

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DE
PARÂMETROS ÓTIMOS EM SOLDAGEM GMAW PULSADO**

JAIRO JOSÉ MUÑOZ CHÁVEZ

ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM – 76A/14

BRASÍLIA, DF: SETEMBRO – 2014

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DE
PARÂMETROS ÓTIMOS EM SOLDAGEM GMAW PULSADO**

JAIRO JOSÉ MUÑOZ CHÁVEZ

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
SISTEMAS MECATRÔNICOS**

APROVADA POR:

Prof. Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, Orientador, PhD, ENM/UnB

**Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero, Examinador Interno, Dr,
ENM/UnB**

Prof. José Alfredo Ruiz Vargas, Examinador Externo, Dr., ENE/UnB

**Pesquisador José Enrique Vargas Aures, Examinador Externo, Dr.
ENM/UnB**

BRASÍLIA, DF: SETEMBRO – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1017951.

Muñoz Chávez, Jairo José.

M967m Uma metodologia para obtenção e validação de parâmetros ótimos em soldagem GMAW pulsado / Jairo José Muñoz Chávez . - - 2014. xix, 179 f. : i l.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia.

Orientação: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.

1. Soldagem. 2. Metais. 3. Fourier, Análise de. 4. Análise de imagens.
- I. Alfaro, Sadek Crisóstomo Absi.
- I I. Título.

CDU 621. 791

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CHÁVEZ, J. J. M. (2014). Uma metodologia para obtenção e validação de parâmetros ótimos em soldagem GMAW Pulsado. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jairo José Muñoz Chávez

TÍTULO: Uma metodologia para obtenção e validação de parâmetros ótimos em soldagem GMAW Pulsado

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Jairo José Muñoz Chávez

Dedico este trabalho a Deus, por ter iluminado o meu caminho ao longo de todos esses anos, e aos meus pais e às minhas irmãs, pelo carinho e incentivo ao meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela proteção e pelas bênçãos recebidas, pois sem Ele, nada seria possível. Ele me deu fôlego de vida, forças para estudar, saúde, conforto, entendimento e muito mais do que eu merecia. A Ele seja dada toda glória e honra.

Aos meus pais e às minhas irmãs, meu agradecimento especial, pelo infinito apoio e incentivo em todos os aspectos da minha vida.

Ao meu orientador, professor Sadek Crisóstomo, pela amizade, orientação, apoio e confiança na realização deste trabalho e por possibilitar a minha participação em um congresso nacional e futuras participações.

Ao professor Guilherme Carvalho, pela sua orientação ao meu trabalho.

Ao professor Carlos Llanos, pela atenção dispensada a mim na chegada ao mestrado.

A todos os meus professores da pós-graduação da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (FT-UnB), pelos quais tenho muito respeito e muita gratidão pelos ensinamentos acadêmicos.

À Sílvia Almeida, por ter possibilitado a tradução deste documento para o português.

Ao Brasil e à Universidade de Brasília, pela oportunidade de realizar este curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos Willian Arbei Molano, William Humberto Cuellar e Oscar Eduardo Anacona pelo apoio e amizade. Aos meus e às minhas colegas, amigos e amigas Milton Conde, Margarita Moncayo, Andres Girón, Jesús Emilio, Lisy Hurtado, Manuel Urbano, Laura Ordieréz, Eber, Leila Vicença, Matheus Tabata, e, especialmente, ao Marrocos, pela ajuda e pelas dicas no laboratório de solda.

RESUMO

UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS ÓTIMOS EM SOLDAGEM GMAW PULSADO

Autor: Jairo José Muñoz Chávez.

Orientador: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, setembro de 2014.

Nos processos de soldagem é importante o estudo das variações dos parâmetros de saída, como, por exemplo, as variações na geometria do cordão de solda. Portanto, conhecer os parâmetros de entrada e sua relação com os de saída permite determinar o comportamento dos processos de soldagem e controlar as variáveis de saída para obter boas características na solda. Este trabalho apresenta uma metodologia para a busca de parâmetros de entrada no processo GMAW Pulsado que ajude a conseguir boas características geométricas da solda, eliminando os respingos, minimizando a instabilidade durante o processo de soldagem e diminuindo a quantidade de testes durante a procura das variáveis até obter uma geometria adequada do cordão e das camadas. Foi escolhido o método GMAW Pulsado por apresentar transferência metálica estável, pouco consumo de energia, baixo aporte calórico e sua facilidade para controlar os parâmetros de entrada como, por exemplo, as diferentes variações no fornecimento de corrente e frequência por ciclo, variando ao mesmo tempo a energia. Para ajudar na busca dos parâmetros, foram utilizados critérios de transferência metálica, estabilidade e energia, apoiados por análises estatísticas, técnicas de avaliação, como a análise de sinais com Transformada Rápida de Fourier e análises de imagens por perfilografia. A metodologia proposta faz uso de um modelo experimental onde se estuda a maioria das grandezas que interferem no processo de soldagem, mas tendo como foco os principais parâmetros de entrada e saída, como corrente média, tensão, velocidade de arame, reforço, largura e penetração. Os critérios de transferência metálica e estabilidade são usados no processo GMAW Convencional e junto com o mapeamento dos modos de transferência se determinam valores adequados no processo GMAW Pulsado. Com o critério de Burnoff, se determinam zonas paramétricas para a corrente de pico, corrente de base e o tempo do pulso ou ciclo. A análise de sinais de Fourier foi feita para reconhecer pequenas falhas na estabilidade do processo. A identificação dos parâmetros de saída, como quantidade de gotas por pulso, destacamento da gota e tipo de transferência metálica, são estudadas com a técnica perfilografia e por observação direta na solda. Também foram realizados cálculos de superposição dos cordões, determinando a melhor geometria, as diferentes formas de gerar uma camada e o estudo de preenchimento para um buraco retangular. Os estudos demonstraram que o uso desta metodologia permitiu a obtenção de bons resultados, com valores que cumprem os objetivos propostos de conseguir uma boa geometria do cordão e das camadas, com uma alta estabilidade no processo de soldagem e com soldas de alta qualidade, diminuindo a energia no processo.

Palavras-chave: GMAW Pulsado, Transferência goticular, Critérios de transferência metálica e estabilidade, Transformada Rápida de Fourier, Perfilografia.

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR OBTAINING AND VALIDATION OF OPTIMAL PARAMETERS IN PULSED GMAW WELDING

Author: Jairo José Muñoz Chávez.

Supervisor: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, setembro de 2014.

In welding processes it is important to study the variations of the output parameter, as, in example, variations in the weld bead geometry. Thus, knowing the input parameters and their relation with the output parameters allows to determinate the welding processes behavior and control the output variables, in order to obtain better welding characteristics. This work aims to present a methodology for searching input parameters for the Pulsed GMAW process that help to find better geometrical characteristics on the weld, eliminate splashes, and minimize instability during the welding process, thus reducing the quantity of tests during the search of the variables until is obtained an adequate geometry for the welding bead and its layers. Pulsed GMAW method was chosen due to its stable metallic transference level, its low energy consumption, its low caloric intake, and its easiness to control input parameters, such as different variations in the current supply and cycle frequency, varying energy at the same time. To help the search for parameters metallic transference, stability and energy criteria were used, bolstered by statistical analyses and evaluation techniques such as analysis of signals whit Fast Fourier Transform and analyses of images by shadowgraphy.

The proposed methodology uses an experimental model in which most of the magnitudes that interfere in the welding process are studied; but taking focus on the main input and output parameters, such as average current, voltage, wire speed, reinforcement, width and penetration. Metallic transference and stability criteria are used in Conventional GMAW process, and along with transfer modes mapping, adequate values are determined for Pulsed GMAW. With Burnoff's criteria, parametric zones for peak currents, base currents and time of pulse or cycle are determined. Fourier analysis was performed to recognize small process' stability failures. Output parameters identification, such as drops per pulsation quantity, drop's posting and metallic transfer type, are studied through shadowgraphy and by direct observation in welds.

Beads superposition calculation were also performed in order to determinate their best geometry, the different forms to generate layers; and a study for the filling of a rectangular hole. These studies demonstrated that using this methodology are obtained good results, with values that accomplish the proposed goals of attaining good bead and layers geometry with high quality welds and decreasing the amount of energy used in the process.

Key words: Pulsed GMAW, Spray Transfer, Metallic Transfer and Stability Criteria, Fast Fourier Transform, Shadowgraphy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1. JUSTIFICATIVA	25
1.2. OBJETIVOS	27
1.2.1. Objetivo geral	27
1.2.2. Objetivos específicos	27
1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1. PROCESSO MIG/MAG (GMAW).....	29
2.1.1. Transferência metálica no processo GMAW	31
2.1.2. Soldagem MIG/MAG com arames de aços inoxidáveis	43
2.2. MAPAS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	46
2.3. FATORES QUE DETERMINAM O MODO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA	46
2.3.1. Corrente de transição.....	48
2.4. MÉTODOS PARA ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	49
2.4.1. Análise de oscilogramas	51
2.4.2. Perfilografia	51
2.5. PARÂMETROS DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR ARCO PULSADO.....	56
2.5.1. Determinação dos parâmetros da transferência por arco pulsado	59
2.6. ESTABILIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	64
2.7. ANÁLISE DE SINAIS COM A TRANSFORMADA DE FOURIER.....	65
3. METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	66
3.1. METODOLOGIA.....	66
3.2. FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES.....	68
3.3. MATERIAIS, EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL	73
3.3.1. Corpos de prova e consumíveis.....	73
3.3.2. Fonte de soldagem	74
3.3.3. Sistema de aquisição de dados	74
3.3.4. Montagem para a captura de imagem por perfilografia	75
3.4. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS INICIAIS NO PROCESSO GMAW PULSADO.....	76
3.4.1. Processos de soldagem	76
3.4.2. Forma do pulso.....	79
3.5. CRITÉRIOS PARA DETERMINAR PARÂMETROS NO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA GMAW PULSADO	79
3.5.1. Determinação da zona da corrente de transição (transferência entre globular e goticular)	80

3.5.2. Critério de Burnoff	82
3.5.3. Critério de transferência de metal	84
3.5.4. Critério de energia efetiva e energia de fusão	87
3.5.5. Critério de estabilidade do arco	90
3.5.6. Determinação de parâmetros de Destacamento (kV)	91
3.5.7. Determinação de corrente de pico, tempo de pico e frequência	91
4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	92
4.1. ANÁLISE DE SINAIS DA TRANSFERÊNCIA GMAW CONVENCIONAL	92
4.1.1. Análise de estabilidade e identificação do modo de transferência metálica mediante oscilogramas.....	92
4.1.2. Análise do comprimento de arco, tamanho e frequência de queda da gota utilizando oscilogramas e perfilografia	100
4.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS EM GMAW PULSADO	111
4.2.1. Determinação dos valores de indutância e forma do pulso	123
4.2.2. Análise de corrente média, energia e estabilidade por meio de ferramentas de software	129
4.2.3. Comparação do tempo de estabilização entre GMAW Convencional e Pulsado	130
4.3. DETERMINAÇÃO DE INSTABILIDADE E FALHAS NA SOLDA APLICANDO ANÁLISE DE SINAIS COM TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	132
4.4. ANÁLISE DE OSCIOGRAMAS PARA GMAW PULSADO.....	137
4.4.1. Cálculo de estabilidade da solda com análises dos oscilogramas.....	137
4.4.2. Problemas com frequências baixas e com a velocidade do arame	138
4.4.3. Cálculo de UGPP	142
4.5. ANÁLISE DA SOLDA E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO COM IMAGENS OBTIDAS POR PERFILOGRAFIA	143
4.6. MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	145
4.6.1. Cálculo da largura, reforço e área transversal feito pelo scanner	146
4.6.2. Medida da penetração para amostras selecionadas (corte e macrografia dos cordões).	147
4.7. CÁLCULO DE PARÂMETROS PARA AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM ...	151
4.8. PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ DE SOLDA PARA REALIZAR PASSES E CAMADAS	153
4.8.1. Análises para a superposição de cordões, tendo em conta a direção dos cordões e a temperatura de aquecimento da chapa	153
4.8.2. Análise matemática para calcular distâncias entre cordões na deposição de material em uma camada	154
4.9. SIMULAÇÃO PARA O PREENCHIMENTO DO BURACO POR CAMADAS SUCESSIVAS	161
CONCLUSÕES.....	165
6. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	167

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168
8. PUBLICAÇÕES	175
APÊNDICE	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Classificação de transferência metálica pelo IIW (LANCASTER, 1986, adaptado por MODENESI, 2004).....	34
Tabela 2.2.	Características do Processo GMAW (ACESITA, 2011).....	44
Tabela 2.3	Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW (ACESITA, 2011).....	44
Tabela 2.4	Misturas gasosas para a soldagem GMAW dos aços inoxidáveis (ACESITA, 2011).....	45
Tabela 2.5.	Composição química do arame tubular OK TubRod 410 NiMo MC segundo a norma EN12073 (VAZ, 2004).....	45
Tabela 2.6.	Propriedades mecânicas do arame tubular OK TubRod 410 NiMo MC segundo a norma EN12073 (VAZ, 2004).....	46
Tabela 3.1.	Composição do material de base e de aporte.....	73
Tabela 3.2.	Parâmetros Iniciais.....	78
Tabela 4.1..	Varredura de dados para o teste com perfilografia, variando tensão e velocidade de arame em relação ao ponto central (26V, velocidade de arame 7m/min e DBCP 15 mm).....	92
Tabela 4.2.	Parâmetros para GMAW-P.....	110
Tabela 4.3.	Parâmetros fixos com variação na corrente pico para baixa energia de aporte.....	111
Tabela 4.4.	Parâmetros fixos com variação no tempo de pico e com baixa energia de aporte.....	112
Tabela 4.5.	Parâmetros fixos com variação na corrente pico, alta energia de aporte e V_a 8,0m/min.....	112
Tabela 4.6.	Variação no tempo de pico (T_p), alta energia de aporte e V_a 8,0m/min	113
Tabela 4.7.	Variação na corrente de pico (I_p), alta energia de aporte e V_a 7,5 m/min	114
Tabela 4.8.	Variação na velocidade de soldagem (V_t), alta energia de aporte e V_a 7,0 m/min.....	115
Tabela 4.9.	Variação na velocidade do arame (V_a), alta energia de aporte e Fr de 200 Hz.....	116
Tabela 4.10.	Variação na frequência (Fr), alta energia de aporte e V_a 7,0m/min...	117

Tabela 4.11.	Variação da Tensão, alta energia de aporte e Fr de 240Hz.....	118
Tabela 4.12.	Outras variações dos parâmetros para uma melhor compreensão do estudo da geometria.....	119
Tabela 4.13.	Outros testes realizados na procura de minimizar a energia.....	119
Tabela 4.14.	Resumo de todos os testes feitos para GMAW-P.....	120
Tabela 4.15.	Medidas de reforço e largura com o desvio padrão.....	121
Tabela 4.16.	Cálculo da corrente média teórica dos primeiros testes.....	122
Tabela 4.17.	Cálculo teórico e experimental da corrente média, energia e estabilidade.....	128
Tabela 4.18.	Cálculo da estabilidade da solda com programação em Matlab.....	135
Tabela 4.19.	Medidas de altura e penetração da solda.....	148
Tabela 4.20.	Parâmetros para o aço martensítico ASTM A743 CA-6NM.....	151
Tabela 4.21.	Testes com a técnica GMAW-P e aço martensítico ASTM A743 CA-6NM.....	152
Tabela 4.22.	Deslocamentos de largura e reforço de cada cordão sucessivo da figura 4.77 para a amostra 20 numa camada de 5 cordões com superposição 50%.....	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Princípio básico do processo MIG/MAG (<i>MIG/MAG WELDING</i> , SVETSAREN, 2003; MODENESI, 2004).....	30
Figura 2.2.	Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW (LANCASTER, 1986) e os trabalhos de Ponomarev et al. (2009).....	33
Figura 2.3	Representação esquemática da transferência por curto-circuito (MODENESI, 2004; HURTADO ADRIAN, 2004).....	35
Figura 2.4	Oscilograma típico da soldagem com transferência por curto-circuito. Arame AWS ER308 de 1,0 mm de diâmetro e gás Ar-2%O ₂ (MODENESI, 2004).....	35
Figura 2.5.	Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular (MODENESI, 2004). Tempo de amostragem: (a) 250ms e (b) 1,5s.....	37
Figura 2.6.	Transferência do tipo globular (HURTADO A., 2004).....	37
Figura 2.7.	Oscilograma de uma transferência por aerossol. Arame ER 70S6 de 1,20mm de diâmetro e gás Ar-4%CO ₂ (MODENESI, 2004).....	38
Figura 2.8.	Transferência goticular (HURTADO A., 2004).....	39
Figura 2.9.	Transferência por aerossol axial (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BÁLSAMO et. al.,2000).....	39
Figura 2.10.	Transferência por aerossol com alongamento (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BÁLSAMO et al., 2000).....	40
Figura 2.11.	Transferência por aerossol rotacional (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BÁLSAMO et al., 2000).....	40
Figura 2.12.	Princípio da transferência pulsada: I_p – corrente de pico, I_b – corrente de base, t_p – tempo de pico e t_b – tempo de base (MODENESI, 2004).....	41
Figura 2.13.	Oscilogramas típicos de uma transferência por arco pulsado (MODENESI, 2004).....	42
Figura 2.14.	Transferência por arco pulsado (imagem obtida por filmagem de alta velocidade mediante a técnica de perfilografia) (imagem própria, 2014).....	42
Figura 2.15.	Transferência globular repulsiva (esquemático) (MODENESI, 2004)....	43
Figura 2.16.	Transição globular-aerossol (esquemática) (MARQUES, 2002).....	49

Figura 2.17.	Montagem utilizada na técnica shadowgrafia (VILARINHO, 2000).....	54
Figura 2.18.	Sistema expensor de feixe <i>laser</i> de Galileu. <i>F</i> representa o foco objeto da lente convergente e da lente divergente. <i>DL</i> é a distância entre as duas lentes. <i>DFC</i> é a distância focal da lente convergente. <i>DFD</i> é a distância focal da lente divergente. (LOPERA et al., 2011).....	54
Figura 2.19.	Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem em sincronismo com imagens de alta velocidade obtidos para uma transferência com arco pulsado (BÁLSAMO et al., 2000).....	55
Figura 2.20.	Variáveis do modo de transferência pulsado, com a energia de aporte e corrente média (área baixo a curva) (HURTADO ADRIAN, 2004).....	58
Figura 2.21.	Critério de Burnoff para solda convencional e por arco pulsado. Adaptado do trabalho de Amin (1983) e Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998).....	60
Figura 2.22.	Zona Paramétrica baseada no Critério de Burnoff (HURTADO A, 2004).....	62
Figura 2.23.	Oscilograma típico de corrente e tensão representando a separação dos picos de corrente entre cada pulso, produzindo uma gota por pulso (HURTADO ADRIAN, 2004).....	63
Figura 2.24.	Oscilograma típico de corrente e tensão representando a separação dos picos de corrente entre cada pulso, produzindo duas gotas por pulso (HURTADO ADRIAN, 2004).....	63
Figura 2.25.	Oscilogramas de transferências globular, aerossol ou goticular e aerossol com alongamento ou <i>streaming</i> . Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O ₂ (JONSON et al., 1991).....	65
Figura 3.1.	Metodologia preliminar geral para obter os melhores parâmetros, cordões e camadas.....	68
Figura 3.2.	Metodologia preliminar de análise para obter os parâmetros iniciais de trabalho para GMAW-P.....	69
Figura 3.3.	Método experimental para obter os parâmetros iniciais de um só cordão.....	70
Figura 3.4.	Metodologia preliminar para obter bons parâmetros em GMAW-P e sua avaliação com análises da geometria do cordão e os parâmetros de saída.....	71
Figura 3.5.	Método experimental para obter uma camada.....	72
Figura 3.6.	Metodologia para obter camadas por meio de superposição de cordões.....	72

