a velocidade de alimentação do arame foi reduzida. Com as condições de um arco estável, o limite foi encontrado na velocidade de alimentação de 3m/min. As soldagens foram feitas com uma corrente de pulso de 450A, tempo de pulso de 2,9ms, frequência de 63Hz (provocar uma gota com diâmetro igual como o diâmetro do eletrodo) e uma tensão de base de 19V.

A análise do comprimento do arco com a frequência de 63Hz apresentou o valor de 3.9mm. O comprimento foi medido em 10 diferentes momentos da soldagem (Figura 4.117).

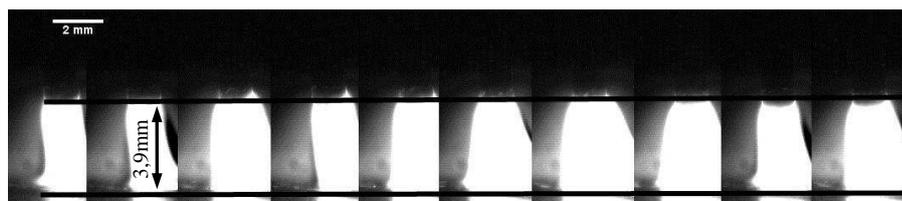


FIGURA 4.117 Medição do comprimento do arco (3.9mm) com a velocidade de alimentação do arame de 3m/min e $I_p=430A$, $t_p=2,9ms$, $U_B=19V$, $F_p=63Hz$

A Figura 4.118 apresenta os valores da tensão e da corrente dos ensaios. A corrente de base variou em uma faixa de 26A (23A-49A) e a corrente de pulso variou na faixa de 7A (422A – 429A).

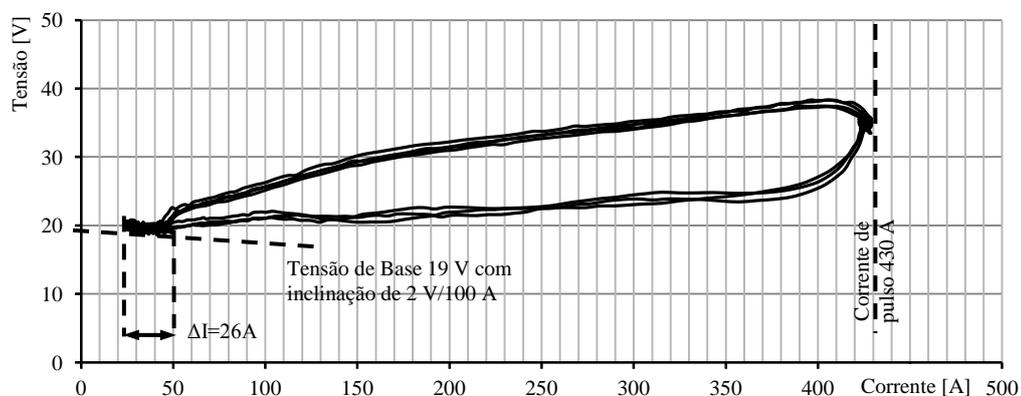


FIGURA 4.118 Diagrama U-I com velocidade de alimentação do arame de 3m/min.

A transferência do metal foi uniforme e cada pulso feita. A Tabela 4.37 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais dos cordões de solda dos ensaios.

TABELA 4.37 Corrente e tensão média dos ensaios com $V_A=3\text{m/min}$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	5,38	1,54	1,69	37,23	23,2	174,8	4046
2	6,10	1,41	1,50	43,94	23,4	174,3	4072
ME	5,7	1,5	1,6	40,6	23,3	174,6	4059

A seguir, a velocidade foi reduzida para 2m/min, com uma frequência de 54Hz, com a corrente de pulso de 350A, tempo de pulso de 3ms e tensão de base de 18V. A corrente de pulso foi reduzida para permitir uma tensão de base maior. A análise do comprimento do arco com a velocidade de alimentação de 2m/min apresentou o valor de 3.5mm (Figura 4.119).

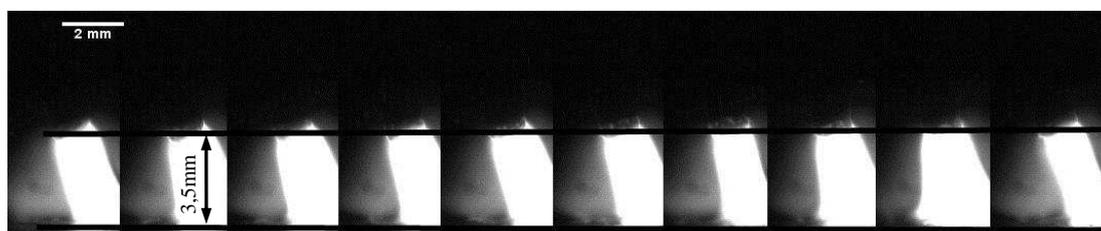


FIGURA 4.119 Medição do comprimento do arco (3.5mm) com a velocidade de alimentação do arame de 2m/min e $I_P=350\text{A}$, $t_p=2,8\text{ms}$, $U_B= 18\text{V}$, $F_p= 54\text{Hz}$

A Figura 4.120 apresenta os valores da tensão e da corrente dos ensaios. A corrente de base variou em uma faixa de 50A (25A-75A) e a corrente de pulso variou em uma faixa de 7A (332A – 340A).