Figura 3.7.	Fonte Fronius e robô de soldagem ABB Robotics.....	74
Figura 3.8.	Bancada experimental para aplicação da técnica de perfilografia.....	75
Figura 3.9.	Iluminação do arame-eletrodo com o feixe laser expandido (Imagem adaptada do trabalho de LOPERA JESUS, 2010).....	75
Figura 3.10.	Mapeamento para os tipos de transferência de metal de acordo com a tensão e a corrente. Seleção de regiões por tipo de transferência de metal, Região Curto-Circuito (18 a 22 v) “CC”. Região Globular (22 a 26v) “G”; Região Goticular ou Spray (26 a 36v) “Sg”.....	81
Figura 3.11.	Ajuste de pontos por linhas retas e busca de sua interseção para as curvas V_a “versus” I_m obtidas para o processo convencional e pulsado.....	82
Figura 3.12.	Zonas paramétricas de acordo com o critério de Burnoff ($Fr = 200\text{Hz}$)...	85
Figura 3.13.	Zonas paramétricas de acordo com o critério de Burnoff ($Fr = 166,7\text{Hz}$).....	86
Figura 4.1.	Varredura por grupos variando V_a e T_e em função de um valor central estável.....	92
Figura 4.2.	Oscilogramas de I na determinação do modo de transferência e estabilidade.....	94
Figura 4.3.	Oscilograma de corrente do grupo V_{a1} com tensão 18v e velocidade de arame 5,5m/min, identificando características dos picos e frequência do pulso.....	96
Figura 4.4.	Oscilograma de corrente do grupo V_{a1} com $T_e = 20\text{v}$ e $V_a = 6 \text{ m/min}$, identificando características nos picos e sua frequência.....	97
Figura 4.5.A	Oscilograma de corrente com $T_e = 26 \text{ v}$ e $V_a = 7 \text{ m/min}$	98
Figura 4.5.B	Oscilograma de corrente com $T_e = 26\text{v}$ e $V_a = 8\text{m/min}$	98
Figura 4.5.C	Oscilograma de corrente com $T_e = 26 \text{ v}$ e $V_a = 9 \text{ m/min}$	98
Figura 4.6.	Grupo com $T_e = 18\text{v}$ e $V_a = 5,5\text{m/min}$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).....	100
Figura 4.7.	Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota. Grupo (18v – 5,5m/min).....	101
Figura 4.8.	Grupo com $T_e = 20\text{v}$ e $V_a = 6\text{m/min}$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).....	102
Figura 4.9.	Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota. Grupo (20v – 6m/min).....	102

Figura 4.10.	Outras imagens do grupo (20v – 6m/min) onde se pode observar o comprimento do arco.....	103
Figura 4.11.	Grupo com $T_e = 22v$ e $V_a = 6m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).....	103
Figura 4.12.	Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota. Grupo (22v – 6m/min).....	104
Figura 4.13.	Densidade de probabilidade vs frequência e vs tempo. Grupo (22v – 6m/min).....	105
Figura 4.14.	Grupo com $T_e = 24v$ e $V_a = 6m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).....	105
Figura 4.15.	Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota. Grupo (24v – 6m/min).....	106
Figura 4.16.	Densidade de probabilidade vs frequência e vs tempo. Grupo (24v – 6m/min).....	106
Figura 4.17.	Grupo com $T_e = 26v$ e $V_a = 7m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).....	107
Figura 4.18.	Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota. Grupo (26v – 7m/min).....	107
Figura 4.19.	Densidade de probabilidade vs frequência e vs tempo, Grupo (26v – 7m/min).....	108
Figura 4.20.	Grupo com $T_e = 26v$ e $V_a = 8m/min$. (Imagem obtida por perfilografia).....	108
Figura 4.21.	Grupo com $T_e = 28v$ e $V_a = 8m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).....	109
Figura 4.22.	Grupo com $T_e = 30v$ e $V_a = 10m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).....	109
Figura 4.23.	I_p vs Reforço e Largura para parâmetros com baixa energia.....	112
Figura 4.24.	I_p vs Reforço e Largura para parâmetros com alta energia.....	113
Figura 4.25.	T_p vs Reforço e Largura.....	114
Figura 4.26.	V_t vs Reforço e Largura.....	115
Figura 4.27.	V_a vs Reforço e Largura.....	116
Figura 4.28.	Frequência vs Reforço e Largura.....	117

Figura 4.29.	Tensão vs Reforço e Largura.....	118
Figura 4.30.	Oscilogramas de corrente com indutância alta e baixa e com tempos de pico diferentes para uma frequência de 200 Hz.....	123
Figura 4.31.	Oscilograma de corrente sem indutância e frequência de 200 Hz.....	124
Figura 4.32.	Oscilograma de corrente com indutância 25% e frequência de 200Hz..	124
Figura 4.33.	Teste com pulso duplo. $I_p=380A$, $I_s=110A$, $T_p=2.0$ ms, $T_s=0.8$ ms, $Ind=0.25\%$ e $fr = 52$ Hz Cordão 1.....	126
Figura 4.34.	Oscilograma com um bom comportamento de corrente e tensão. Cordão 20. $I_p=380A$, $I_s=110A$, $T_p=2,0ms$, $T_s=0,8ms$, $Ind=0,1$ e $fr = 240Hz$...	126
Figura 4.35.	Oscilogramas de corrente e tensão com pulsos diferentes variando sua indutância na subida ou sua queda.....	127
Figura 4.36.	Ajuste de pontos por linhas retas e busca de sua interseção para as curvas V_a “versus” I_m obtidas para o processo convencional e pulsado sem indutância.....	127
Figura 4.37.	Ajuste de pontos por linhas retas e busca de sua interseção para as curvas V_a “versus” I_m obtidas para o processo convencional e pulsado com 20% indutância.....	128
Figura 4.38.	Relação entre GMAW Convencional e Pulsado determinando o tempo de estabilização da corrente no início do pulso.....	130
Figura 4.39.	Pulso com valores e formato mais representativo para obter boas características.....	130
Figura 4.40.	Sinal no domínio do tempo e de frequência para uma fracção do oscilograma do cordão 15.....	132
Figura 4.41.	Aplicação de filtros de média e mediana do sinal obtida por Fourier...	132
Figura 4.42.	Sinal original de 500 dados no domínio do tempo (cordão 15).....	132
Figura 4.43.	Sinal no domínio do tempo após o tratamento com Transformada Rápida de Fourier e com os diferentes filtros. Em azul, o sinal original com os primeiros filtros, e em verde e vermelho, os demais filtros.....	133
Figura 4.44.	Comparação do sinal original com o sinal processado no domínio do tempo.....	133
Figura 4.45.	Aplicação de filtros passa-alto e passa-baixo com amplificação dos sinais.....	134

Figura 4.46.	Comparação do sinal original com a sinal processada no domínio do tempo do teste 32. Aplicação de filtros passa-alto e passa-baixo com amplificação dos sinais.....	135
Figura 4.47.	Faixas na programação da contagem de pontos para determinar a estabilidade.....	136
Figura 4.48.	Oscilograma com frequência de 200 Hz. Teste do cordão 8.....	138
Figura 4.49.	Oscilograma com frequência de 240 Hz cordão 23 e 24.....	138
Figura 4.50.	Oscilograma da corrente para a amostra 15. Dados de 32,6 s a 35 s....	139
Figura 4.51.	Oscilograma da tensão para a amostra 15. Dados de 32,6 s a 35s.....	139
Figura 4.52.	Oscilograma da corrente para a amostra 15. Dados de 32,6 s a 40 s....	139
Figura 4.53.	Oscilogramas de corrente e tensão da amostra 20. Dados entre 31,9 s até 32 s.....	140
Figura 4.54.	Fotos da solda da amostra 20.....	140
Figura 4.55.	a) Gráfico (I vsT) Cordão 10, alta indutância, I_p 385A, I_b 80 A, Tensão 26v, V_a 6m/min e frequência 180Hz b) Gráfico (v vsT).....	141
Figura 4.56.	Cordão 18, baixa indutância, I_p 380A, I_b 80A, Tensão 26v, V_a 7m/min, Frequência 200Hz.....	142
Figura 4.57.	Sequência de imagens por perfilografia com comparação no tempo do oscilograma de corrente da amostra 20.....	143
Figura 4.58.	Tamanho da gota por pulso amostra cordão 20.....	143
Figura 4.59.	Imagens em GMAW-P de uma gota por pulso.....	143
Figura 4.60.	Imagens em GMAW-P de duas gotas por pulso.....	144
Figura 4.61.	Procesamento de imagens em GMAW-P com duas gotas por pulso...	144
Figura 4.62.	Cálculo do tamanho da gota em goticular com diferentes correntes...	144
Figura 4.63.	Medidas do scanner (amostra 20).....	145
Figura 4.64.	Imagens dos cordões 1, 2, 20 e 24 com boas características.....	146
Figura 4.65.	Corte transversal do cordão 20.....	147
Figura 4.66.	Lixado e polido cordão 20.....	147
Figura 4.67.	Ataque químico no corte transversal do cordão 20.....	147
Figura 4.68.	Medida de penetração para testes com corrente e tensão diferente.....	148

Figura 4.69.	Medida de largura com diferente tensão.....	148
Figura 4.70.	Medida de penetração com diferente I_p e I_m	148
Figura 4.71.	Medida de comprimento do arco para GMAW Convencional.....	149
Figura 4.72.	Medida de comprimento do arco para GMAW-P.....	149
Figura 4.73.	Esquema geral dos comprimentos de arco, arame e tocha (figura adaptada de Albuquerque Filipe).....	150
Figura 4.74.	Aplicação do Critério de Burnoff no aço martensítico ASTM A743 CA-6NM.....	150
Figura 4.75.	Direção da formação dos cordões - Modo 1.....	152
Figura 4.76.	Direção da formação dos cordões - Modo 2.....	153
Figura 4.77.	Imagens de camadas com passes com o modo 1 e modo 2.....	153
Figura 4.78.	Deslocamento entre cordões aproximadamente semicirculares.....	154
Figura 4.79.	Superposição entre dois cordões.....	154
Figura 4.80.	Deslocamento entre cordões semielípticos.....	155
Figura 4.81.	Cordões com Superposição de 50%.....	155
Figura 4.82.	Cordões semicirculares com superposição de 50% com deslocamento mais próximo do real.....	158
Figura 4.83.	Cordões semielípticos com Superposição de 50%.....	158
Figura 4.84.	Camada de 10 cordões com superposição 50% e parâmetros do cordão 20.....	159
Figura 4.85.	Exemplo de buraco retangular para as provas.....	160
Figura 4.86.	Desenho do buraco em ANSYS e RHINOCEROS com os valores reais.....	160
Figura 4.87.	Cálculo de quantidade de passes com superposição 50% na primeira camada.....	161
Figura 4.88.	Cálculo da quantidade de passes com superposição 50% nas três camadas e cálculo de ângulo ótimo para o buraco.....	162
Figura 4.89.	Cálculo do valor da largura ótima para o cordão.....	162
Figura 4.90.	Cálculo de defeitos por fluxos de massa.....	163

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

A	<i>Amperes</i>
AIMM	Aço inoxidável martensítico macio
Ar	Elemento químico argônio
AWS	<i>American Welding Society</i>
C	Elemento químico carbono
Ce	Calor específico
Cr	Elemento químico cromo
CC	Curto circuito
CC -	Corrente contínua com polaridade direta ou eletrodo negativo
CC+	Corrente contínua com polaridade reversa ou eletrodo positivo
CC1	Transferência por curto-circuito com alta corrente
CC2	Transferência por curto-circuito com baixa corrente
CTAR	Corrente de transição da transferência aerossol axial para aerossol rotacional
CTGA	Corrente de transição da transferência globular para aerossol axial (ou projetado)
D	Diâmetro do arame
DFC	Distância focal da lente convergente
DFD	Distância focal da lente divergente
Di	Diâmetro do feixe de laser inicial (imagem)
DL	Distância entre as duas lentes
Do	Diâmetro do feixe de laser expandido (objeto)
DBCP	Distância entre o bico de contato e a peça ou distância da tocha à peça
F	Foco objeto da lente convergente e da lente divergente
Fcc	Fator de curto-circuito
Fr	Frequência do pulso

GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
G	Globular
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding – Pulsado</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
G1	Transferência globular com distancia do bico de contato ou tocha á peça de 12 mm
G2	Transferência globular com distancia do bico de contato ou tocha á peça de 15 mm
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
I	<u>Corrente</u>
Ib	Corrente de base
Im	Corrente média
Ip	Corrente de pico
Is	Corrente separadora das gotas ou de desprendimento das gotas
It	Corrente de transição globular/aerossol
(J)	<i>Joules</i>
K	Interseção com a ordenada
L	Fluxo de campo magnético
η	Coefficiente angular
m	Massa do arame fundido
M	Massa da gota
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
Mo	Elemento químico molibdênio
MC	<i>Metal Core</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
Ni	Elemento químico níquel
O	Elemento químico oxigênio

PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
Q	Calor transferido
r	Raio
S	<i>Spray</i> ou goticular
s	Produto da área transversal do eletrodo
Sg2	Transferência goticular
Sga2	Transferência goticular com alongamento
Sgr2	Transferência goticular rotacional e explosiva
t	Tempo
T	Período
Tb	Tempo de base
Tc	Tempo de ciclo
Ts	Tempo do pulso separador das gotas ou de desprendimento das gotas
Te	Tensão
tcc	Tempo de duração de curto-circuito
Tp	Tempo de pico ou tempo do pulso com maior intensidade de corrente
UGPP	Uma gota por pulso
Va	Velocidade de alimentação do arame
Vt	Velocidade de soldagem (Avanço da tocha na soldagem)
v	Velocidade
V	Volume
v	Volts
(v)	Voltagem
Vg	Volume da gota
ΔT	Variação de temperatura
λ	Constante de proporcionalidade da indutancia.

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas nas maquinarias é o desgaste mecânico, principalmente em máquinas submetidas a esforços ou a pressões muito grandes. Muitas indústrias precisam de reparos por soldagem já que sofrem por desgaste de suas peças mecânicas. Em usinas hidrelétricas, os principais danos são sofridos pelas pás de turbinas, por efeito da cavitação. A erosão por cavitação pode ser entendida, basicamente, como a perda progressiva de material de uma superfície sólida, por consequência do colapso de bolhas de vapor formadas por um líquido sob pressão e temperaturas críticas. Esse fenômeno é encontrado em turbinas e em parte do sistema hidráulico de geração de energia elétrica, conforme se demonstra no trabalho de Calainho et al. (1999).

As usinas hidrelétricas representam uma parte importante de um país. A erosão por cavitação é um fenômeno dos mais indesejáveis e nocivos, responsável por grandes perdas e danos no setor elétrico. Os reparos das superfícies erodidas por cavitação são realizados no local, de forma manual, por uma equipe de soldadores. Geralmente, esse processo de reparo apresenta soldas com falhas na sua geometria, na uniformidade dos cordões e camadas, também apresenta mudanças em suas características metalúrgicas e mecânicas devido a preenchimentos malfeitos.

Por estas razões, este trabalho pretende contribuir na procura de parâmetros ótimos para obter uma boa geometria do cordão de solda e das camadas. Para isso, foi escolhido um método de transferência metálica estável, de baixo consumo de energia, baixo aporte calórico e controlável, como é o método GMAW-P, com pesquisas iniciais importantes nos trabalhos de Eassa (1983); e Slania (1996). Determinaram-se os parâmetros mais aceitáveis tendo como base a estabilidade e homogeneidade na solda, buscando-se, ao mesmo tempo, uma geometria adequada. Inicialmente, os parâmetros foram determinados por meio do método de transferência convencional, procurando uma gota com raio de tamanho igual ao raio do fio e, em seguida, usando a transferência GMAW-P até determinar os melhores parâmetros, seguindo a metodologia proposta por Amin (1983) e Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998) e, atualmente, por Resende, 2007. Também foram utilizados os critérios de Burnoff para encontrar parâmetros que se aproximem dos parâmetros adequados, além dos métodos de

perfilografia e análise de sinais de Fourier para realizar análise dos dados e dos sinais até alcançar esses parâmetros aceitáveis com menos experimentos feitos.

Dentre as principais vantagens do processo GMAW-P, podem-se citar a facilidade de ser mecanizado ou automatizado, o uso de altas velocidades de soldagem, as altas taxas de deposição, a necessidade de limpeza mínima após soldagem e a possibilidade de uso em todas as posições e boa penetração. Por outro lado, dentre as suas limitações, está a sua maior sensibilidade a variações de seus parâmetros operacionais, incluindo, por exemplo, as características do arame.

Neste estudo, o mapeamento de uma ampla faixa de parâmetros permitirá gerar informações que auxiliem no desenvolvimento de procedimentos de soldagem para condições diversas. A metodologia proposta, com o uso dos diferentes critérios, permitirá determinar parâmetros ótimos no processo de soldagem. O uso da análise de Fourier nos permite ver a instabilidade no processo de soldagem, suas mudanças devidas a aumentos de corrente ou mudanças da frequência, como também as diferentes falhas ou eventos que ocorrem durante o processo que é registrado pelos sinais de tensão e corrente. A aplicação de técnicas como perfilografia, junto com programações desenvolvidas em MatLab para o tratamento de imagens, são aplicadas para determinar os modos de transferência, quantidade de gotas por pulso, tamanho e destacamento da gota, que são variáveis importantes na avaliação dos parâmetros iniciais, dando maior confiança aos resultados encontrados pelos critérios e ferramentas desenvolvidos com a metodologia proposta. Outras programações desenvolvidas de grande importância na análise do processo de soldagem foram realizadas para determinar a corrente média e a energia efetiva no processo, além da estabilidade e homogeneidade dos pulsos, capazes de determinar a escolha dos sinais mais estáveis que apresentavam menor energia.

A metodologia adotada permitiu a obtenção de bons resultados, conseguindo uma boa geometria do cordão e das camadas, com uma grande estabilidade no processo de soldagem e com soldas de alta qualidade, diminuindo a energia no processo. Os resultados obtidos dos parâmetros de entrada e saída foram avaliados com duas técnicas e ferramentas de *software*. Uma das técnicas de avaliação foi o registro de imagens com a técnica de perfilografia e seu correspondente processamento. Utilizou-se a técnica de Fourier para analisar os sinais de

corrente e tensão captados previamente. Estes sinais serviram de base para os cálculos de corrente média e energia do processo. Os dados coletados e analisados permitiram a identificação de parâmetros ótimos dentro de uma faixa estabelecida.

1.1. JUSTIFICATIVA

Os problemas que se apresentam em um processo de soldagem, como, por exemplo, a presença de respingos, a instabilidade no processo, a geometria não uniforme nos cordões e nas camadas, dentre outros, requerem o uso de técnicas com diferentes tipos de solda para sua solução. Desta forma, os numerosos parâmetros envolvidos neste processo de soldagem serão variados, apesar de possuírem grande correlação entre si. Assim, a análise dessas variáveis é de grande importância, pois estabelece a qualidade da solda e as características desejadas para cada processo. Por esta razão, modelos têm sido desenvolvidos para determinar boas respostas aos dados de entrada envolvidos neste processo, além da criação de metodologias que sejam capazes de desenvolver parâmetros ótimos.

No processo de soldagem há diversas metodologias usadas na busca de parâmetros e diferentes modelos dos processos de transferência metálica, com diferentes graus de complexidade. Uma característica desses modelos é que, dentro da metodologia, é necessário dispensar os parâmetros que têm menos influência na solda e fazer uma restrição no modelo, a fim de aplicar modelos mais simples e mais fácil de analisar e aplicar nos diferentes processos.

Tendo isso em vista, este trabalho justifica-se pela intenção de buscar desenvolver uma metodologia que utilizasse tanto a modelagem matemática simples baseada em critérios quanto uma modelagem empírica baseada nas respostas dos processos e mediante técnicas de avaliação, como o tratamento de sinais e imagens, escolhendo, desta maneira, os parâmetros de mais peso estatisticamente, mas sem restringir a maioria deles, coletando dados em tabelas e fazendo as análises para determinar os melhores cordões e camadas, conseguindo uma boa geometria, com uma alta estabilidade no processo de soldagem e com soldas de alta qualidade, diminuindo a energia no processo.

Para tanto, escolheu-se a técnica de transferência metálica GMAW-P, de alta aplicação na indústria, por esta economizar energia e proporcionar melhor controle no processo, além de possuir um modo de transferência goticular de alta estabilidade, o qual é gerado por pulsos que permitem diminuir a energia e eliminar os respingos. Também foi aplicada a técnica de perfilografia, com filmagem em tempo real, fazendo, posteriormente, o processamento de imagem e análise dos sinais como ferramentas de avaliação dos parâmetros encontrados com a metodologia proposta. Na técnica GMAW-P, devido à diferença em seus pulsos e em seus parâmetros para alcançar alta estabilidade, os parâmetros escolhidos têm de ser mais precisos do que em outras técnicas. Por esse motivo, propõe-se, neste trabalho, uma metodologia para a busca de parâmetros e avaliação da solda, recompilando metodologias e propostas utilizadas em outros trabalhos que abordam a mesma temática, mas com aportes adicionais referentes à utilização de ferramentas e a métodos de avaliação.

O trabalho foi baseado, principalmente, na técnica GMAW-P, com eletrodo de arame de aço tubular de 1,2mm de diâmetro, ESAB OK Tubrod 410 NiMo (MC), gás de proteção de argônio com 6% de CO₂ e dois tipos de aço para os corpos de prova. Outro aporte importante foi o estudo da formação de camadas e preenchimento das superfícies erodidas, utilizando os parâmetros já encontrados para os cordões individuais, com as técnicas descritas anteriormente. Cabe ressaltar que o estudo da formação de camadas foi feito mediante cálculos matemáticos e testes da solda, utilizando-se uma metodologia que determinasse a melhor forma de criação de camadas e preenchimento das superfícies erodidas.

Em relação aos parâmetros, pode-se afirmar que com todas as técnicas e análises feitas se pode obter excelentes resultados, encontrando uma faixa de valores ótimos de trabalho, onde o cordão e as camadas tenham boas características, mas o processo não pode ser descrito como uma otimização de parâmetros, já que se deveria fazer uma análise numérica da efetividade deste método em relação a outros e entre as diferentes técnicas de transferência.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia capaz de encontrar parâmetros ótimos, baseada nos diferentes critérios da transferência metálica e técnicas de validação, para a formação de um cordão de solda de boa qualidade e boa estabilidade no processo de soldagem para o modo de transferência GMAW-P, que seja capaz de gerar camadas satisfatórias utilizadas no preenchimento de superfícies erodidas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Eliminar os respingos e defeitos na formação do cordão de solda.
- Avaliar, por meio da técnica de perfilografia, a qualidade da solda, o modo de transferência, bem como a quantidade e o tamanho das gotas por ciclo.
- Detectar mudanças nos sinais de corrente e tensão e analisar as frequências presentes em cada sinal, determinando alterações na sua periodicidade e estabilidade com o uso da transformada rápida de Fourier e filtros de media, mediana, passa-baixos, passa-altos no processo de soldagem.
- Estabelecer a melhor superposição e a geometria adequada, que, durante o processo da formação das camadas, permitam o uso mínimo de energia de aporte com alta estabilidade e ausência de respingos, capazes de terem uma reprodutibilidade do sistema.
- Determinar as características aceitáveis para a formação das diferentes camadas com boa geometria.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. Primeiramente, tem-se a introdução, na qual estão sendo apresentados os pressupostos iniciais da pesquisa. Em seguida, o Capítulo Dois apresenta uma revisão bibliográfica dos principais tópicos relacionados ao trabalho, isto é, processo MIG/MAG (GMAW), mapas de transferência metálica, métodos para análise e identificação dos tipos de transferência metálica onde os subitens têm as análises de oscilogramas e aplicação da técnica de perfilografia com o processamento de sinais e imagens, respectivamente, fatores que determinam o modo de transferência metálica, parâmetros da transferência metálica por arco pulsado onde os subitens têm cada um dos critérios para a busca dos parâmetros, estabilidade do processo de soldagem e análise de Fourier.

O Capítulo 3 traz a descrição dos equipamentos, materiais e a metodologia utilizada para a busca de parâmetros adequados na reparação de peças de aço. Descreve-se os parâmetros iniciais escolhidos para GMAW-P, baseados no modo de transferência goticular e nas referências. Aplica-se mapeamento para valores dos dados de GMAW Convencional e se faz cálculos com os diferentes critérios para determinar faixas pequenas de valores na transferência goticular, para parâmetros que determinem um bom comportamento da solda, no processo de transferência GMAW-P.

O Capítulo 4 apresenta análises de sinais e imagens no modo de transferência GMAW Convencional, com aplicação de técnicas e ferramentas para encontrar a estabilidade do processo, comprimento do arco, tamanho e frequência de queda da gota, determinando para diferentes tensões e velocidades de arame a melhor estabilidade encontrada no modo de transferência goticular que, juntamente com os critérios encontrados no Capítulo 3, determinam os parâmetros adequados para o modo de transferência GMAW-P, também apresenta os diferentes métodos de superposição e preenchimento na geração de camadas.

Os Capítulos 5 e 6 apresentam uma discussão dos resultados obtidos, bem como propostas de trabalhos futuros e as considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente aos temas envolvidos nesta pesquisa. Inicialmente, temos o tópico que trata do estudo sobre os diferentes processos de soldagem GMAW. Em seguida, temos uma abordagem sobre mapas de transferência, fatores principais que determinam o modo de transferência metálica, e os métodos para análise e identificação dos diferentes tipos de transferência com técnicas de avaliação como perfilografia com os correspondentes métodos para o processamento das imagens. Posteriormente, temos a busca de parâmetros iniciais em GMAW-P, a aplicação de critérios nesta busca e a análise das soldas como a geometria do cordão. Finalmente, temos a abordagem da estabilidade no processo de soldagem e uma descrição da análise de Fourier, que é outro método de avaliação aplicado aos sinais para determinar estabilidade e falhas no processo de soldagem.

2.1. PROCESSO MIG/MAG (GMAW)

A soldagem por arco elétrico, com eletrodo e com gás de proteção, é um processo de soldagem que produz a união dos metais pelo seu aquecimento e fusão, por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça (metal de base) com proteção de gás, conforme representado na figura 2.1 a seguir.

O processo GMAW é protegido por uma atmosfera de gás inerte (comercialmente Ar ou He) ou gás ativo (CO_2), ou misturas incluindo também N_2 ou O_2 . O processo também é conhecido por soldagem MIG/MAG, em que MIG representa *Metal Inert Gas* (proteção por um gás, ou mistura, inerte) e MAG, *Metal Active Gas* (proteção por mistura de um ou vários gases ativos com gases inertes ou CO_2 puro). A sigla GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é a designação que engloba os dois processos acima citados, abrange o uso de qualquer tipo de gás de proteção (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

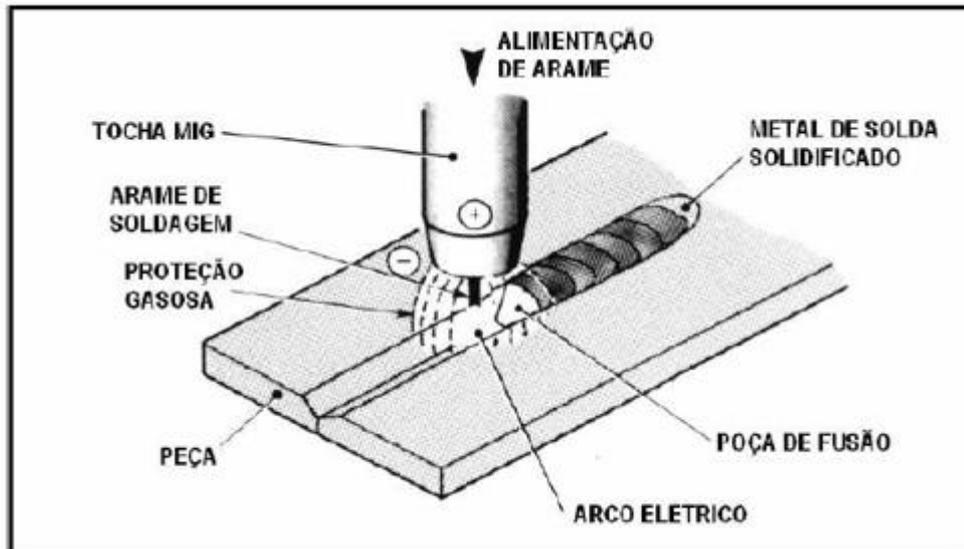


Figura 2.1. Princípio básico do processo MIG/MAG (MIG/MAG WELDING, SVETSAREN, 2003; MODENESI, 2004).

Uma das características básicas desse processo, em relação aos outros processos de soldagem, é sua alta produtividade, que é motivada, além da continuidade do arame, pelas altas densidades de corrente que o processo pode utilizar.

De um modo geral, pode-se dizer que as principais vantagens da soldagem MIG/MAG são: alta taxa de deposição e alto fator de trabalho do soldador que se reflete em: alta produtividade; grande versatilidade, quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis; não existência de fluxos de soldagem e, conseqüentemente, ausência de operações de remoção de escória; processo automatizável, exigência de menor habilidade do soldador, quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos; baixo custo; cordão de solda com bom acabamento; gera pouca quantidade de fumaças; soldas de relativa boa qualidade.

As principais limitações da soldagem MIG/MAG são: a) regulagem do processo bastante complexa; b) necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para solda, dificultada pela forte interdependência destes e por sua influência no resultado final da solda produzida; c) maior custo do equipamento, maior necessidade de manutenção deste, em comparação com o equipamento para soldagem com eletrodos revestidos; d) não deve ser utilizado em presença de corrente de ar; e) menor variedade de consumíveis; f) posição de soldagem limitada; g) probabilidade elevada de gerar porosidade no cordão de solda; h) produção de respingos.

Segundo Modenesi (2004, p. 65): O processo de soldagem MIG/MAG pode ser utilizado em materiais em uma ampla faixa de espessuras. No Brasil, o diâmetro dos arames-eletrodo normalmente utilizados varia entre 0,8 e 1,2mm. No Japão, encontramos arames de menores diâmetros (0,5mm) que irão facilitar os trabalhos em posições de soldagem diferentes da posição plana. A transferência contínua de metal pela coluna de arco faz com que a eficiência do calor adicionado seja superior a maioria dos processos.

2.1.1. Transferência metálica no processo GMAW

A melhor forma de descrever as características do processo GMAW é por meio dos quatro mecanismos básicos empregados para transferir metal à peça que vai ser soldada, isto é, os itens A, B, C e D, e o item E, que é a mistura dos quatro primeiros modos de transferência. Vejamos a seguir:

A) Transferência por curto-circuito.

B) Transferência globular.

C) Transferência goticular.

D) Transferência por arco pulsado.

E) Modos mistos de transferência.

O tipo de transferência no processo de soldagem é o resultado da interação de vários fatores, tais como: intensidade e tipo de corrente de soldagem, tensão de soldagem e diâmetro do eletrodo, composição do eletrodo, gás protetor, indutância, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem, entre outros, sendo os de maior influência os dois primeiros.

Outro jeito de classificar os modos de transferência varia de acordo com a forma que o material for transportado, conforme apresentado na tabela 2.1 em três itens: vôo livre, por

contato e protegida por escoria, cada uma delas dividida em subitem com outras formas de transferência.

Entende-se por transferência metálica a maneira ou o modo pelo qual o metal líquido se transfere da ponta do eletrodo para a poça de fusão. Basicamente, existem quatro modos de transferência metálica que são amplamente aceitos e facilmente detectados no processo GMAW, são eles: curto-circuito, globular, goticular (também conhecido como spray, ou aerossol) e por arco pulsado onde sua transferência sucede durante o pulso ou ciclo completo, e uma transferência por vôo livre e quando a corrente é máxima (I_p) a transferência é goticular durante o tempo de pico (t_p). Há outros modos que podem ser considerados como uma subdivisão dos mencionados acima, por exemplo, goticular rotacional, goticular axial, goticular com alongamento, goticular explosiva ou, ainda, modos obtidos por formas especiais de operação do equipamento, cujo modo de transferência principal já mencionamos como um quarto caso é o denominado arco pulsado considerado as vezes uma subdivisão da transferência goticular.

O modo de transferência na soldagem GMAW é influenciado pelo tipo e valor da corrente de soldagem, polaridade e tensão no arco, diâmetro e composição do eletrodo e gás de proteção, entre outros. O conhecimento das características e o bom entendimento dos modos de transferência são imprescindíveis para o melhor controle e adequação do uso da soldagem GMAW. Dentre os trabalhos que apresentam mais dados e características do modo de transferência, sugerimos a leitura de Lancaster (1986), Modenesi (2004) e Resende (2007).

Estes modos são função dos parâmetros de soldagem como corrente e tensão do arco e da natureza do gás, ou mistura de gases utilizados neste processo. A seguir, é feita uma breve descrição dos modos de transferência metálica mais conhecidos. Figura 2.2 e a tabela 2.1. dos modos resumidos em três grupos.

A tabela 2.1, por exemplo, resume os principais modos de transferência segundo classificação do IIW e a figura 2.2 ilustra estes modos (LANCASTER, 1986).

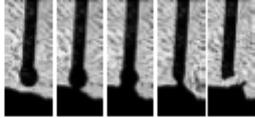
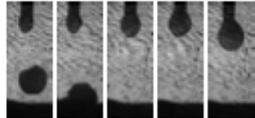
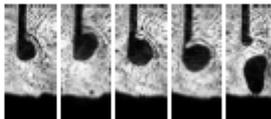
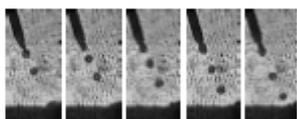
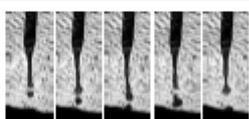
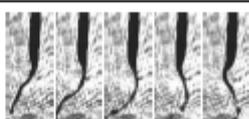
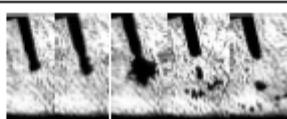
Classe de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por curto-circuito	Por curto-circuito		Tensão superficial e eletromagnética
Por vóo livre	Globular		Tensão superficial e gravitacional
	Globular repulsiva		Tensão superficial, gravitacional e de reação
	Goticular Projetada		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Evaporação súbita de material com menor ponto de ebulição

Figura 2.2. Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW (LANCASTER, 1986) e os trabalhos de Ponomarev et al. (2009).

Tabela 2.1. Classificação de transferência metálica pelo IIW (LANCASTER, 1986, adaptado por MODENESI, 2004).

Tipo de Transferência	Exemplo de Processos de Soldagem
1. Vôo Livre	
1.1. Globular	
1.1.1. Globular	GMAW - baixa corrente
1.1.2. Repelida	GMAW – com proteção de CO ₂
1.2. Goticular ou Aerossol	
1.2.1. Projetado	GMAW - corrente intermediária
1.2.2. Com alongamento	GMAW – corrente média
1.2.3. Rotacional	GMAW – corrente elevada
1.3. Explosiva	SMAW
2. Por Contato	
2.1. Curto Circuito	GMAW – com curto circuito
2.2. Contínua	Soldagem com adição de metal
3. Protegida por Escória	
3.1. Guiada pela parede	SAW
3.2. Outros tipos	SMAW, FCAW, ESW, etc

A) Transferência por curto-circuito

A transferência por curto-circuito, como o próprio nome diz, envolve o curto-circuito instantâneo, causado entre a gota e a poça de fusão. Este tipo de transferência ocorre para baixos valores de corrente e tensão de soldagem e para quaisquer gases de proteção.

A gota formada na ponta do eletrodo, devido à fusão deste, vai aumentando de diâmetro até tocar a poça de fusão antes de se destacar do eletrodo, originando um curto-circuito. É, normalmente, utilizado com eletrodos com diâmetros mais finos para soldagem fora de posição ou na soldagem de chapas finas.

A quantidade de calor transferida à peça é menor quando comparada a outros tipos de transferências e, conseqüentemente, a penetração tende a ser menor e os cordões formados são menores tanto em sua largura quanto no reforço. Este modo de transferência é caracterizado por uma maior instabilidade do arco e possível formação de uma quantidade elevada de respingos. A formação de respingos pode ser controlada por meio da seleção adequada dos parâmetros de soldagem e fonte de energia, suavizando os curtos-circuitos. Cabe ressaltar que

a diferença básica entre a transferência por curto-circuito e a transferência globular é a distância entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão.

A figura 2.3 abaixo, ilustra, esquematicamente, a transferência por curto-circuito e a figura 2.4 mostra um oscilograma real de uma transferência por curto-circuito.

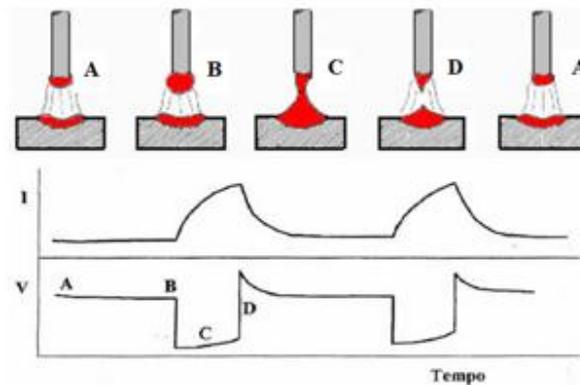


Figura 2.3. Representação esquemática da transferência por curto-circuito (MODENESI, 2004; HURTADO A, 2004).

Parâmetros típicos em curto-circuito são: Tensão 16 a 22v: Intensidade de corrente 50 a 150A. Seu arco tem comprimento pequeno, intensidades diferentes de luz e um zumbido característico.