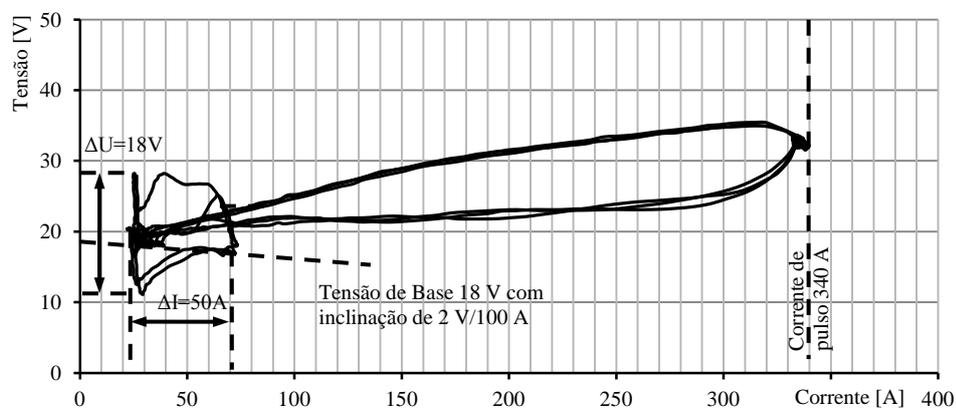


FIGURA 4.120 Diagrama U-I do ensaio com 2m/min (alimentação do arame)

A transferência do metal foi uniforme e cada pulso feita. A Tabela 4.38 apresenta os valores médios da corrente e tensão em combinação com a análise das seções transversais dos cordões de solda dos ensaios.

TABELA 4.38 Corrente e tensão média dos ensaios com $V_A=2\text{m/min}$

Ensaio	Largura [mm]	Penetração [mm]	Reforço [mm]	Diluição [%]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Aporte térmico [J/cm]
1	4,57	0,53	1,34	20,52	21,7	125,4	2720
2	4,85	0,61	1,28	24,22	21,4	126,9	2719
ME	4,7	0,6	1,3	22,4	21,6	126,2	2720

4.5.2 Discussão limite do processo

O limite superior do processo foi encontrado na velocidade de alimentação de 10m/min. Os parâmetros resultaram um tempo da fase de pulso completo de 3,2ms (subida, pulso e descida) e um tempo da fase de base de 3,1ms. O comprimento do arco se estabilizou no valor de 2,4mm.

A necessidade da alta tensão de base, para não provocar curtos-circuitos, resultou uma variação pequena da intensidade do arco entre as fases de base e pulso, o que foi observável pela iluminação do arco e a variação pequena entre tensão de base e tensão de pulso ($U_B=30\text{V}$ e $U_P=40\text{V}$). A diferença entre fase de pulso e fase de base não foi significativamente, isto limitou o processo. A Figura 4.121 mostra os arcos na fase de pulso e na fase de base com as intensidades parecidas.

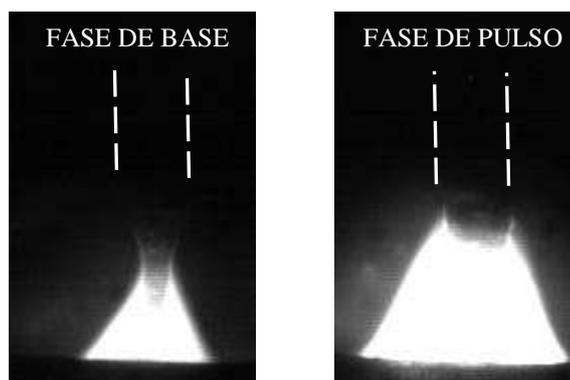


FIGURA 4.121 Arco na fase de pulso e na fase de base com intensidades parecidas

Pelo aumento da frequência de 160Hz para 210Hz, no teste seguinte, foi possível aumentar o comprimento do arco, de 2,4mm para 3mm, portanto, foi possível reduzir a tensão de base de 34V para 30V. O efeito do aumento do comprimento do arco foi apoiado pelo aumento da corrente de pulso de 430A para 470A.

Para não provocar a formação de gotas adicionais, o tempo de pulso foi reduzido para 2,5ms. A variação dos parâmetros resultou no aumento da diferença entre tensão de base e tensão de pulso para 15V ($U_B=25V$ e $U_P=40V$). A Figura 4.122 mostra os arcos na fase de pulso e na fase de base com diferentes intensidades dos arcos. O tempo de pulso inteiro foi 2,8ms com o tempo de base de 1,9ms.

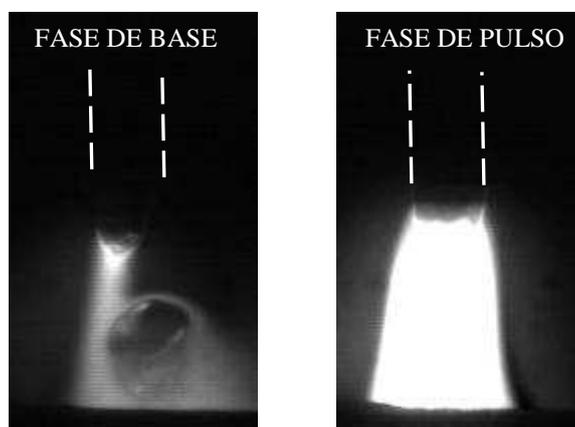


FIGURA 4.122 Arco na fase de pulso e na fase de base com intensidades diferentes

A seguir, a frequência foi aumentada de 210Hz para 270Hz, com o aumento da corrente de pulso para 540A, com a redução da tensão de base para 26V e redução do tempo de pulso para 1,85ms. O aumento da frequência reduziu o tempo de base para 1,4ms. A transferência do metal foi uniforme, mas o tempo de base foi insuficiente para transferir a gota até o início do pulso seguinte da corrente. A Figura 4.123 mostra as fases da transferência do metal com a) arco na fase da subida da corrente b) final da corrente de pulso com estrangulamento da gota

c) final da descida da corrente e d) subida da corrente do seguinte pulso, com a gota entrando na poça de fusão.

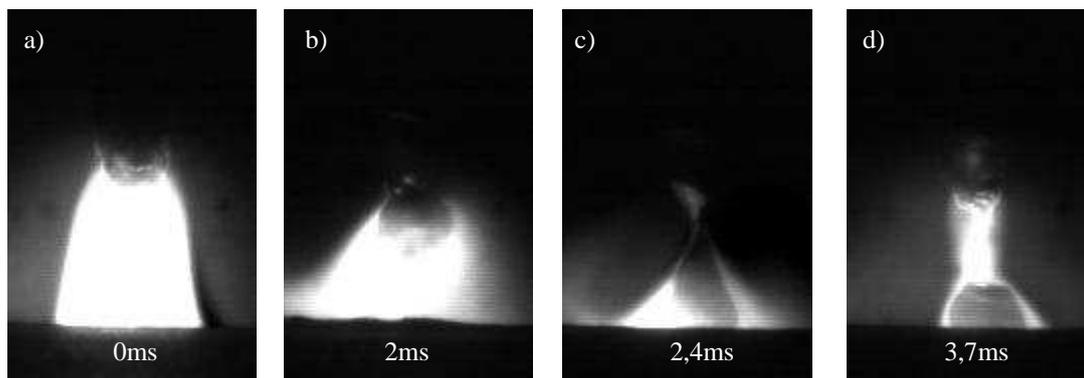


FIGURA 4.123 Transferência do metal com a frequência 270Hz

A Figura 4.124 apresenta a relação entre fase de pulso e fase da base com a variação da frequência. Com o aumento da frequência, o tempo do período foi reduzido. Pela variação da corrente e tempo de pulso, o tempo da fase de pulso foi reduzido. Apesar da redução da fase de pulso, a fase de base foi reduzida (metade do valor) e foi insuficiente para transferir a gota, portanto, limitou o processo.

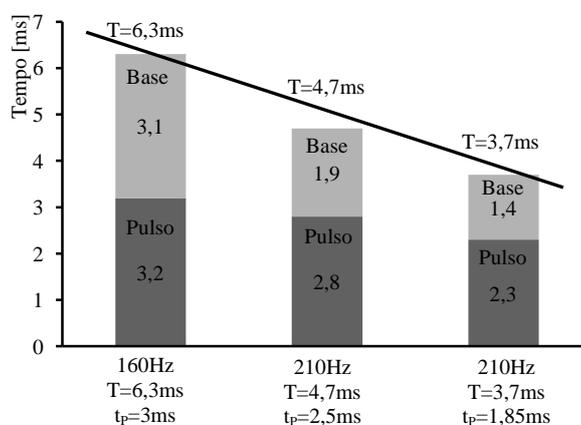


FIGURA 4.124 Relação entre fase de pulso e fase de base

O limite inferior do processo foi encontrado na velocidade de alimentação de 3m/min com a frequência da 63Hz. Nesta combinação entre velocidade de alimentação e frequência do pulso o diâmetro da gota foi igual como o diâmetro do arame. Neste valor da frequência, o período foi de 16ms, com o tempo de base de 12ms e tempo de pulso de 4ms.

O tempo de base foi 3 vezes maior do que o tempo de pulso. A Figura 4.125 mostra a tensão e corrente do processo.