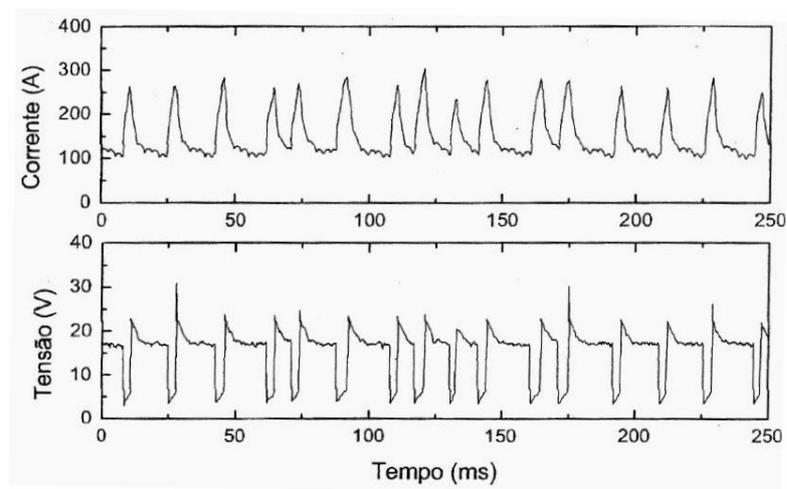


Figura 2.4. Oscilograma típico da soldagem com transferência por curto-circuito. Arame AWS ER308 de 1,0mm de diâmetro e gás Ar-2%O₂ (MODENESI, 2004).

Como principais variáveis neste modo de transferência, podem-se citar a indutância e a tensão. A indutância regula a taxa de variação da corrente elétrica durante a soldagem. Ela

permite o controle do efeito de constrição, também chamado efeito *pinch*, do eletrodo durante o aumento da corrente elétrica no instante do curto-circuito. A associação entre este efeito e a da tensão superficial provoca a ruptura do filete fluido de metal formado entre o eletrodo e a poça de fusão. A gota pode ser transferida de forma muito brusca, caso a corrente suba a uma taxa muito alta (baixa indutância), podendo gerar excesso de respingos e instabilidade do arco. No caso de uma taxa muito baixa (alta indutância), o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura do filete líquido, causando a interrupção do processo (RESENDE, 2007).

As condições operacionais da soldagem com transferência por curto-circuito podem ser caracterizadas por meio do estudo de oscilogramas de corrente e tensão do processo (vide figura 2.4). Alguns parâmetros derivados destes oscilogramas, e que podem ser utilizados para essa finalidade, são o período de transferência de metal (T), o tempo de duração de curto-circuito (t_{cc}) e o fator de curto-circuito (Fcc). Essas variáveis estão ligadas pela seguinte expressão:

$$F_{cc} = \frac{t_{cc}}{T} 100 \quad (2.1)$$

B) Transferência do tipo globular

Neste modo, a distância é suficiente para que a gota viaje através do arco sem realizar nenhum curto-circuito. Ocorre, em geral, para baixas densidades de corrente, mas para valores intermediários de tensão de soldagem. Além disso, ocorre para qualquer tipo de gás de proteção. Para misturas ricas em CO₂ e hélio, esta forma de transferência ocorre em uma faixa mais ampla de corrente.

O diâmetro médio das gotas de metal líquido varia com a corrente e tende a diminuir com o aumento desta. Normalmente, o diâmetro das gotas é maior que o diâmetro do eletrodo. Como o destacamento das gotas é feito pela ação da gravidade, este tipo de transferência não é utilizado para soldagem fora de posição (RESENDE, 2007).

A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado. A quantidade de calor transferida à peça a ser soldada é intermediária, comparando com os outros modos de transferência. Pode, ainda, gerar falta de penetração, falta de fusão ou reforço excessivo do cordão de solda. A figura 2.5 mostra oscilogramas de corrente e tensão de uma transferência globular. Observa-se, neste oscilograma, uma variação de tensão e corrente de soldagem típicas do destacamento de uma gota de metal (MODENESI, 2004).

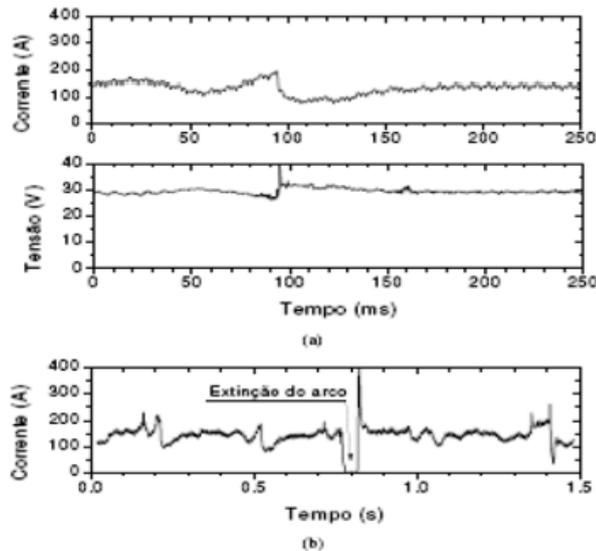


Figura 2.5. Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular (MODENESI, 2004). Tempo de amostragem: (a) 250ms e (b) 1,5s.

Parâmetros típicos em transferência globular são: Tensão de 20 a 36v, Intensidade de corrente 70 a 255A. (HURTADO A, 2004).

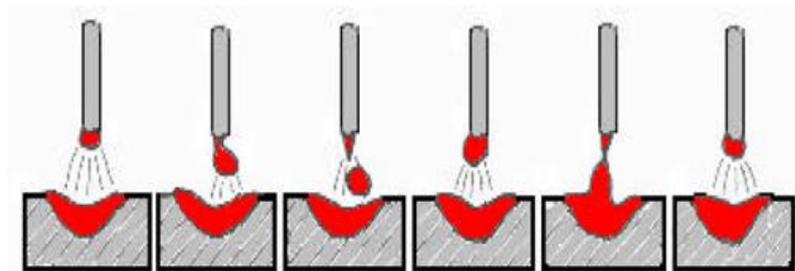


Figura 2.6. Transferência do tipo globular (HURTADO A, 2004).

C) Transferência do tipo goticular (aerossol ou spray)

Este tipo de transferência ocorre para elevadas densidades de corrente e quando se usa, geralmente, argônio ou misturas de proteção ricas em argônio. Na medida em que se aumenta a corrente de soldagem, diminui o tamanho médio das gotas de metal líquido que é transferido

para a peça. A partir de certo valor de corrente, o modo de transferência passa de globular para aerossol ou goticular. A esse nível de corrente dá-se o nome de corrente de transição globular/aerossol (RESENDE, 2007).

Neste modo de transferência, as gotas metálicas sofrem a ação de elevadas forças de origem eletromagnética, que são responsáveis pela diminuição de seu tamanho e sua aceleração. A redução do tamanho das gotas é acompanhada pelo aumento do número de gotas que se desprendem do eletrodo. A taxa de transferência das gotas pode variar de um pouco menos de 100 a centenas de gotas por segundo quando a velocidade de alimentação do eletrodo aumenta de aproximadamente 42 a 340mm/s (2,4 a 20,4m/min) (RESENDE, 2007; WELDING HANDBOOK, 1991).

Devido ao elevado tamanho da poça de fusão em consequência das altas correntes, este modo de transferência não é indicado para utilização fora da posição plana. A figura 2.7 mostra oscilogramas de corrente e tensão de uma transferência tipicamente aerossol. Cabe ressaltar que a literatura considera três subtipos de transferência aerossol: aerossol axial, com alongamento e rotacional.

Esta transferência é obtida com altas intensidades e altas tensões, suas intensidades de corrente são de 150 a 500A e suas tensões de 24 a 40v. O gás inerte de proteção favorece o tipo de transferência.

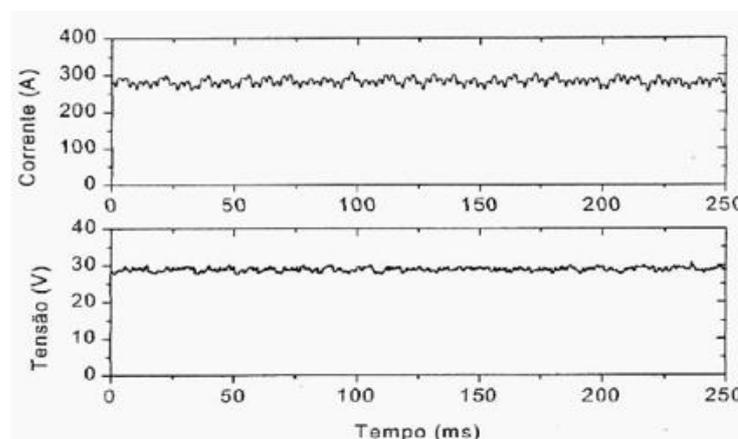


Figura 2.7. Oscilograma de uma transferência por aerossol: Arame ER 705-6 de 1,20mm de diâmetro e gás Ar-4%CO₂ (MODENESI, 2004).

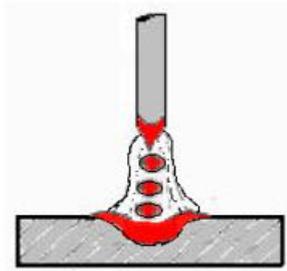


Figura 2.8. Transferência gótica (HURTADO A, 2004).

c1) Transferência do tipo globular axial ou projetado

Segundo Resende (2007), é o modo de transferência aerossol obtido para corrente próxima da de transição, sendo caracterizado por gotas com diâmetro igual ou ligeiramente inferior ao diâmetro do eletrodo que são desprendidas com uma velocidade bastante elevada.

A ponta do eletrodo pode se tornar afunilada durante a formação das gotas, porém esse afunilamento é curto, menor ou igual do que o diâmetro do eletrodo (SCOTTI; CLARK; KENNEY, 1998). A taxa de transferência é maior do que em curto-circuito e globular. A figura 2.9 ilustra este modo de transferência metálica.



Figura 2.9. Transferência por aerossol axial (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BÁLSAMO et al., 2000).

c2) Transferência do tipo aerossol com alongamento

De acordo com Resende (2007), neste modo de transferência, que ocorre para valores de correntes mais elevados que no caso anterior, as gotas são destacadas com tamanhos

menores do que no modo aerossol axial. As gotas são lançadas da extremidade de uma ponta alongada (afunilada) do eletrodo, cujo comprimento é maior do que o diâmetro do eletrodo. A figura 2.10 ilustra este modo de transferência.



Figura 2.10. Transferência por aerossol com alongamento (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BÁLSAMO et al., 2000).

c3) Transferência do tipo aerossol rotacional

Segundo Resende (2007), é o modo de transferência no qual gotas muito pequenas são lançadas da extremidade do eletrodo com ponta bastante alongada. Nesta ponta acontece um movimento rotacional em forma de espiral, que caracteriza este modo de transferência. Esse tipo de transferência já não ocorre com estabilidade como as transferências aerossol com alongamento e axial (KIM; EAGAR, 1993). A figura 2.11 ilustra este modo de transferência.



Figura 2.11. Transferência por aerossol rotacional (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BÁLSAMO et al., 2000).

D) Transferência por arco pulsado

A transferência por arco pulsado é uma modalidade do tipo goticular. Este tipo de transferência ocorre, na realidade, como uma variante do processo GMAW, em que há um controle das variáveis do processo de modo a obter uma transferência similar à por aerossol ou goticular, porém para valores de corrente média inferior à corrente de transição.

Na transferência por arco pulsado, a corrente varia entre dois valores, e é produzida por pulsos com intervalos regulares, diferentemente do que ocorre em goticular, em que a formação da gota ocorre em intervalos não regulares. A gota é destacada somente na corrente de pico e tem características próximas da gota transferida por goticular.

Neste modo de transferência, o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. No primeiro, a corrente de base (I_b) é mantida baixa de modo que não há transferência, mas somente o início da fusão do arame. No segundo, a corrente de pico (I_p) é superior à corrente de transição globular/aerossol (I_t), ocasionando a transferência, em condições ótimas de operação, de uma única gota. Assim, se consegue uma transferência com características de aerossol e uniforme, com corrente média menor que a de transição (RESENDE, 2007).

Dessa forma, consegue-se soldar espessuras menores do que as possíveis com transferência aerossol e em todas as posições. Uma limitação deste modo de transferência é a introdução de novas variáveis no processo GMAW, o que dificulta ainda mais a seleção dos parâmetros de soldagem.

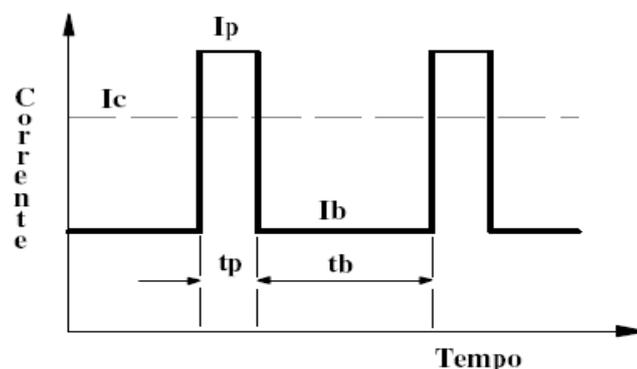


Figura 2.12. Princípio da transferência pulsada: I_p - corrente de pico, I_b - corrente de base, $I_c=I_m$ - corrente média, T_p - tempo de pico e T_b - tempo de base (MODENESI, 2004).

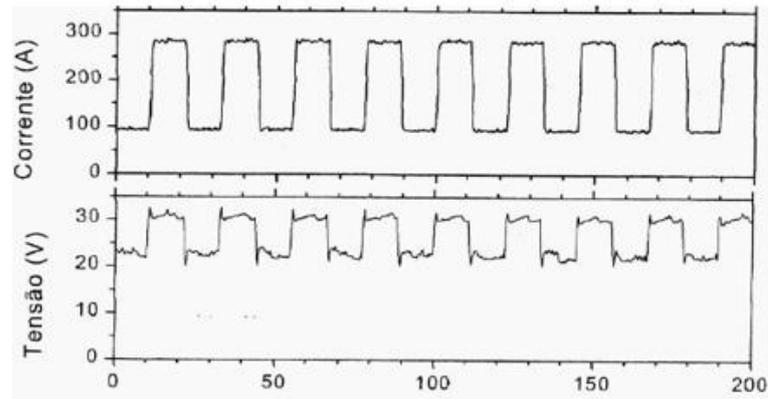


Figura 2.13. Oscilogramas típicos de uma transferência por arco pulsado (MODENESI, 2004).

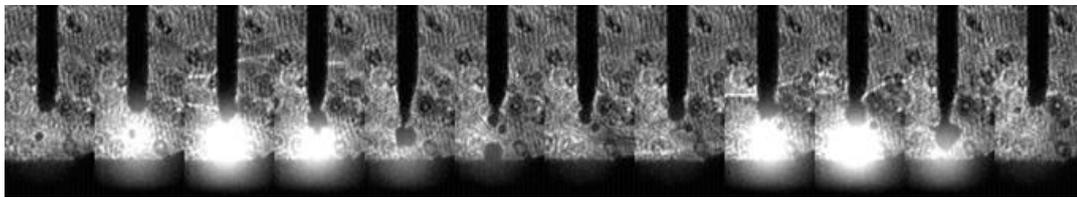


Figura 2.14. Transferência por arco pulsado (imagem obtida por filmagem de alta velocidade mediante a técnica de perfilografia) (imagem própria, 2014).

E) Outros tipos de transferência

Scotti e Ponomarev. (2008), com eletrodo de aço inoxidável austenítico, Ferraresi et al. (2005), com arame tubular de aço inoxidável ferrítico, e Figueiredo e Ferraresi (2001), com arame de alumínio, apresentam e classificam modos mistos de transferência.

Scotti e Ponomarev (2008) apresentam uma classificação para soldagem com arame de aço inoxidável austenítico (308L) com gases de proteção à base de argônio. Esta inclui as transferências do tipo misto: globular/curto-circuito, globular/curto-circuito/globular, globular/curto-circuito/aerossol axial, globular/curto-circuito/aerossol com alongamento, globular/aerossol axial, globular/aerossol com alongamento, curto-circuito/ricocheteamento, aerossol com alongamento/curto-circuito/ricocheteamento.

Podemos citar também a transferência do tipo globular repulsiva, em que a gota é defletida para fora do eixo do eletrodo ou repelida para longe da poça de fusão e acontece, normalmente, quando se usa eletrodo negativo ou proteção rica em CO₂. Imagina-se estar

associada ao aparecimento de forças magnéticas ou de reações devidas à geração de vapores ou plasma na gota. A utilização deste tipo de transferência é restrita basicamente por estar associada a um arco instável e significativos volumes de respingos. A figura 2.15 ilustra esse modo de transferência.

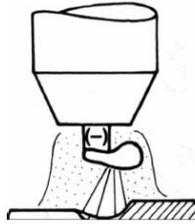


Figura 2.15. Transferência globular repulsiva (esquemático) (MODENESI, 2004).

2.1.2. Soldagem MIG/MAG com arames de aços inoxidáveis

A) Arame de aço tubular no processo de soldagem MIG/MAG

No processo de soldagem GMAW, o arco elétrico é aberto entre um arame alimentado continuamente e o metal de base. A região fundida é protegida por um gás inerte ou mistura de gases (Argônio, CO₂, Hélio ou O₂). A soldagem é realizada com o arame na polaridade positiva (ACESITA, 2011).

As características do processo GMAW estão apresentadas na tabela 2.2. Neste processo, a maneira e o tamanho das gotas de material fundido que atravessa o arco elétrico são importantes para a qualidade da junta soldada por este processo. Já a tabela 2.3 apresenta as principais características dos modos de transferência metálica do processo GMAW.

Tabela 2.2. Características do Processo GMAW (ACESITA, 2011).

Tipo de operação: <ul style="list-style-type: none"> Semi-automática ou automática 	Equipamentos: <ul style="list-style-type: none"> Fonte de energia Alimentador de arame Cilindro de gás Pistola Fluxômetros para medir vazão do gás
Características: <ul style="list-style-type: none"> Taxa de deposição: 1a15 kg/h Espessuras soldáveis: 1,5 mm mínimo na soldagem automática e 3,0 mm na soldagem semi-automática Posições de soldagem: todas (depende da regulagem do equipamento) Diluição: 10 a 30 % com adição Tipo de junta: todas Faixa de corrente: 60 a 400 A 	Custo do equipamento: <ul style="list-style-type: none"> 5 a 10 vezes o custo do equipamento de soldagem com eletrodo revestido
	Consumíveis: <ul style="list-style-type: none"> Arame sólido Gás de proteção Tube de contato e bocal
Vantagens: <ul style="list-style-type: none"> Facilidade de operação Alta produtividade Processo automatizável Baixo custo Não forma escória Cordão de solda com bom acabamento Gera pouca quantidade de fumos Soldas de excelente qualidade 	Limitações: <ul style="list-style-type: none"> Regulagem do processo bastante complexa Não deve ser utilizado em presença decorrente de ar Posição de soldagem limitada Probabilidade elevada de gerar porosidade no cordão de solda Produção de respingos Manutenção mais trabalhosa
Segurança: <ul style="list-style-type: none"> Proteção ocular Emissão intensa de radiação ultravioleta Risco de choque elétrico Queimaduras produzidas por respingos em alta temperatura 	

Tabela 2.3. Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW (ACESITA, 2011).

Modo de transferência	Tensão do arco	Densidade de corrente	Energia de soldagem	Soldagem fora de posição	Penetração
curto-circuito	baixa	baixa	baixa	sim	pequena
globular	média	baixa	média	não	média
spray	alta	alta	alta	depende	grande
pulsada	alta	média	média	sim	grande

A proteção gasosa tem a função de evitar a contaminação da poça de fusão pelo ar atmosférico. Tanto no processo GMAW quanto nos processos GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*) a soldagem em campo deve ser realizada com cautela. Isso porque correntes de ar podem deslocar a proteção gasosa e, conseqüentemente, comprometer a proteção da região que está sendo fundida. Assim, podem aparecer defeitos como porosidade, falta de fusão, falta de penetração etc. (ACESITA, 2011). Algumas misturas gasosas utilizadas na soldagem GMAW dos aços inoxidáveis estão apresentadas na tabela 2.4.

Tabela 2.4. Misturas gasosas para a soldagem GMAW dos aços inoxidáveis (ACESITA, 2011).

Mistura de gás	Tipo de transferência		Observação
	curto-circuito	spray	
Ar + 1-3%O ₂	regular	bom	-
Ar + 1-5%CO ₂	bom	bom	alguma adição de carbono
Ar + 30% He + 1%O ₂	muito bom	bom	aplicação em processos automáticos

B) Arame tubular AWS 410 NiMo MC

Para soldagem do aço inoxidável martensítico macio, durante as fases de construção e reparo das turbinas hidráulicas, podem ser utilizados consumíveis com composição química similar à do metal de base, porém, as aplicações indicam que certos cuidados devem ser tomados, como, por exemplo, a realização de pré-aquecimento, controle da temperatura entre passes e tratamento térmico após soldagem para remoção de hidrogênio em juntas com grande restrição (VAZ, 2004).

Estes consumíveis, para rotores fabricados com o aço CA6-NM, consistem em ligas com composição química de 13% Cr, 4% Ni, 0,4% Mo e teores de carbono inferiores a 0,04%. Os consumíveis devem, ainda, possuir baixos teores máximos de hidrogênio (máximo de 4 ml/100 g de metal de solda) (BUSCHINELLI et al., 1996).

A composição química do arame tubular OK TubRod 410 NiMo é ilustrada na tabela 2.5. Já as propriedades mecânicas do eletrodo são ilustradas na tabela 2.6.

Tabela 2.5. Composição química do arame tubular OK TubRod 410 NiMo MC segundo a norma EN12073 (VAZ, 2004).

Elemento	% em peso (%wp)
C	0,06 _{max}
Mn	1,50 _{max}
Si	1,00 _{max}
P	0,030 _{max}
S	0,025 _{max}
Cr	11,50 – 14,50
Ni	3,00 – 5,00
Mo	0,40 – 1,00

Tabela 2.6. Propriedades mecânicas do arame tubular OK TubRod 410 NiMo MC segundo a norma EN12073 (VAZ, 2004).

Resistência à tração (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)	Alongamento em 10d (%)
750	500	15

2.2. MAPAS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Os mapas da transferência metálica são gráficos esquemáticos que mostram regiões ou áreas em que predomina determinado tipo de transferência. Os mapas servem como ferramenta de apoio para análises do processo de soldagem e orientação para execução da operação e visam estabelecer os contornos da transferência em termos de variáveis de soldagem. Normalmente, as formas construídas são em termos da tensão ou comprimento de arco *versus* corrente ou velocidade de alimentação. A escolha de uma forma de representação depende do objetivo. Para uma análise mais teórica é interessante a forma comprimento de arco *versus* velocidade de alimentação, já para uma análise mais prática a forma tensão *versus* corrente ou velocidade de alimentação é mais interessante. É importante salientar que a facilidade de aquisição de dados é menor quando se quer utilizar o comprimento de arco, pois sua medição pode ser mais complicada do que a determinação da tensão.

Os mapas são utilizados em processos de soldagem a arco em que se pode, ou é importante, classificar as transferências metálicas. O processo GMAW é um exemplo (SCOTTI; CLARK; KENNEY, 1998).

2.3. FATORES QUE DETERMINAM O MODO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Os principais fatores que determinam os diferentes modos de transferência, segundo Brandi et al. (2000) e AWS Welding Handbook (1991), são os que influenciam e podem determinar o modo de transferência metálica: valor e polaridade da corrente de soldagem, tensão de soldagem, diâmetro e composição química do eletrodo e gás de proteção.

Dessa forma, a corrente de soldagem influencia tanto pela sua intensidade quanto pelo seu tipo. No caso de CC+ (corrente contínua com polaridade reversa ou eletrodo positivo), tipo de corrente geralmente utilizado em GMAW, conseguem-se os três modos básicos de transferência quando a proteção é rica em argônio. No caso de CC- (corrente contínua com polaridade direta ou eletrodo negativo), há uma repulsão das gotas pelas forças dos jatos de plasma e de vapor metálico. A gota é empurrada para cima e desviada de sua trajetória normal. Assim, a transferência se torna instável (globular repulsiva), trazendo dificuldades para o processo. Neste caso, o modo predominante é o globular e não se consegue variar o modo de transferência para aerossol. A corrente alternada, normalmente, não é utilizada comumente, pois o arco é extinto a cada meio ciclo quando a corrente vai a zero, trazendo instabilidade ao processo (BRACARENSE, 2003). Apesar disso, recentemente, o processo de soldagem GMAW com corrente alternada tem sido aplicado para a soldagem do alumínio (FARIAS et al., 2005).

Os diferentes tipos de gás permitem fazer mudanças no tipo de transferência e ajudam a ter melhores condições no processo. O argônio e as misturas ricas em argônio permitem obter os três tipos básicos de transferência, sendo que a transferência por aerossol só é obtida neste caso. Com misturas à base de gás carbônico, hélio ou nitrogênio normalmente é observada a transferência por curto-circuito, globular e globular repulsiva (KIM; EAGAR, 1993).

Também as adições de hélio e dióxido de carbono em misturas ricas em argônio permitem aumentar a faixa de corrente de soldagem na transferência aerossol projetado (KIM; EAGAR, 1993). Já Stenbacka e Persson (1992) sugerem, para aço inoxidável, as misturas $Ar+32\%He+3\%CO_2+1\%H_2$ e $Ar+30\%He+1\%O_2$. Como possuem propriedades muito boas para a transferência por curto-circuito e para aerossol, adições de O_2 e CO_2 ao Ar ou He, na soldagem com transferência aerossol, estabilizam o arco, aumentam a penetração e reduzem a viscosidade da poça de fusão. Os autores propõem o benefício de menores adições (em torno de 40%) de He em misturas à base de Ar em transferência aerossol e arco pulsado e misturas com altos níveis de He (em torno de 85%) na transferência por curto-circuito.

A tensão de soldagem está intimamente ligada ao comprimento de arco, por isso, ambos são utilizados com o mesmo sentido, ou seja, mantendo-se as demais variáveis do

processo constantes, a tensão no arco é diretamente proporcional ao comprimento do arco (BRACARENSE, 2003). A tensão é uma variável crítica a ser controlada, pois pequenas flutuações no comprimento do arco podem desestabilizar o processo. Por exemplo, no modo de transferência spray com argônio, um arco muito curto pode provocar pequenos curtos.

Em geral, a tensão é mais facilmente monitorada do que o comprimento de arco. Comumente, na indústria, utilizam-se níveis de corrente mais altos para transferência por aerossol, níveis intermediários para globular e níveis ainda mais baixos para curto-circuito. A tensão também influencia na geometria do cordão: tensões muito altas podem causar porosidade, respingos e trincas enquanto tensões mais baixas podem causar cordões mais estreitos e maior penetração (BRACARENSE, 2003).

2.3.1. Corrente de transição

Corrente de transição é o valor de corrente que define, de forma convencional, os limites entre dois modos de transferência. Basicamente, dois tipos de corrente de transição podem ser definidos (BRANDI et al., 2000): CTGA - corrente de transição da transferência globular para aerossol axial (ou projetado) - e CTAR - corrente de transição da transferência aerossol axial para aerossol rotacional. A figura 2.16 mostra, esquematicamente, a faixa de corrente associada com a definição da CTGA. Na prática, a mudança de modo de transferência ocorre em uma faixa de corrente, o uso de um valor único de corrente é apenas uma convenção.

Segundo Brandi et al. (2000), a CTGA tende a ser menor para metais com baixa resistividade elétrica e a CTAR é diminuída para metais de alta resistividade elétrica.

Dessa forma, espera-se que a CTGA para um eletrodo de aço inoxidável ferrítico seja menor que a de um eletrodo de aço inoxidável austenítico, pois, de forma geral e em condições similares, um aço inoxidável ferrítico apresenta menor resistividade elétrica que um austenítico (METALS HANDBOOK, 1961). Espera-se, também, que a CTAR para um eletrodo aço inoxidável ferrítico seja maior que a de um eletrodo de aço inoxidável austenítico.

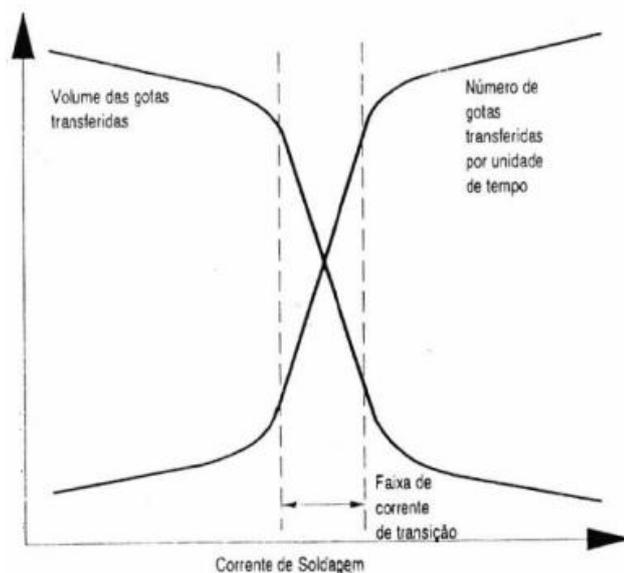


Figura 2.16. Transição globular-aerossol (esquemática) (MARQUES, 2002).

A corrente de transição globular aerossol depende também da geometria do eletrodo (KIM; EAGAR, 1993; RHEE; KANNATEY, 1992). A mesma diminui com o aumento do comprimento do eletrodo ou com a redução da seção transversal do mesmo. A corrente de transição também aumenta com o aumento da pressão do gás (KIM; EAGAR, 1993).

A corrente de transição depende da composição do gás de proteção. A corrente de transição globular/aerossol reduz com o aumento de adições de oxigênio em argônio até cerca de 5%O₂. Scotti, Clark e Kenney (1998) encontraram os valores de 200A para argônio industrial, 150A para Ar+1%O₂ e 140A para Ar+2%O₂, para eletrodo de aço inoxidável austenítico 308Si, com diâmetro de 0,89mm.

2.4. MÉTODOS PARA ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

A identificação dos modos de transferência pode ser feita no instante em que ocorre o processo de soldagem ou depois de realizar a solda, por meio da detecção e análise de diferentes sinais, geralmente fornecidos pela região do arco. Som, luz, sinais elétricos de corrente e tensão, aparência do arco, respingos, entre outros, podem possibilitar a detecção do modo de transferência. Técnicas sofisticadas, por exemplo, baseadas em análise de imagens obtidas através de filmagem de alta velocidade, permitem obter um maior volume de

informações e determinam, com maior segurança, o modo de transferência de metal, mas tendem a ser caras e demoradas. Por outro lado, os modos básicos de transferência podem ser detectados, inclusive, sem ajuda de nenhum aparato. O ser humano treinado pode distinguir estes modos de transferência visivelmente ou auditivamente. Embora, sujeitas a diversos fatores subjetivos e, em alguns casos, de precisão duvidosa, eles são usados rotineiramente na prática industrial.

Uma das técnicas mais utilizadas para detecção e análise de alguns modos de transferência em laboratório é a análise de oscilogramas de tensão e corrente, baseados nos sinais de corrente e tensão do arco. A análise de oscilogramas pode ser feita por meio de programas de computador que permitem analisar com maior precisão as informações fornecidas pelos sinais. Sem a ajuda de programas específicos, a análise se tornaria muito demorada, imprecisa e, portanto, sem utilização prática. A principal vantagem dos programas é que estes possibilitam a análise estatística dos sinais, podendo fornecer um bom número de informações. Na tentativa de se incrementar ainda mais as análises, pesquisadores vêm utilizando outros sinais, como, por exemplo, o sonoro, luminoso etc., que, juntamente com os sinais de corrente e tensão, permitem obter ainda mais informações. Jonson, J. A. et al. (1991), visando determinar a estabilidade do arco e transferências metálicas, analisaram sinais sonoros juntamente com sinais elétricos de corrente e tensão, através de redes neurais.

Outra técnica utilizada é a filmagem de alta velocidade, particularmente com shadowgrafia por laser e em conjunto com a anterior. Outras técnicas também podem ser utilizadas, tais como nível de respingos, som ou ruídos do arco e análise visual direta. Estas últimas são, normalmente, utilizadas em complementação às anteriores e são ainda exploratórias. Outras técnicas, baseadas principalmente no som e na luz emitidos pelo arco, têm sido tentadas, mas ainda são exploratórias e não são utilizadas na prática (JONSON et al., 1991).

A utilização da filmagem em alta velocidade permite a obtenção de dados importantes na determinação da corrente de transição, tal como a frequência de destacamento das gotas (JONSON et al., 1991; FIGUEIREDO; FERRARESI, 2001; SCOTTI; CLARK; KENNEY, 1998). À continuação, descrevem-se dois métodos utilizados para avaliar o tipo de transferência e a estabilidade no processo.

2.4.1. Análise de oscilogramas

Os sinais de corrente e tensão monitorados, por exemplo, através de um osciloscópio, podem mostrar variações associadas com os fenômenos que ocorrem na região do arco. Desta maneira, algumas características dos modos básicos de transferência podem ser detectadas qualitativa e quantitativamente.

No modo de transferência por curto-circuito, a tensão permanece aproximadamente constante quando a gota está se formando e crescendo, tendendo para um valor próximo de zero quando a gota toca a poça de fusão (momento do curto). Logo após o desprendimento da gota, um pulso de tensão é gerado devido à reignição do arco.

No modo de transferência aerossol, pode-se, dependendo das características da fonte de energia utilizada, utilizar um osciloscópio com memória para fazer a leitura do sinal de tensão para detectar o momento exato em que a gota se desprende. O desprendimento tende a gerar uma perturbação em torno de 0,5v no sinal da tensão, provavelmente devido ao aumento da resistência da região de estricção da gota antes da separação, com consequente aumento da tensão (BÁLSAMO et al. 2000). Esta perturbação é pequena e o ruído da fonte deve ser menor. As fontes transistorizadas analógicas permitem a observação do destacamento de uma gota mesmo no modo de transferência aerossol, em que a perturbação gerada é muito pequena. No entanto, esse tipo de fonte possui baixo rendimento elétrico e não é utilizada na prática. Nos casos das transferências por curto-circuito e globular, a detecção do desprendimento da gota é possível mesmo sem o uso de fontes transistorizadas analógicas. A utilização de filtros eletrônicos para reduzir o ruído proveniente do chaveamento das fontes é um artifício utilizado para a identificação do tipo de transferência e o momento de desprendimento da gota (BÁLSAMO et al., 2000).

2.4.2. Perfilografia

Quando não se pretende ver o arco, e sim a deposição de metal, pode-se utilizar a técnica da perfilografia (shadowgraphy). A perfilografia é uma técnica de iluminação usada junto com câmeras de alta velocidade na filmagem de transferência metálica em processos de

soldagem GMAW. A técnica de perfilografia faz uso da iluminação direcional à contraluz com um feixe laser como fonte de luz.

Uma ferramenta que vem a complementar os estudos experimentais de transferência metálica por meio de perfilografia é a sincronização das imagens obtidas na filmagem com sinais de corrente, tensão ou de outro tipo de sensor que sejam adquiridas durante a soldagem, como apresenta Bálamo et al. (2000). No trabalho desses autores, apresenta-se a aplicação da técnica de perfilografia para adquirir imagens da transferência metálica no processo GMAW-P, usando uma câmera CMOS com uma taxa de aquisição de mil frames por segundo. A perfilografia está baseada em dois itens básicos, à continuação.

A) Filmagem de alta velocidade de perfilografia a laser

O trabalho de Balch, K. (1999) descreve o desenvolvimento tecnológico das câmeras de alta velocidade. Os primeiros sistemas de vídeo de alta velocidade só poderiam capturar imagens a 120 *fps*, e surgiram devido às tecnologias de armazenamento magnético, estando comercialmente disponíveis a partir de 1970. A segunda geração foi introduzida por *NAC Inc.*, em 1979, e poderia capturar a 200 *fps*. Em 1980, a *Kodak* introduziu a terceira geração de analisadores de movimento, o SP2000, que poderia armazenar imagens monocromáticas a 2000 *fps*. A quarta geração foi uma nova abordagem em captura de imagens em alta velocidade, usando uma memória de estado sólido como mídia de armazenamento. A quinta geração avançou em maior resolução, mais velocidade (*frame rate*) e melhorou a qualidade para imagens coloridas e monocromáticas. Já a sexta geração apresentou vantagens em flexibilidade, tamanho, portabilidade, velocidade e facilidade de manuseio. Cabe ressaltar que, na presente pesquisa, utilizaremos uma câmera que captura 1000 frames por segundo, suficiente para capturar entre 5 e 7 imagens por pulso, dependendo da frequência do pulso e da frequência da queda da gota.

A utilização de filmagem para análise de transferência metálica tem sido utilizada com sucesso há vários anos. A técnica, utilizada conjuntamente com a perfilografia (*shadowgrafia*), mostrou-se eficaz em trabalhos (BÁLAMO et al., 2000; FIGUEIREDO; FERRARESI, 2001; SCOTTI, CLARK; KENNEY, 1998; HABERLIN, 1980; RAMOS; et al., 2011; LOPERA et al., 2010) envolvendo análise de transferência metálica MIG/MAG.

A técnica é utilizada para análises de transferências, através de imagens projetadas ou fotografias (DUTRA; BAIXO, 1991). O termo perfilografia, shadowgrafia ou também *back-lighting*, vem sendo utilizado para se referenciar à formação de uma sombra projetada em um anteparo ou em um filme fotográfico de um objeto sobre o qual é incidido um feixe de luz. A filmagem de alta velocidade, que permite o registro de 1000 (ou mais) quadros por segundo, permite a análise de detalhes mais precisos da transferência, tais como tipo de transferência, quantidade e geometria da gota do material transferido. Bálamo et al. (2000) e Scott, Clark e Kenney (1998) utilizaram uma câmera com 2000 quadros por segundo para análises da transferência. Já Haberlin et al. (1981) utilizaram uma câmera com capacidade de 5000 quadros por segundo. A utilização dessa técnica deve ser considerada em função da real necessidade, pois os custos envolvidos são elevados.

No caso da soldagem a arco, é necessário eliminar a luz do arco através de iluminação com laser e de filtragem seletiva, que deixe passar apenas a luz do laser. Haberlin (1981) utilizou laser He-Ne com potência de 10mW. Já Johnson et al. (1991) utilizaram laser He-Ne com potência de 25mW para reduzir a luz do arco. Com a eliminação quase total da luz do arco, as sombras passam a retratar apenas a parte interceptada do feixe de laser. As imagens podem ser reveladas por anteparos, fotos ou filmagem. A figura 2.17 ilustra uma montagem utilizada nessa técnica.