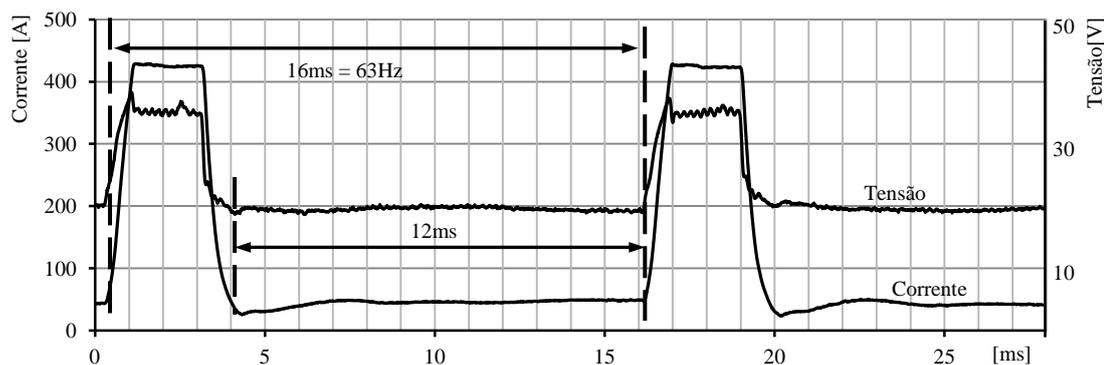


FIGURA 4.125 Corrente e tensão do ensaio com uma velocidade de 3m/min e 63Hz.

A redução da velocidade de alimentação de 3m/min para 2m/min provocou uma redução na penetração e na diluição (Figura 4.126).

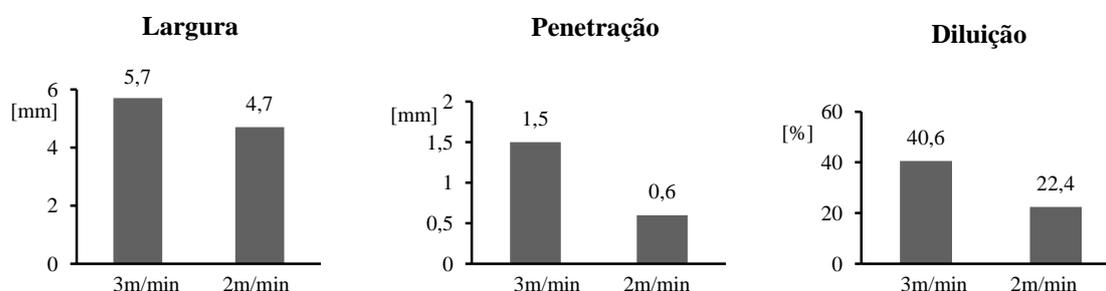


FIGURA 4.126 Comparação das características geométricas dos ensaios com 3 e 2m/min

O diagrama U-I (Figura 4.120) apresentou na fase de base uma variação da tensão de base de 18V. Esta variação apresentou a tensão do arco na fase de base chegou ao um valor mínimo. Para manter o arco ligado com a corrente mínima, a tensão precisou ser alterada.

Resumindo, o processo foi limitado superiormente pela alta tensão de base e pela frequência de pulsação. A diferença entre tensão de pulso e tensão de base foi pequena, o comprimento do arco não variou significativamente entre as fases. A frequência do processo aumentou com a velocidade da alimentação do arame e resultou a redução do tempo de base até foi impossível transferir a gota na poça de fusão na fase de base.

O processo foi limitado inferiormente pela baixa tensão de base (instabilidade do arco) e baixa penetração. A redução da velocidade da alimentação do arame aumentou o tempo de base significativamente com baixa tensão até que a tensão foi insuficiente para manter o comprimento do arco constante. A baixa tensão provocou uma variação do corrente de base, o que indicou a instabilidade do processo. A penetração reduziu significativamente e foi insuficiente.

5 CONCLUSÃO

O estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW - Arco pulsado resultou nas seguintes conclusões.

A polaridade do processo é um parâmetro fundamental para o processo MIG/MAG no modo arco pulsado. Para o acontecimento de um estrangulamento da gota e uma transferência do metal para a poça de fusão controlada, o eletrodo (metal de adição, arame consumível) precisa estar conectado ao pólo positivo da máquina. Nesta polaridade, a corrente de pulso resulta em uma força de Lorentz suficiente para estrangular a gota. Caso contrário, com o pólo negativo no eletrodo, a forma do arco não possibilitou a atuação da força de Lorentz de forma suficiente. A transferência do metal não aconteceu de forma controlada. A força fundamental para a transferência do metal foi a força gravitacional.

A modulação I_p-U_B , com característica de corrente constante na fase de pulso e de tensão constante na fase de base, apresentou a propriedade de auto-correção do arco suficiente. A modulação apresentou na fase de pulso a vantagem das condições controladas para o estrangulamento da gota e possibilidade da manipulação controlada dos parâmetros principais. A limitação da corrente mínima na fase de base evitou a extinção do arco. O crescimento do comprimento do arco até o bico de contato, provocado pela variação das condições de soldagem, não foi observado.

Através do modo da modulação, a tensão de base foi identificada como o parâmetro principal na fase de base. Com a sua alteração foi possível controlar o comprimento do arco. Com esta propriedade, a tensão de base foi um parâmetro muito influente no processo de soldagem, mas não influenciou a formação e a transferência do metal. Pela variação da tensão de base, as características geométricas não foram influenciadas.