B) Montagem da técnica de perfilografia

A montagem proposta em trabalhos anteriores por Groetelars et. al. (2005) e Lopera et.al. (2010) descreve o princípio da perfilografia como a passagem de um feixe colimado de laser pela região do arco, de modo que a imagem resultante represente a sombra desses elementos (arame, metal em transferência, cordão de solda). Um filtro óptico de interferência passa-banda (na região do laser) é colocado entre o arco e a câmera, de modo que somente o feixe de laser e as sombras respectivas vão aparecer na imagem, suprimindo a luz produzida pelo arco que não esteja na região do filtro. Este arranjo utiliza um expensor de feixe laser de tipo *Galileu*. Como apresenta Weichel (1990) o expensor utiliza uma lente divergente como entrada do feixe e uma convergente como saída, que, de acordo com Hecht (2002), produz idealmente uma frente de onda plana na saída do expensor, não tendo assim distorção nem ampliação nas geometrias dos elementos.

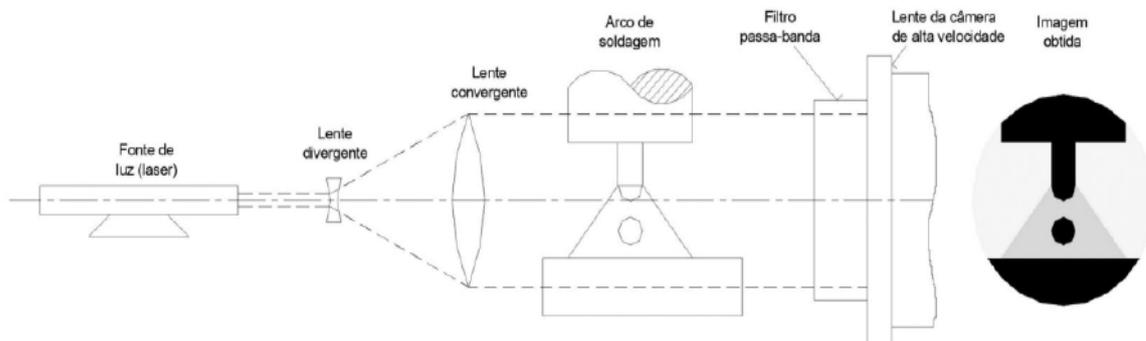
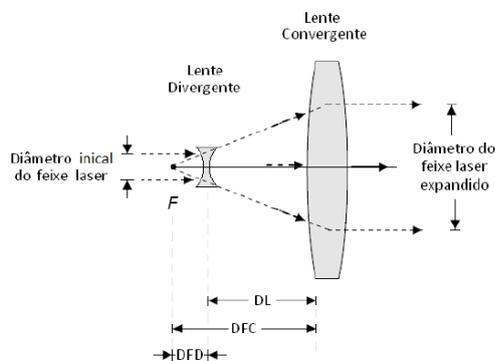


Figura 2.17. Montagem utilizada na técnica shadowgrafia (VILARINHO, 2000).



$$(1) DFD = DFC - DL$$

O diâmetro do feixe *laser* expandido é encontrado com a seguinte relação

$$(2) Do = (MP) * Di$$

Onde:

Do é o diâmetro do feixe *laser* expandido.

Di é o diâmetro do feixe *laser* inicial.

MP é conhecido como *Magnifying Power*.

Relação entre as distâncias focais das lentes

$$MP = fc / fd$$

fc é a distância focal da lente convergente.

fd é a distância focal da lente divergente.

Figura 2.18. Sistema expensor de feixe *laser* de Galileu. *F* representa o foco objeto da lente convergente e da lente divergente. *DL* é a distância entre as duas lentes. *DFC* é a distância focal da lente convergente. *DFD* é a distância focal da lente divergente. (LOPERA et al., 2011).

Esta técnica é complementada pela sincronização das imagens obtidas por filmagem com os oscilogramas de tensão e corrente. O método acopla as variações dos parâmetros de soldagem com as imagens da filmagem e possibilita correlacionar as informações das duas fontes. A figura 2.19 mostra imagens de oscilogramas e filmagem de alta velocidade de uma transferência por arco pulsado, com sincronização de tempo *t*.

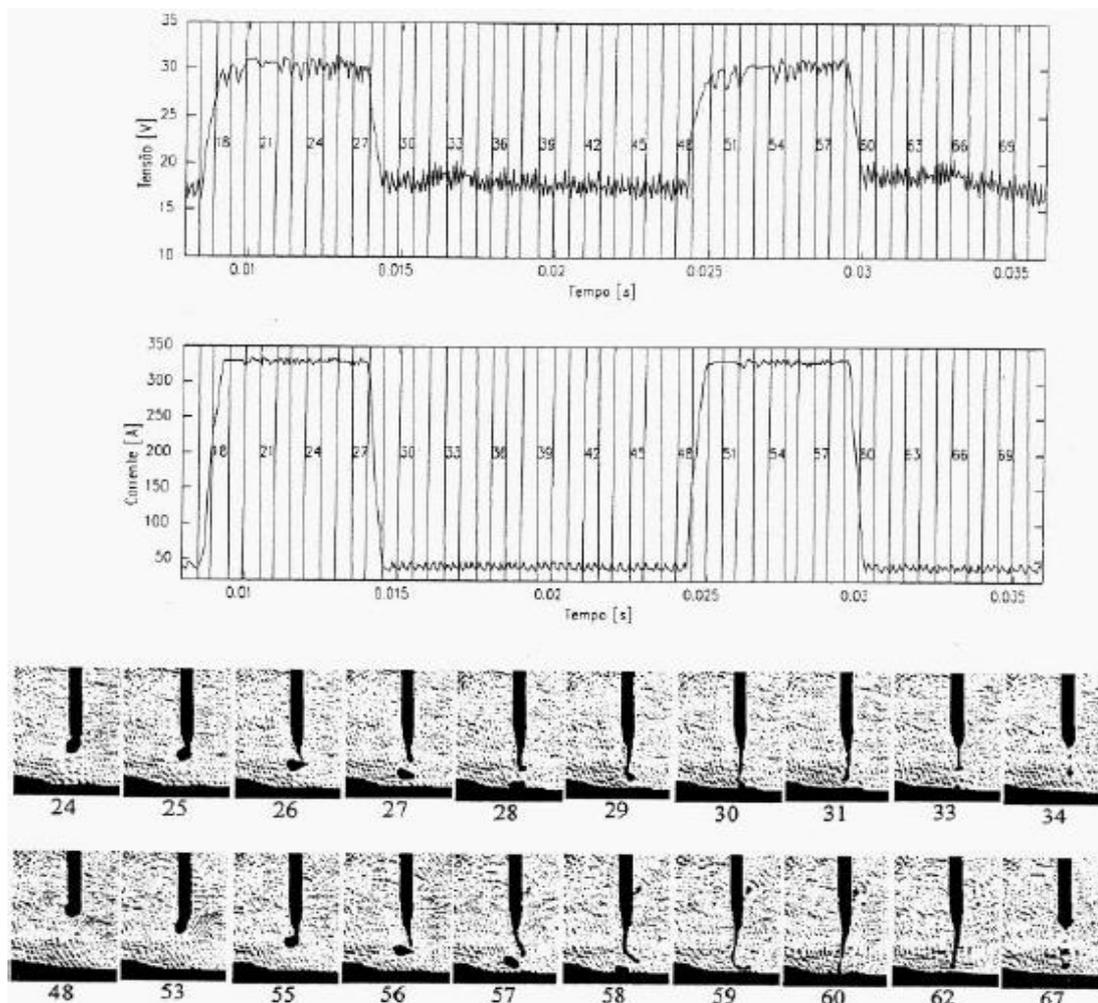


Figura 2.19. Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem em sincronismo com imagens de alta velocidade obtidos para uma transferência com arco pulsado (BÁLSAMO et al., 2000).

C) Pré-processamento da imagem

Em algumas imagens digitais é importante o pré-processamento melhorando suas características, as quais dependem do objetivo final que se pretende na imagem. Alguns processamentos tipicamente envolvem técnicas para o realce de contrastes, remoção de ruído e isolamento de regiões (GONZALES E WOOD, 2007).

Outros processamentos usados nas imagens digitais são a erosão, dilatação, limiarização, Filtros branco e preto, Gaussianos, e de Fourier. Também se pode realizar operações como suavização, equalização e a convolução de matrizes ou imagens, como, por exemplo, a multiplicação da imagem original com as imagens que tem aplicação de um ou

vários filtros, ou multiplicação entre as imagens com aplicação de um ou vários filtros. O processo de dilatação consiste em obter a reflexão sobre sua origem e depois deslocar esta reflexão de x . A dilatação de A por B é, então, o conjunto de todos os x deslocamentos. A erosão é a resta dos deslocamentos; a dilatação e a erosão são operações duais entre si e com comportamento inverso.

Por exemplo, Maia (2001) mostra em seu trabalho que após avaliar os resultados das filtragens espaciais e no domínio da frequência em imagens de transferência metálica em processos de soldagem GMAW, optou pela utilização dos filtros espaciais de suavização.

Os filtros no domínio espacial são aqueles que fazem suas operações diretamente sobre os pixels da imagem. Dois exemplos de filtros no domínio do espaço são o filtro de máscara Gaussiana e o filtro de Mediana. Utilizada como um filtro de suavização, a máscara de filtro de gaussiana é um filtro linear. Trucco (1998) apresenta algoritmos para construir cada um dos filtros. Os filtros podem ser filtros lineares ou não, nos primeiros o valor do pixel é dado pela convolução da imagem com uma máscara (kernel). O filtro de mediana é um filtro não linear, o valor do nível de cinza de cada pixel é substituído pela mediana dos níveis de cinza da imagem que estão na região da máscara daquele pixel. Para calcular a mediana na vizinhança da máscara, primeiramente é selecionado o tamanho da máscara, em seguida são ordenados num vetor em ordem crescente os valores dos níveis de cinza dos pixels da vizinhança, depois, é determinado o valor da mediana (valor da posição central do vetor) desses níveis, e finalmente, é atribuído ao pixel. Este método é bastante efetivo na remoção de pixels isolados.

2.5. PARÂMETROS DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR ARCO PULSADO

Conforme tratado anteriormente, para ter transferência metálica é necessário que a intensidade de corrente varie entre dois níveis, um inferior (I_b) e outro superior (I_p). Durante o nível superior é proporcionada a energia capaz de fundir uma porção de material de aporte e depositá-lo sobre a poça ou banho de fusão, como descreve Amin (1983).

Os parâmetros que caracterizam uma solda com transferência metálica por arco pulsado são: tempo de pulso ou de pico (T_p), intensidade de pulso ou de pico (I_p), intensidade de base (I_b) e frequência (f).

- **Tempo de pico (T_p)**

Refere-se ao tempo no qual é mantida a intensidade de pico (I_p), tendo em conta que uma soldagem ótima deve desprender uma gota por pulso, um tempo de pico inferior a este gera uma energia de pulsação insuficiente para formar e desprender uma gota por pulso ou um tempo superior gera a formação de várias gotas por pulso. Qualquer seja o caso, a qualidade da solda será menor.

- **Corrente de pico (I_p)**

É a intensidade do pulso que com o tempo de pico fornece a energia transferida no material para a formação da gota. Existem múltiplas combinações para conseguir o mesmo resultado, mas com diferentes características. Por exemplo, se a fonte de trabalho não pode dar uma corrente elevada, então, se incrementa o tempo de pulso.

- **Corrente de base (I_b)**

A corrente de base (I_b) tem como objetivo manter o arco aceso entre pulsações, porém sem fundir o material. Se o valor é elevado, aumenta, necessariamente, a intensidade média. Ao contrário, se o valor é baixo, o arco perde estabilidade e pode extinguir-se.

- **Frequência (Fr)**

Uma variação da frequência do pulso (Fr) gera uma variação do tempo de base (T_b), de modo que, se aumenta a frequência, aumentam os pulsos por unidade de tempo com igual tempo de pico e menor tempo de base. Da mesma forma, tem-se um aumento de quantidade de gotas por tempo, mas com a mesma quantidade de gotas por pulso. A demanda do material

faz com que se deva incrementar o aumento na velocidade de alimentação do arame. Do mesmo modo, uma diminuição da frequência exigirá uma diminuição da velocidade.

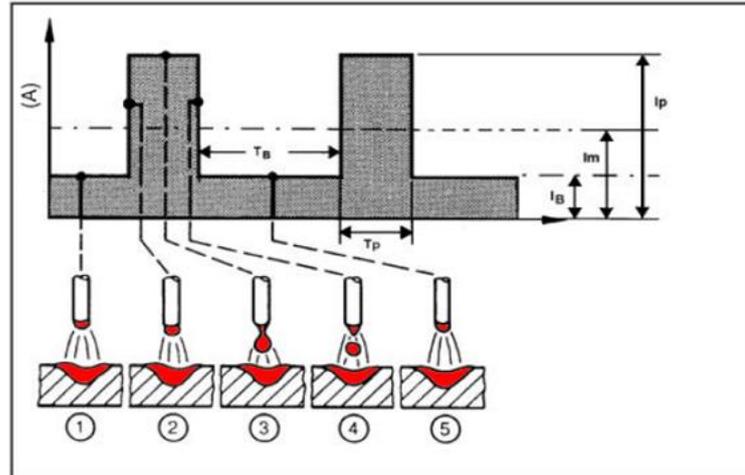


Figura 2.20. Variáveis do modo de transferência pulsado, com a energia de aporte e corrente média (área baixo a curva) (HURTADO A, 2004).

De acordo com Kim e Eagar (1993), estabelecem-se duas condições para garantir a ausência total de respingos na solda:

1. Só deve desprender-se uma gota do material por pulso. O momento em que se desprende a gota deve ser durante o tempo de base (T_b). Para cumprir esta condição, é necessário que a energia aportada ao material durante o pulso seja precisa.

2. O volume da gota deve ser equivalente ao diâmetro do eletrodo utilizado. O tamanho da gota depende da relação entre a velocidade de avance do fio e a frequência dos impulsos. Para conseguir o tamanho da gota adequado e manter o sincronismo com a velocidade de avance, é necessário que a frequência seja contínua e proporcional à velocidade de avance do eletrodo. A quantidade de material depositado no metal base é o produto do volume (V_g) da gota, pela frequência de pulso (Fr), ou o produto da área da seção transversal do eletrodo (s) por sua velocidade (v).

$$V_g.Fr = s.v \quad (2.2)$$

Admitindo que a gota desprendida é esférica, seu volume é dado pela expressão:

$$V_g = (4/3).\pi.r^3 \quad (2.3)$$

Por outra parte, a área da seção transversal do eletrodo é:

$$s = \pi.r^2 \quad (2.4)$$

Considerando: $(4/3).\pi.r^3.Fr = \pi.r^2.v$

colocando o diâmetro em função do raio, obtém-se, finalmente:

$$v = (2/3).d.Fr \quad (2.5)$$

Esta expressão proporciona o valor da velocidade de avance do eletrodo em função de seu diâmetro e a frequência de pulsação. Pode-se ver que, para um determinado diâmetro de arame, à medida que a frequência aumenta, também deve aumentar a velocidade de avance do arame.

2.5.1. Determinação dos parâmetros da transferência por arco pulsado

A determinação dos parâmetros da transferência por arco pulsado é baseada em critérios fundamentais, utilizando GMAW-P com arame tubular. Esses critérios são explicados brevemente, à continuação.

A) Critério de Burnoff para GMAW Pulsado

Por meio da metodologia proposta por Amin (1983) e Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998), baseada no critério de Burnoff ou de desprendimento da gota, são encontradas a velocidade do arame e a corrente média apropriada para este. A metodologia busca o equilíbrio entre a taxa de fusão do arame e da velocidade de alimentação do arame (V_a). Como a corrente média é proporcionalmente relacionada com a fusão do arame, são

estabelecidas medidas entre a corrente média (I_m) e a velocidade de alimentação do arame (V_a).

O critério de Burnoff consiste na construção de uma relação funcional para representar todas as condições possíveis dos parâmetros de pulso (I_p , I_b , T_p , T_b) associadas com uma corrente média (I_m). Esta relação inclui um espaço de trabalho, que abrange todas as combinações possíveis de parâmetros e representa uma região chamada Zona Paramétrica. Com esse critério e outros são analisados os dados de tensão e corrente, no modo de transferência convencional goticular ou spray, com um tamanho da gota com diâmetro próximo ou igual ao diâmetro do arame entre $(1.15 \cdot d)$ até $(0.9 \cdot d)$, que é o mais adequado para obter boas características geométricas no processo GMAW-P.

Uma vez selecionadas as melhores combinações, os valores obtidos de intensidade média (I_m) são postos em gráficos com suas respectivas velocidades de alimentação, obtendo-se uma relação como é representada na figura 2.21. Para GMAW-P, a corrente média pode ser calculada segundo a seguinte equação, usando os parâmetros registrados de cada ciclo:

$$I_m = (T_p \cdot I_p + T_b \cdot I_b) / (T_p + T_b) \quad (2.6)$$

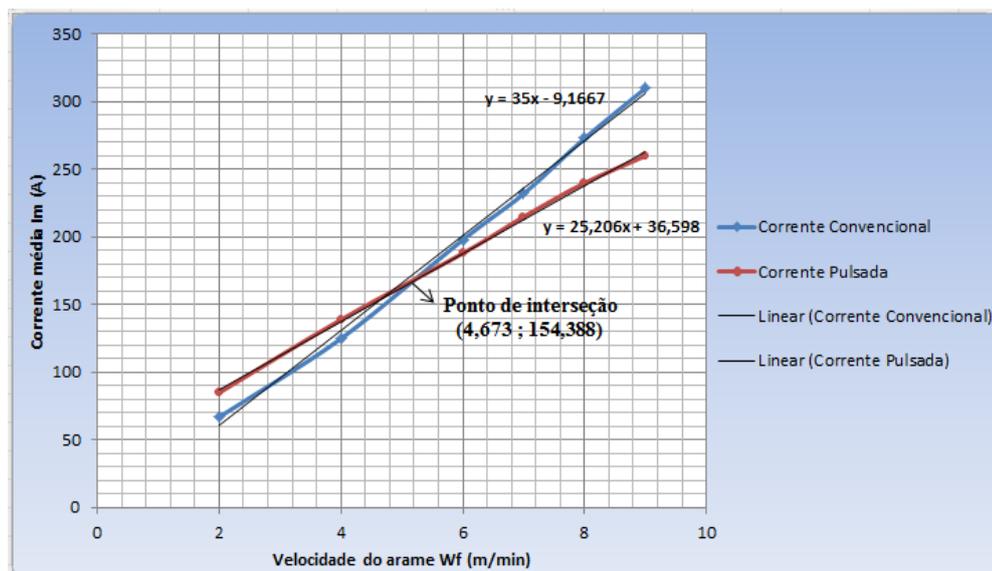


Figura 2.21. Critério de Burnoff para solda convencional e por arco pulsado. Adaptado do trabalho de Amin (1983) e Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998).

O ponto de interseção de ambas as retas indica a transição na transferência metálica. Este ponto pode ser visto no gráfico da figura 2.21. Em suas pesquisas, Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998) consideram o volume da gota igual ao produzido por uma esfera de diâmetro similar ao diâmetro do eletrodo, argumentando que, ao trabalhar com volumes de gotas maiores ao diâmetro do arame, pode-se favorecer a transferência curto-circuito e gerar respingos (AMIN, 1983).

Essa consideração pode ser traduzida por meio da seguinte equação:

$$V_g = (4/3).\Pi.r^3 \quad (2.7)$$

Onde: r = raio do arame (mm) e V_g = Volume da gota (mm^3).

De igual maneira, assume-se que o tempo do ciclo deve ser tal que produza uma gota por pulso com relação à velocidade do arame (V_a), produzindo a seguinte expressão:

$$T_c = 240.V_g / \delta.d^2.V_a \quad (2.8)$$

Onde: T_c = tempo de ciclo (ms) e d = diâmetro do arame (mm). δ = constante

Considerando o tempo do ciclo (T_c) como a soma do tempo de pico e do tempo base, e que a intensidade média pode ser descrita pela equação de uma reta, temos que:

$$T_c = T_p + T_b \quad (2.9)$$

$$I_m = \eta.V_a + K \quad (2.10)$$

Onde: η = coeficiente angular da reta e K = interseção com a ordenada.

Relacionando com a equação 2.6, aquela relação pode ser construída com um gráfico, conforme figura 2.22, em que se apresenta uma Zona Paramétrica. Nesta zona existe uma relação lineal entre I_p e I_b , sendo o valor mínimo possível o ponto em comum $I_m = I_p = I_b$.

Esta zona apresenta as múltiplas combinações entre I_p , I_b e T_p para uma I_m determinada, com a qual se garante uma condição de pulso que cumpre o Critério de Burnoff.

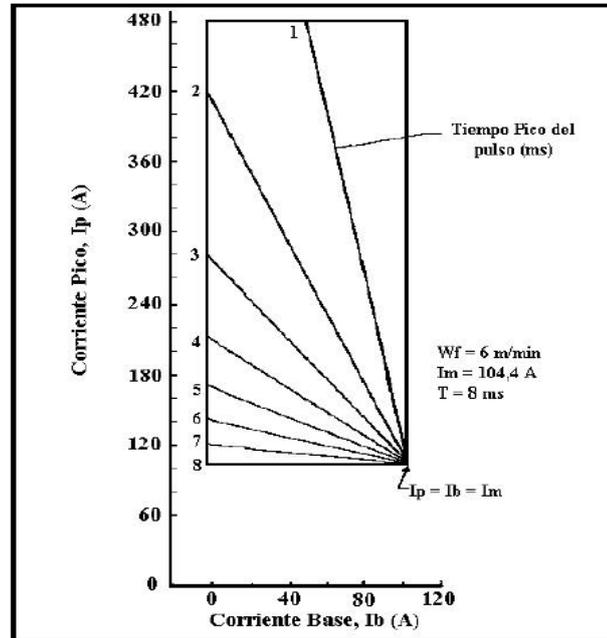


Figura 2.22. Zona Paramétrica baseada no Critério de Burnoff (HURTADO A, 2004).

B) Critério da transferência metálica

A equação 2.10 cumpre o critério de Burnoff. Entretanto, não necessariamente todas as combinações produzem uma transferência metálica do tipo goticular. Assim, esta zona tem que ficar delimitada para cumprir com esse critério, é por este motivo que é necessário levar em consideração duas limitações, conforme à continuação.

b1) Limitação da corrente de pico e da corrente de base

Nos trabalhos de Resende (2007), Modenesi e Avelar (1999), Amin (1983) e Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998) ressalta-se que uma parte importante nos critérios é realizar as soldas como testes dentro da Zona Paramétrica e os dados de cada uma delas devem ser registrados usando oscilogramas de maneira tal a poder distinguir os diferentes tipos de desprendimento de gotas por pulso, ou seja, uma gota, duas gotas, três gotas. O número de gotas que se desprendem por pulso pode ser observado na escala da tensão e está

representada pelos picos que se apresentam por cada pulso conforme figuras 2.23 e 2.24 tomadas do trabalho de (HURTADO A, 2004) onde se observa um só pico definido e às vezes a formação de outro pico menor ao lado, que pode ser uma oscilação da gota despreendida ou uma gota de diâmetro menor á primeira gota com diâmetro igual ao do arame. O único requisito que deve satisfazer os parâmetros de soldagem utilizados é que devem estar por cima da transferência spray, isto é, com valores de corrente média iguais ou superiores ao da corrente de transição. Para esta parte do estudo não podemos assumir um tamanho de gota igual ao diâmetro do arame, dado que os parâmetros tomados são aleatórios dentro da Zona Paramétrica (RESENDE, 2007).

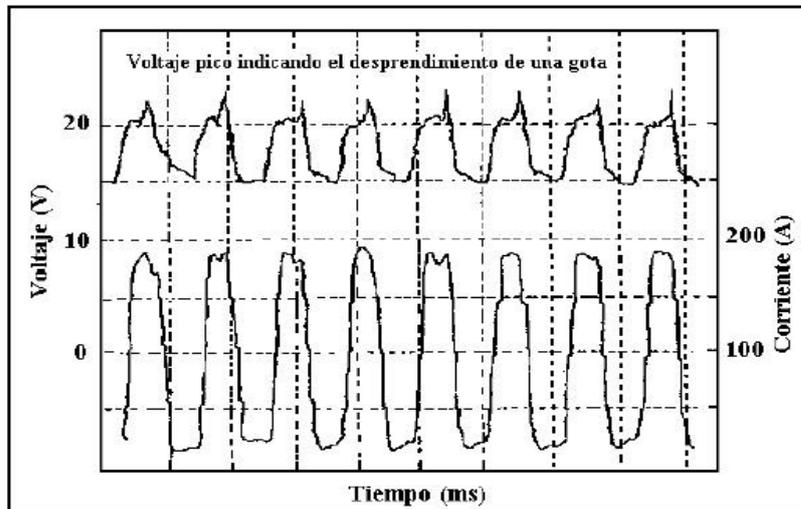


Figura 2.23. Oscilograma típico de corrente e tensão representando a separação dos picos de corrente entre cada pulso, produzindo uma gota por pulso (HURTADO A, 2004).

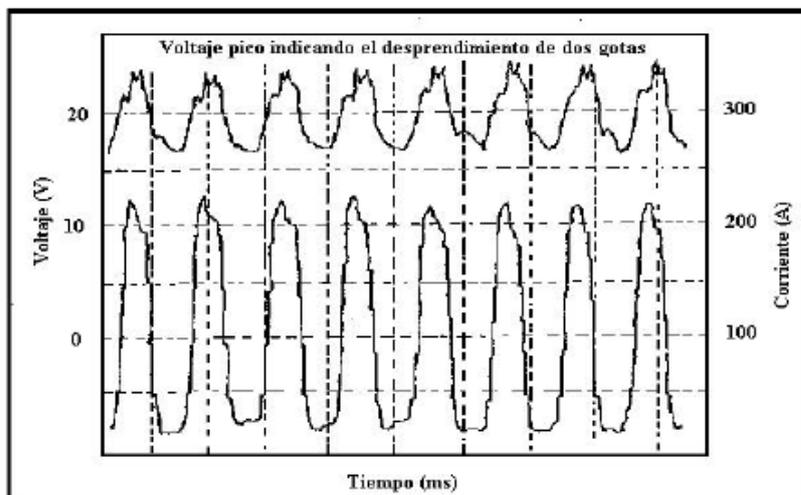


Figura 2.24. Oscilograma típico de corrente e tensão representando a separação dos picos de corrente entre cada pulso, produzindo duas gotas por pulso (HURTADO ADRIAN, 2004).

2.6. ESTABILIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM

A estabilidade de um processo de soldagem GMAW com eletrodo consumível tubular depende das condições do arco e de transferência de metal, além de vários outros fatores, como, por exemplo, as condições de alimentação do arame e as características da fonte de energia. Inicialmente, a estabilidade era avaliada apenas com base em características elementares do processo, tais como ruídos e respingos, atualmente, a estabilidade é avaliada fazendo-se uso de vários meios e técnicas.

A transferência mais utilizada na soldagem GMAW é a do tipo curto-circuito, devido às suas características. Para se avaliar a estabilidade neste modo de transferência, vários estudos foram feitos. Alguns desses estudos, baseados na frequência e no período de transferência, por exemplo, Modenesi e Avelar (1999), Baixo (1990) e Baixo e Dutra (1991), utilizaram o período de transferência de metal (T) para avaliar a estabilidade. Este período apresentaria um valor mínimo para determinados valores de tensão, em que o processo seria mais estável. Modenesi e Avelar (1999) mostraram que esta condição corresponderia a de menor volume de respingos gerados com esta forma de transferência.

Segundo Hermans e Ouden (1999), as principais causas de instabilidade na transferência por curto-circuito são: curtos-circuitos instantâneos, falha na reignição do arco e variações na velocidade de alimentação. Esses autores utilizaram outro critério para avaliar a estabilidade. A estabilidade seria maior quando a frequência de curto-circuito estivesse sincronizada com a oscilação do metal líquido na poça de fusão.

No trabalho de Resende (2007), nas transferências globular e aerossol ou goticular, a estabilidade pode ser avaliada, por exemplo, pelo nível de respingos e pelo desvio-padrão da corrente ou da tensão. No caso da transferência aerossol, o processo é, em geral, bastante estável, com geração baixa de respingos e desvio-padrão de corrente ou tensão muito baixo. Já a transferência globular é mais instável do que a aerossol, com níveis de respingos e desvios-padrão maiores devido ao tamanho das gotas. A figura 2.25 mostra aspectos de uma pequena parte de um oscilograma de tensão com transferências globular, aerossol e aerossol com alongamento. Nesta figura, podem-se observar as diferenças de variação da tensão para três tipos de transferências.

Quinn, Madigan e Siewert (1994) também associam possíveis instabilidades do processo às variações na velocidade de alimentação do arame devido ao desgaste do tubo de contato. Esse tipo de problema é mais comum na soldagem com corrente elevada.

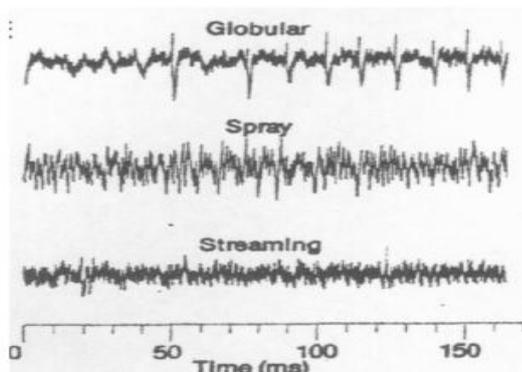


Figura 2.25. Oscilogramas de transferências globular, aerossol ou goticular e aerossol com alongamento ou *streaming*. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O₂ (JONSON et al., 1991).

2.7. ANÁLISE DE SINAIS COM A TRANSFORMADA DE FOURIER

A série de Fourier permite descrever sinais periódicos como uma combinação de sinais harmônicos (sinusoides). Com essa ferramenta, podemos analisar um sinal periódico em termos de seu conteúdo de frequência ou espectro, também permite estabelecer a dualidade entre o tempo e a frequência, de modo que as operações no domínio do tempo tenham a sua dupla no domínio da frequência. Usando operações de vetores podem-se calcular os coeficientes de Fourier correspondente a um sinal, em que o vetor n contenha os índices dos coeficientes e o vetor cn contenha os coeficientes.

Quanto maior for o número de harmônicas utilizadas na expansão em série de Fourier, melhor a reconstrução do sinal. Para a presente pesquisa, com a Transformada Rápida de Fourier pode-se reconstruir os sinais de saída, identificar as frequências representativas do sinal e procurar falhas na solda usando o sinal de entrada gerado na fonte com a análise para sinais periódicas na saída e com o uso de filtros diferentes, identificar falhas nos oscilogramas de tensão e corrente. A análise permite separar as mudanças na sinal periódica, identificando o ponto da falha ou mudança de um parâmetro no processo de soldagem, para esta pesquisa foi usado filtros de média, mediana, passa-alto (*highpass*), passa-baixo e finalmente ampliando os resultados da análise para uma melhor observação.

3. METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1. METODOLOGIA

Para conseguir uma solda que apresentasse boas características geométricas e que pudesse ter boa reprodutibilidade no processo necessário à indústria e, ainda, que cumprisse o objetivo de alcançar boas características para a reparação de peças de aço, especialmente no que se refere ao preenchimento de superfícies erodidas formadas por cavitação, o presente estudo iniciou-se com a busca dos parâmetros aceitáveis para uma boa geometria do cordão com um arame tubular ESAB OK TUBROD 410 NiMo (MC), utilizado, geralmente, em peças de aço inoxidável martensítico que propõem boas características metalúrgicas e microestruturais (SANTOS, 2013).

No entanto, com o objetivo de economizar custos e devido à dificuldade de se obter peças com aços inoxidáveis martensíticos, esta pesquisa foi baseada, inicialmente, na busca de parâmetros em um aço doce (AISI 1020). Como avaliação da metodologia proposta e para determinar parâmetros de soldagem numa base de aço utilizada em turbinas, foram feitos testes em peças de aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA-6NM, com o qual são feitas muitas das pás de turbinas. Para as análises dos parâmetros iniciais em GMAW-P, aplicou-se os critérios para este aço, fez-se a análise de Burnoff e se utilizou uma análise empírica baseada nos dados coletados com o aço anterior (AISI 1020).

Para a busca de parâmetros com o aço doce (AISI 1020) foram adaptadas metodologias baseadas em critérios de transferência metálica e de estabilidade. Com isso, foi possível encontrar parâmetros aceitáveis numa faixa amostral, utilizando cálculos matemáticos e as metodologias empíricas de observação e avaliação, citadas no capítulo anterior, diminuindo a faixa de valores de trabalho para parâmetros como corrente média, corrente de pico, corrente de base, tempo de ciclo ou pulso, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem, indutância, para obter uma solda com boas características.

Outros aspectos da pesquisa que devem ser destacados são a técnica de transferência metálica utilizada e a quantidade de energia e calor de aporte para a transferência metálica. Também é relevante ressaltar que o resultado desses dados ou valores de parâmetros foi

avaliado em diferentes partes do processo mediante a técnica de perfilografia para a análise de gotas, tipo de transferência e quantidade de gotas por pulso, utilizando, para tanto, uma câmera de alta velocidade CMOS. Os oscilogramas foram avaliados utilizando-se programação feita em MatLab, ação que auxiliou na análise da estabilidade da solda, aporte calórico, energia por pulso e durante o processo e corrente média. Já a análise de Fourier foi utilizada para determinar tanto instabilidades como falhas no processo por mudanças de intensidade e frequência do sinal obtido. Por último, foram estudadas as técnicas de preenchimento, superposição entre cordões e formação de camadas.

Devido às suas características de controle em um processo, baixo aporte calórico e boas características geométricas na solda, em qualquer posição, esta pesquisa foi baseada na transferência metálica GMAW-P. No entanto, cabe ressaltar que, inicialmente, foram utilizadas as técnicas de transferência convencional para melhor entendimento e estudo dos parâmetros.

Esta pesquisa foi composta por três fases ou etapas:

Etapa 1 – Busca de uma boa geometria do cordão e de parâmetros iniciais para o modo de transferência GMAW-P: Nesta etapa, buscou-se parâmetros com características estáveis no processo de soldagem e que apresentassem boas características geométricas no cordão de solda, determinou-se os diferentes modos de transferência, em especial, o modo goticular perto do ponto da corrente de transição, já que é o valor e o modo usado na transferência GMAW-P de interesse para esta pesquisa.

Etapa 2 – Avaliação e análise dos dados: Nesta etapa com os dados iniciais encontrados na Etapa 1, determinou-se dentro da faixa desses valores encontrados uns testes para baixa e alta energia, com variação de parâmetros como corrente de pico, corrente de base, corrente de separação das gotas, frequência de pulso, tempo de pico, tempo da corrente de separação das gotas, indutância, velocidade de arame, velocidade de soldagem e tensão. Fez-se diferentes testes dentro de uma faixa de valores e se analisou cada um dos testes com diferentes técnicas tanto para sinais de corrente e tensão como para imagens obtidas pela técnica de perfilografia, determinando por inspeção visual e mediante outras medições os cordões com melhor geometria, relacionando estes com os parâmetros de entrada.

Etapa 3 – Já com os dados avaliados e analisados, foi estudada a superposição entre cordões, formação de camadas e características no preenchimento usando para isto um buraco retangular.

3.2. FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

A figura 3.1 mostra o fluxograma com as principais etapas da metodologia, posteriormente cada etapa é ampliada nas figuras 3.2; 3.3; 3.4; e 3.5 cada uma delas com fluxogramas específicos.

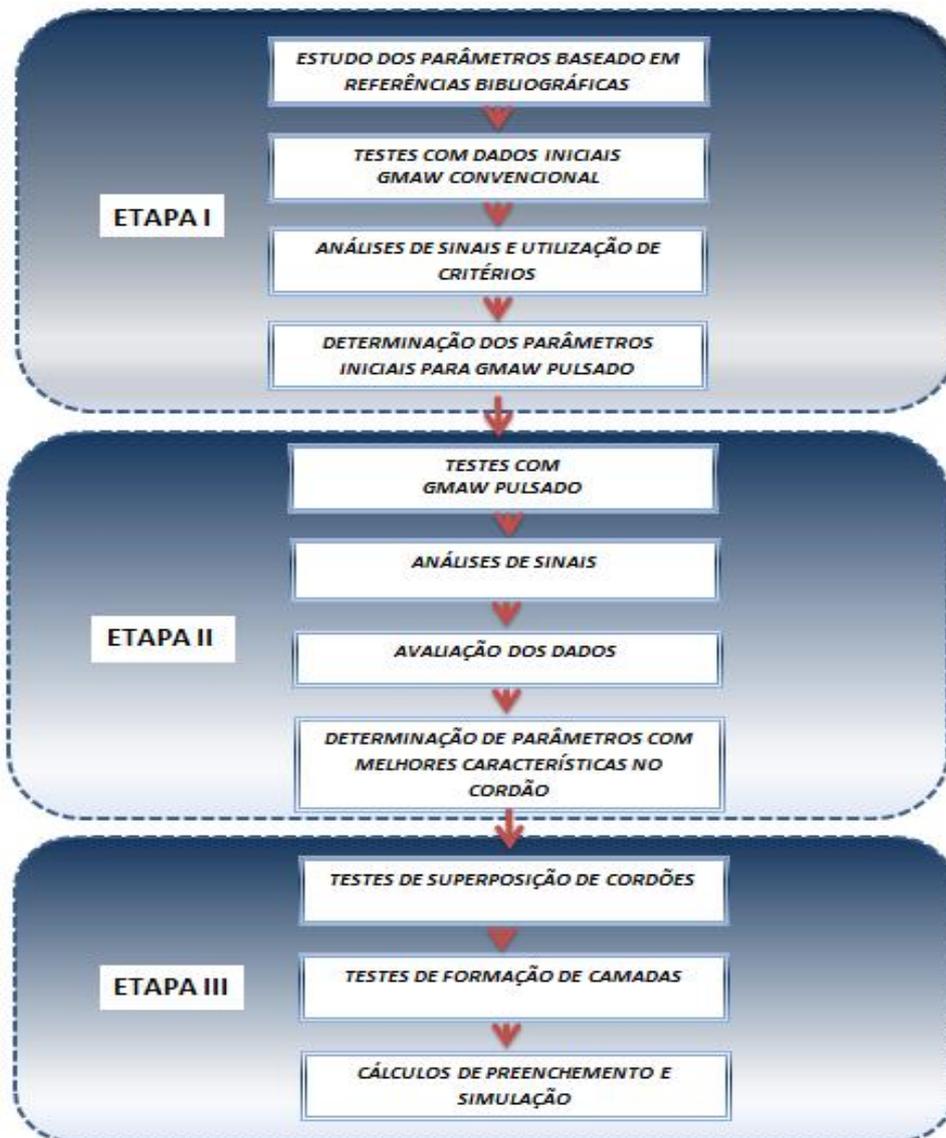


Figura 3.1. Metodologia preliminar geral para obter os melhores parâmetros, cordões e camadas.