A variação do tempo da descida da corrente não influenciou no comprimento do arco. A análise das imagens da câmera de alta velocidade apresentou a fase da descida da corrente do nível de pulso para o nível da base é a fase do processo onde ocorre idealmente a separação da gota de metal fundido do eletrodo e a transferência para a poça de fusão. Uma influência na velocidade da transferência da gota não foi detectada. Pela redução do tempo da descida da

corrente foi possível reduzir a tensão média, a corrente média e o aporte térmico do processo. As características geométricas não foram influenciadas.

A corrente de pulso influenciou o comprimento do arco e a transferência do metal. O valor da corrente de pulso para resultar uma transferência do metal uniforme foi dependente do tempo de pulso, frequência de pulsação e a distância entre bico de contato e peça de trabalho. Com frequência de pulsação, tempo de pulso e distância entre bico de contato e peça de trabalho constante, o aumento da corrente resultou no aumento do comprimento do arco e a formação de gotas adicionais. Pela redução da tensão de base, para resultar comprimentos dos arcos parecidos nos ensaios, foi provado, que a gota adicional não foi provocada pelo aumento do volume do material fundido do eletrodo. A gota adicional foi provocada pelo aumento da temperatura no processo. A força da tensão superficial não foi suficiente para segurar o volume do material fundido na uma única gota. A gota foi dividida em uma gota principal com maior volume e uma ou varias gotas adicionais. Com o aumento da distância entre bico de contato e peça de trabalho a corrente de pulso necessário para resultar uma única gota se reduziu. Isto foi devido ao pré-aquecimento do material do eletrodo pelo efeito Joule.

O tempo de pulso atuou junto com a corrente de pulso. O aumento do tempo de pulso reduziu a corrente de pulso necessária para resultar uma transferência do metal uniforme e vice-versa. O aumento superior do valor ideal provocou a formação de várias gotas na transferência do metal.

A frequência de pulsação foi diretamente ligada com a velocidade de alimentação do arame, diâmetro do eletrodo e com o volume da gota formada.

Pela variação da frequência, com mesma velocidade de alimentação do arame foi possível formar gotas com diferentes volumes. Através do volume, a corrente e tempo de pulso foram influenciadas. Para formar menores gotas, menores correntes e tempos de pulso foram necessários. O aporte térmico não foi influenciado pela frequência de pulsação. Com a redução da corrente e tempo do pulso foi possível compensar o aumento da frequência de pulsação. As características geométricas não foram influenciadas.

A aplicação do processo MIG/ MAG com transferência do metal no modo arco pulsado teve o seu limite superior determinado (velocidade de alimentação parecida como no modo globular ou spray) pela alta tensão na fase de base, que provocou uma intensidade dos arcos parecidos,

na fase de base e fase de pulso. Como a velocidade de alimentação do arame foi diretamente ligada com a frequência de pulsação, o aumento da velocidade de alimentação resultou no aumento da frequência de pulsação. Com um tempo de pulso quase constante o tempo de base se reduziu até foi impossível transferir a gota na poça de fusão até final de fase de base. O seguinte pulso iniciou em cima da gota.

O processo teve o seu limite inferior determinado pela baixa tensão para manter o arco ligado na fase de base. A redução da velocidade de alimentação do arame (nível do modo de transferência por curto-circuito) aumentou o tempo de base e provocou a instabilidade do processo. A penetração reduziu significativamente (diluição 20%) e foi insuficiente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas pesquisas realizadas e nos resultados deste trabalho, alguns aspectos indicam oportunidades para desenvolvimento de novos trabalhos como segue:

- Investigar a influência do volume das gotas e a frequência de pulsação na transferência do metal na posição de soldagem sobre-cabeça ou horizontal;
- Desenvolver estudos de aplicação do processo corrente pulsada em diversas posições de soldagem para viabilizar a soldagem orbital de dutos em operação;
- Avaliar a influência da frequência de pulsação, portanto, o volume das gotas, na preparação do chanfro;
- Analisar a influência dos parâmetros na transferência do metal, na soldagem de materiais com menor ponto de fusão, como alumínio ou no processo de brasagem com os materiais de adição das ligas à base CuSi e CuAl;
- Desenvolver um sistema eficaz de controle do comprimento do arco baseado na regulagem da tensão de base do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Behnisch, H., Aichele, G.: Die Schweißtechnik im Wandel der Zeiten- Vom Schmiedefeuer zum Laserstrahl, DVS Media (2006), ISBN-13: 978-3871557941
- [2] Moos, W.; Janßen-Timmen, R.: Gesamtwirtschaftlich und sektorale Wertschöpfung aus der Produktion und Anwendung von Fügetechnik, Hochschule Niederrhein, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften und Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsförderung, Essen, (2003)
- [3] Matthes, K.-J.: Vorträge des 5. Chemnitzer Symposium Fügetechnik/ Schweißtechnik, TU Chemnitz, 2002
- [4] Fritz, H.; Schulze, G. : Buch Fertigungstechnik, Kapitel Bedeutung der Schweißtechnik S.115, ISBN- 978-3-642-12878-3, 9. Auflage (2010)
- [5] Holliday, D.B.: Gas-Metal Arc Welding, ASM Handbook, Volume 6, Welding, Brazing and Soldering
- [6] Scheller, W.: Lichtbogenschweißen im Wandel der Zeit, DVS -Aktuell, Lichtbogenschweißen, Forschung, Technik, Bildung (2008)
- [7] Matthes, K.-J.; Richter, E.: Schweißtechnik, 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003, ISBN 3-446-22046-1
- [8] Brat, I.: Where Have all The Welders Gone, As Manufacturing and Repair Boom?, Wall Street Journal, Tuesday August 15th, 2006 Volume CCXLVIII 38
- [9] Guimarães, L.: Falta de soldados faz empresa de Ipojuca buscar dekasseguis no Japão, <http://g1.globo.com/economia/noticia/2011/01/falta-de-soldadores-faz-empresa-de-ipojuca-buscar-dekasseguis-no-japao.html>
- [10] Anuário da Indústria Automobilística Brasileira - 2010 Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA)
- [11] Kesse, S.: The Brazilian automotive industry at crossroads, Estudo sobre Indústria Automobilística Brasileira, Roland Berger Strategy Consultants, 2010
- [12] Dutra, J. C.; Ollé, L. F.; Gohr Junior, R.: As Fontes de Soldagem do Ano 2000 já Fabricadas no Brasil. In: XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem - ENTS, 1994, Contagem - MG. XX ENTS. São Paulo - SP. : Associação Brasileira de Soldagem, 1994. v. I. p. 509-530.
- [13] Pickin, C. G. ;Young, K.: Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy, Science and Technology of Welding and Joining 2006 VOL 11 NO 5 583 – 585
- [14] Goecke, S.: Energiereduzierte Lichtbogenverfahren für wärmeempfindliche Werkstoffe, DVS-Berichte Bd. 237, DVS-Verlag Düsseldorf, 2005
- [15] DeRuntz, B.: Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry, Journal of Industrial Technology Volume 19, Number 4 - August 2003 to October 2003
- [16] Budig, B.: "ForceArc" - ein kraftvolles Werkzeug zum MIG-/MAG-Schweißen, Jahrbuch Schweißtechnik 2006, DVS-Verlag Düsseldorf 2005, p66-71
- [17] The Merkle DeepARC- Process, Informação da empresa Merkle, Koetz/ Alemanha, <http://www.merkle.de/technologie/deeparc.php>
- [18] Norrish, J.: Process Control and Automation Developments in Welding, Proceedings of the 8th International ASM Conference, 2008
- [19] Matthes, K.J.; Seliga: Studie Gerätetechnischer Forschungsbedarf in der Fügetechnik aus Sicht mittelständlicher Anlagenhersteller oder Systemanbieter, Institut für Fertigungstechnik/ Schweißtechnik, Technische Universität Chemnitz, 2003

- [20] Norrish, J.: A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding, Study group 212 International Institute of welding, Doc. XII-1769-03
- [21] Amin, M.: Microcomputer control of synergic pulsed MIG welding Metal Construction, (1986), pp. 216-221
- [22] Conn, W.M.: Die technische Physik der Lichtbogenschweissung einschließlich der Schweißmittel, Springer-Verlag, München 1959
- [23] Bracarense, A.; Marques, P. V. ; Modenesi, P.J.: Soldagem – Fundamentos e tecnologia. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- [24] Guile, A.: Electric arcs - Their electrode processes and engineering applications , EIEE Proceedings, Part A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews (ISSN 0143-702X), vol. 131, pt. A, no. 7, Sept. 1984, p. 450-480.
- [25] Schellhase, M.: Der Lichtbogen – ein technologisches Werkzeug, DVS – Verlag, Düsseldorf, 1985
- [26] Killing, R.; Sönnichsen, H.; Glowicki, G.: Beitrag zur Klassifizierung des Werkstoffüberganges beim Metallschutzgasschweißen, Schweißen und Schneiden, Band 36, Nr. 12, Seiten 575-578, 1984
- [27] Smårs, E.A.; Acinger, K.: Material Transport and temperature distribution in arc melting aluminium electrodes, IIW-Document 212-168-68, 1968, International Institut of Welding, Study Group SG212, Physics of Welding
- [28] DIN EN 14610:2005-02: Welding and allied processes - Definitions of metal welding processes
- [29] Holliday, D.B.: ASM Handbook Vol. 6 (1993), Welding, Brazing and Soldering: Gas-Metal Arc Welding, P560-p572, - ISBN 0-87170-382-3
- [30] Matthes, K.-J.; Richter, E.: Schweißtechnik. 2. Auflage Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003. – ISBN 3-446 22046-1
- [31] Pomaska, H.-U. : MAG-Schweißen, kein Buch mit sieben Siegeln, München, Verlag und Druckerei G.J. Manz AG, 1980
- [32] Farson, D.; Conrardy, C.; Talkington, J.; Baker, K.; Kerschbaumer, T.; Edwards, P.: Arc Ignition in Gas Metal Arc Welding, Welding Journal 77 no.8, p315-321, August 1998
- [33] Dilthey, U.; Eichhorn, F.; Groten, G.; Matzner, H.: Low-spatter ignition of the MIG-welding arc, IIW/IIS Doc. XII-1181-90 (1990)
- [34] Melton, G.B.: Factors Affecting MIG Arc Initiation in Mechanised Systems, The Welding Institute Research Bulletin, December 1986
- [35] Norman, E.W.L.: The MIG Spot Welding of Aluminium Alloy Sheets – Process Operation and Control, The Welding Institute Research Bulletin, Nov 1980
- [36] Soderstrom, E.J., Mendez P. F.: Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO₂ Shielding Gas Mixtures, Welding Journal, MAY 2008, VOL. 87, p.124-p.133
- [37] Suban, M.: Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, Journal of Materials Processing Technology, Volume 119, Issues 1-3, 20 December 2001, Pages 185-192
- [38] Hilton, D.E.; Norrish, J.: Shielding Gases for Arc Welding, Welding & Metal Fabrication, p.189-196, may/june, 1988.
- [39] Dillenbeck, V.R.; Castagno, L.: The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel, Welding Journal, set. 1987, pp 45 - 49.

- [40] Boehme, D. : Schutzgase – Physikalische Eigenschaften als Grundlage fuer die Entwicklung und den optimalen Einsaty Von gasen und Gasgemischen in der Schweisstechnik. In: Schweisstechnische Fertigungsverfahren: Strahltechnik – Lichtbogenschweisstechnik, Duesseldorf, Verlag fuer Schweissen und verwandte Verfahren (DVS-Verlag), 1989 (DVS-Verichte 127), S.70 – 90
- [41] DIN EN 439, Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH
- [42] Rendimento máximo através da inovação e competência. Os gases de soldadura Linde, <http://www.linde-gas.com>
- [43] Suban, M.; Tusek, J. Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. *Materials Processing Technology*. n. 119, p. 185 –192. 2001.
- [44] Ludwig, H. C.: Plasma energy transfer in gas shielded welding arcs. *Welding Journal* 38 (1959) 7, S. 296s-300s.
- [45] Choosing Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal* v. 87 no. 5 (May 2008) p. 32-5
- [46] Dillenbeck, V. R., Castagno, L. , “The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel”, *Welding Journal*, pp.45- 49, sep. , 1987.
- [47] Lyttle, K. A. , STAPON, W. F. G. , “Select the Best Shielding Gas Blend for the Applcation”, *Welding Journal*, pp.21-27, nov. , 1990.
- [48] NIXON, J.H.& NORRISH, J.: Determination of pulsed MIG process parameters. *Synergic MIG Supplement, Welding & Metal Fabrication*, 1992.
- [49] Lancaster, J.F. *The Physics of Welding*, Pergamon Press & International Institute of Welding, (1986)
- [50] Killing, R.: *Handbuch der Schweißtechnik – Teil1: Lichtbogenschweißverfahren*, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 76, DVS Verlag, Düsseldorf 1984
- [51] Allum, C.J.: Metal transfer in arc welding as a varicose instability: I. Varicose instabilities in a current-carrying liquid cylinder with surface charge *J. Phys. D: Appl. Phys.* 18 1985 1447–68
- [52] Allum, C. J.: Metal transfer in arc welding as a varicose instability: II. Development of model for arc welding *J. Phys. D: Appl. Phys.* 18 1985 1431–46
- [53] Waszink, J.H., Graat, L.H.J. : Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal. *Welding Research Supplement*, Abril 1983, p. 108s-116s
- [54] Moreira, A.R. : Líquidos - Mudanças de estado e propriedades coligativas. Salvador. UNIFACS, 20/07/1999 Relatório
- [55] Kim, Y.S.; Eagar, T.W.: Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, 72(7), July, p. 279s-287s, 1993.
- [56] Ruckdeschel, W.: Schutzgasschweißen – Der Werkstoffübergang beim MIG-MAG Schweißen, DVS- Berichte Band 18, 1970, p. 15-27
- [57] Amson, J. C.: Lorentz force in the molten tip of an arc electrode *Br. J. Appl. Phys.* 16 1965 1169–79
- [58] Modenesi, P.: *Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais*, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007
- [59] Smith, A.: *CO2 Welding of Steel*. Cambridge, U.K.: The Welding Institute, 1966, 21-25.
- [60] Lesnewich, A.: Control of melting rate and metal transfer in gas shielded metal arc welding: Part 1 *Welding J.* 37, 1958, 343–353, Part 2 *Welding J.* 37 418–25s
- [61] Anon: “Classification of Metal Transfer.” IIW Doc. XII-636-76. 1976.

- [62] International Institute of Welding, IIW: Classification of metal transfer, document; XII-636-76 (1976)
- [63] Norrish, J.: Process Control and Automation Developments in Welding, Proceedings of the 8th International Conference, 2009
- [64] Lucas, W.; Iordachescu, D.; Ponomarev ,V.: Classification of Metal Transfer Modes in GMAW, IIW Doc. No XII-1859-05, Prague, 2005.
- [65] Hermans, M.J.M.; Den Ouden, G.: Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding, Welding Journal v. 78 no4 137s-141s Ap '99
- [66] Baum, L.; Fichter, V. : Der Schutzgasschweisser, Teil 2, MIG/ MAG Schweißen, Die schweißtechnische Praxis, Band12 (1999), DVS- Verlag
- [67] Koch, R.; Welz, W. : MAG Impulslichtbogenschweißen, Schweißen und Schneiden 38 (1996) Heft 2, 67-71
- [68] Jeffus, L. F.: Welding: Principles and Applications, Edition: 5, Cengage Learning, 2002 ISBN 1401810462, p218 –225
- [69] Castner, H. R.: Gas metal arc welding fume generation using pulsed current. Welding Journal, 74(2), (1995), p59-p68.
- [70] Schreibner, P.: Ergebnisse aus Untersuchungen zur Spritzerbildung beim MAG Schweißen, Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR, Halle (Saale), 1980
- [71] Manz, A.F.: Ways to limit spatter, Reducing spatter will help you increase productivity, reduce expenses, and stay safer. Welding Journal 89 no9 S 2010 p. 86-7, American Welding Society 2010
- [72] Ersoy, H.; Kannatey-Asibu: Observation of Arc Start Instability and Spatter Generation in GMAW, Weld J 87 no2 F 2008
- [73] Kang, M.J.; Na: A Mechanism of Spatter Production from the Viewpoint of the Integral of Specific Current Action, Welding Journal 84(12): 188-s to 196-s.
- [74] Kang, R.: The Statistical Models for Estimating the Amount of Spatter in the Short Circuit Transfer Mode of GMAW, Welding Journal, January 2001
- [75] Needham, J.C.; Carter, A.W.: Metal Transfer Characteristics with Pulsed Current, British Welding Journal 12 1965 (5): pp229-241
- [76] Norrish, J.: A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding, Study group 212 International Institute of welding, Doc. XII-1769-03
- [77] Anderson, P.; Carter, G.: Pulsed MIG - a closer look at productivity, spatter and fume, TWI Bulletin, September/October 1996
- [78] Amin, M.; Watkins, P.V.C.: Synergic pulse MIG welding, Welding Institut Research Report 46/ 1977/ P, August 1977
- [79] Kröger, S.; Killing, R. : Moderne Software zur Erstellung und Verwaltung von PC-gestützten Schweißparametern und Schweißprogrammen für MIG/MAG-Stromquellen EWM 2003 doc WM025000.doc
- [80] Puschner, P. : Konventionelle und elektronische Schweißenergiequellen Bauarten, statische und dynamische Eigenschaften und Wirkungsweise, DVS – Berichte, Band 105 (1986), p.193-195
- [81] Norrish, J. : MIG- Welding power sources, Welding & Fabrication, March 1992, p.63-68
- [82] Norrish, J. : Arc welding power sources, Design evaluation and welding characteristics, IIW-Doc. XXII- 12 15-91

- [83] Samokovliski, D. A.: Development of a planetary wire feeder for MIG/MAG welding, Metal Construction 14 (1982) no 6, p. 337-339
- [84] Johnsen, M.; Cullison, A.; Woodward, H.M.: What's up with wire feeders? Welding Journal 85, n4 Ap 2006
- [85] Prospecto, PowerPull Hand held welding torch, TBi Industries GmbH, DOKP114012, 10/2006
- [86] Schnabl, L.: Wassergekühlte Sonderbrenner zum Metall-Aktivgasschweißen, Der Praktiker 5/97, p. 196-197
- [87] Prospecto, Tocha refrigerada com água Top2000 5W, TBi Industries GmbH, DOKP112152, 11/2008
- [88] Ywickert, H.: Untersuchungen der Kontaktverhältnisse bei der Stromübertragung auf den Schweißzusatz, Wiss.Z. TU Magdeburg 31 (1987) 4, S.92- 102
- [89] Ghosh,P.K.; Dorn, L.; S.-F. Goecke: Universality of Correlations among Pulse Parameters for Different MIG Welding Power Sources, Int. Journal for the Joining of Materials 13 (2) 2001, PP 40/47.
- [90] DVS Merkblatt 0933: MIG Schweißen von Aluminum-Werkstoffen, Schweißparameter,Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 09/2001
- [91] Gonzalez, R.C.; Woods, R.E.: Digital Image Processing, Addison Wesley Publishing, 2002
- [92] Allemann, R.; Schoeder, R.; Ries, D.; Eagar, T.W.: A Method of Filming Metal Transfer in Welding Arc, Welding Journal, 1985, Vol1 pp 45- 47
- [93] Gramatke, C.: CMOS Bildsensoren – Eine Technologie im Aufbruch, Vision 2001, Industrial Vision Days, Stuttgart 2001
- [94] Fischer, A.; Rauscher, T.; Schuler, V.: Digital high-speed imaging of welding processes with synchronised recording of the process parameters, Welding and Cutting 6 (2007) [2] 78-80
- [95] Ogawa, Y.: High speed imaging technique Part 1 – high speed imaging of arc welding phenomena, Science and Technology of Welding and Joining 2011, VOL 16 NO 1
- [96] Vilarinho, L. O.: Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio. 2000. 111f. Dissertação de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia – MG, 2000.
- [97] Matthes, K.; Kusch, M.: Einfluss der Modulation der Stromquelle auf das Schweißergebnis, Der Praktiker, 10/ 2000, DVS Verlag