A figura 3.2 apresenta a metodologia geral da etapa I com GMAW Convencional, para encontrar os parâmetros iniciais utilizados posteriormente na técnica GMAW-P.

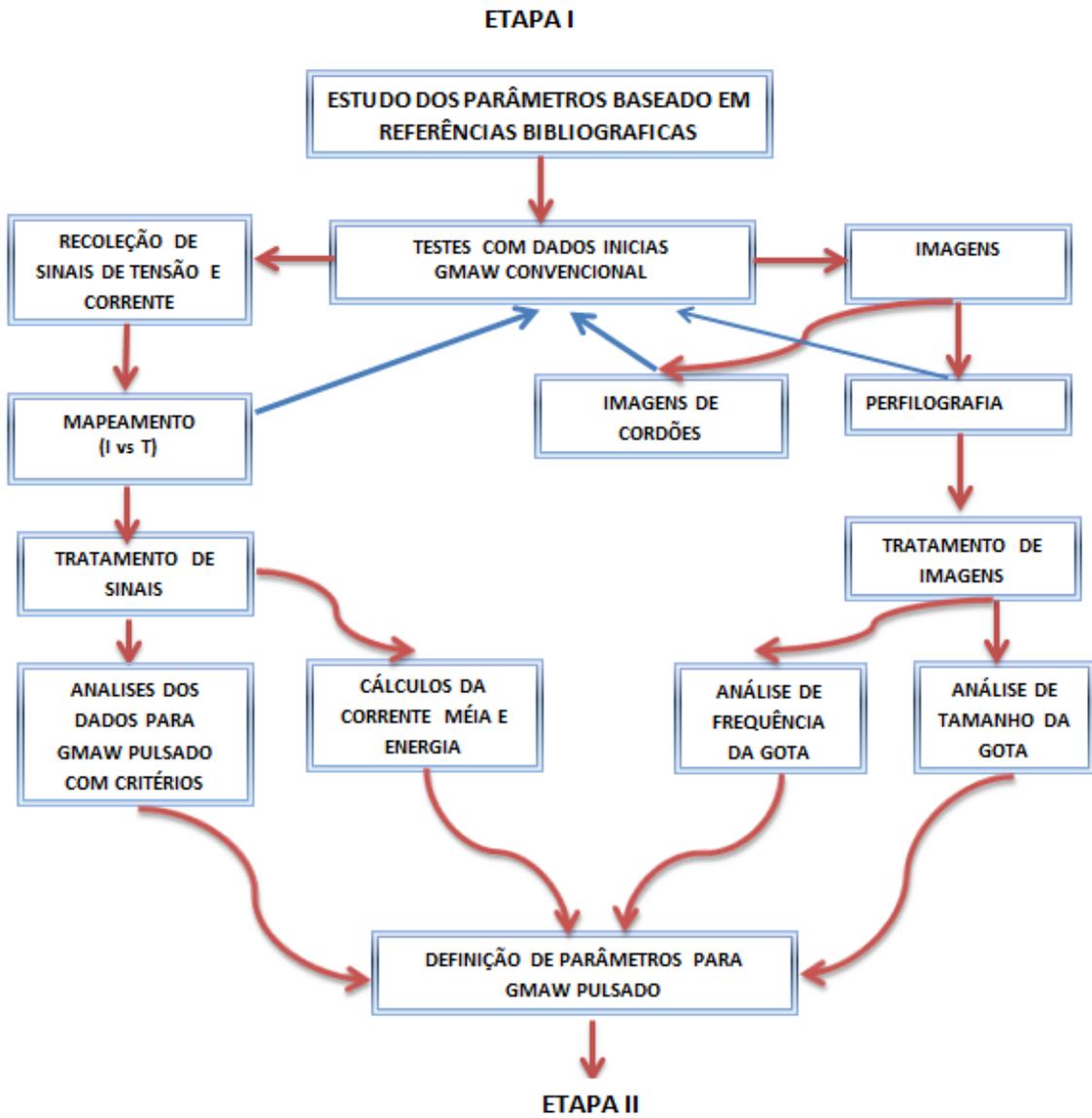


Figura 3.2. Metodologia preliminar de análise para obter os parâmetros iniciais de trabalho para GMAW-P.

A figura 3.3. apresenta a metodologia experimental na etapa I para a geração de um só cordão.

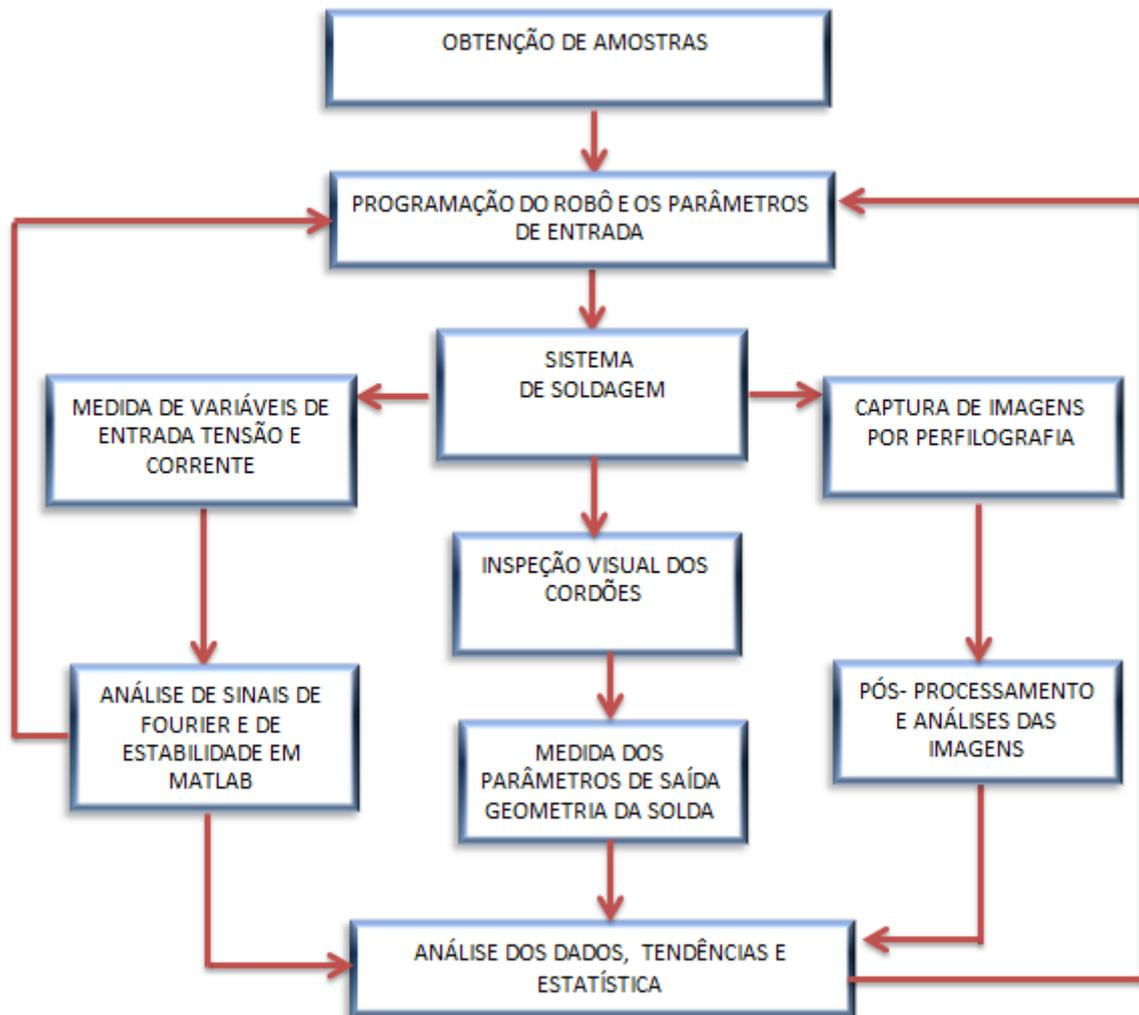


Figura 3.3. Método experimental para obter os parâmetros iniciais de um só cordão.

Na figura 3.4 apresenta a metodologia geral da etapa II para obter parâmetros mediante a técnica GMAW-P, a partir dos diferentes testes realizados e com análise dos dados e das imagens até obterem-se os parâmetros finais com os quais se alcançou melhor geometria do cordão e estabilidade no processo.

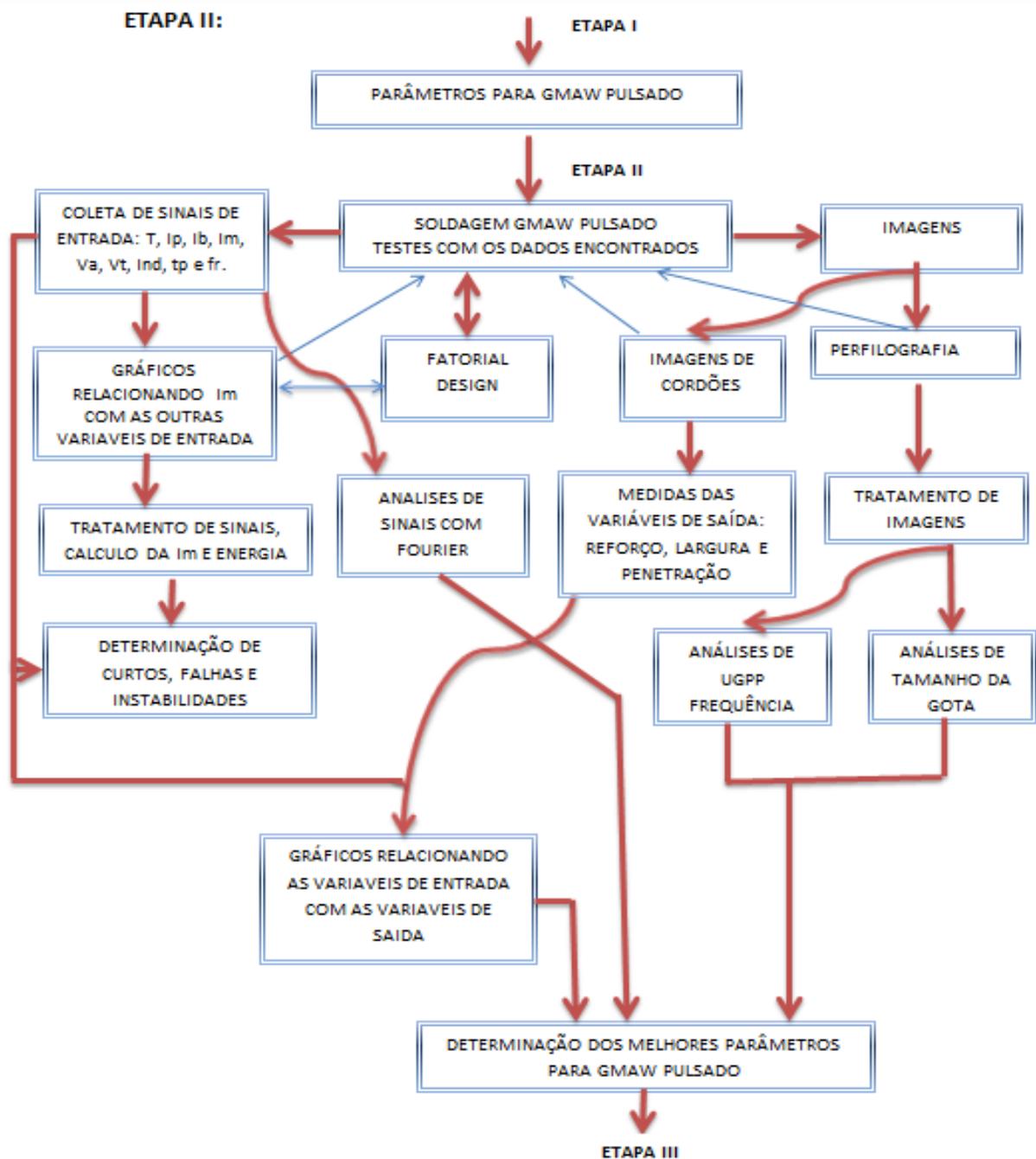


Figura 3.4. Metodologia preliminar para obter bons parâmetros em GMAW-P e sua avaliação com análises da geometria do cordão e os parâmetros de saída.

Na figura 3.5. é possível visualizar a metodologia experimental da etapa II para a geração de uma camada.

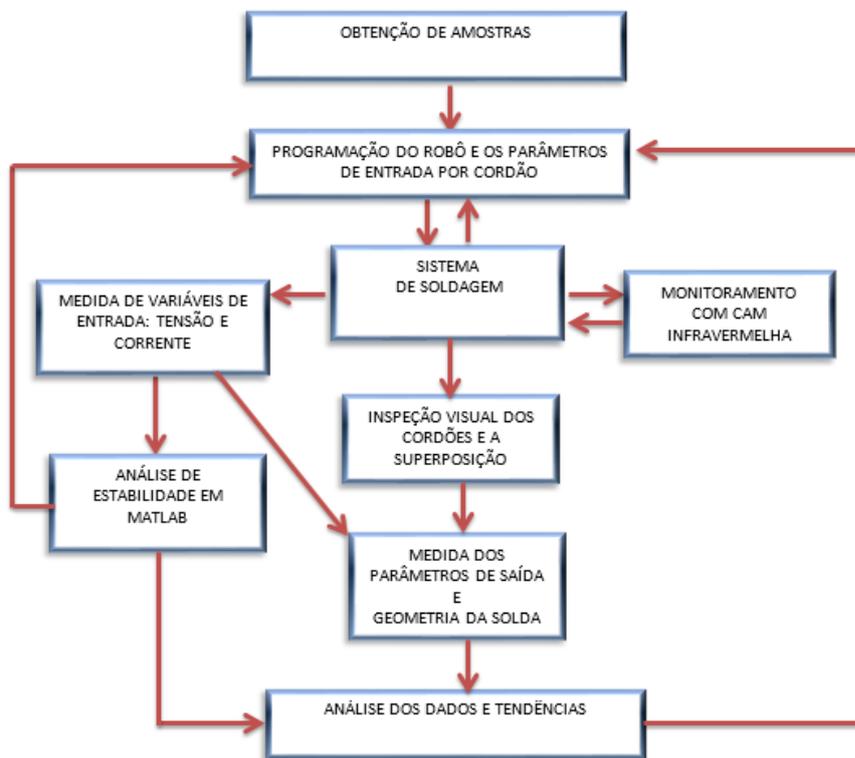


Figura 3.5. Método experimental para obter uma camada.

A figura 3.6 apresenta a metodologia geral da etapa III para o estudo e obtenção de uma boa superposição e boas camadas.

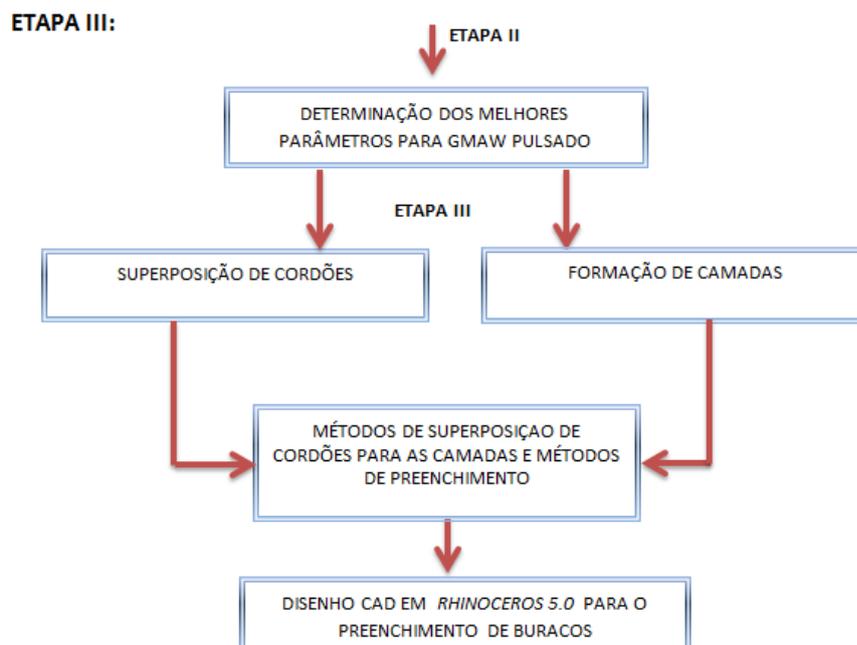


Figura 3.6. Metodologia para obter camadas por meio de superposição de cordões.

3.3. MATERIAIS, EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL

3.3.1. Corpos de prova e consumíveis

Foram utilizados corpos de prova de aço doce (AISI 1020) cortados a partir de uma barra chata de 6,35mm (1/4 pol.) de espessura e 200mm x 50mm de comprimento e largura, respectivamente, previamente limpados e esmerilados, para deposição de cordões sobre chapa, de modo a reduzir o custo experimental.

O material de adição empregado ou eletrodo consumível foi o arame tubular de 1,2mm de diâmetro ESAB OK Tubrod 410 NiMo (MC).

O gás de proteção empregado foi Stargold Plus, mistura gasosa industrial especializada para soldagem MAG, constituída, nominalmente, por 94% de argônio e 6% de CO₂. Foi usada uma Fonte Fronius TRANS PLUS SYNERGIC 5000.

Tabela 3.1. Composição do material de base e de aporte.

COMPOSIÇÃO	%C	% Mn	% S	% P	%Si	%Cr	%Ni	%Mo
Aço doce (AISI 1020) Material de base 1	0,18-0,23	0,30-0,60	0,050	0,04	0,04	0	0	0
Aço inoxidável ASTM A743 Grado CA6NM	0,03-0,06	< 1,0	< 1,0	< 0,03	<0,025	11,5-14,0	3,5-4,5	0,4-1
Aço TUBROD 410 NiMo (MC). Material de aporte (eletrodo)	0,03	0,8	0	0	0,4	12,0	4,9	0,6

O arame utilizado é do tipo *metal cored* com fluxo interno metálico, e contém 13% de Cr, 4% de Ni, e 0.4% de Mo (GONÇALVES, 2007). Este arame é utilizado, principalmente, em revestimentos no modo de transferência por curto-circuito com gases de proteção à base de argônio, geralmente com misturas de 98%Ar-2%CO₂ ou 96%Ar-4%CO₂, as quais, neste caso, não favorecem a transferência goticular porque ao interagir os desoxidantes presentes no arame com o gás de proteção e a poça de fusão, dificultam a criação de óxidos no metal de base e com eles a emissão de elétrons da chapa para o arame.

3.3.2. Fonte de soldagem

A fonte de soldagem utilizada foi a TRANS PLUS SYNERGIC 5000, digital e multiprocesso (SMAW, GTAW e GMAW). No processo GMAW a fonte trabalha no modo tensão constante e a manipulação da fonte é feita com um computador industrial por meio de uma interface para robôs ROB 5000. A soldagem foi feita com o robô PS 130/6 – 5-P da ABB Robotics e a programação para um ou vários cordões com o Interface ROB 5000, controlador RCU 5000 e programação feita com o Software Sport S3.



Figura 3.7. Fonte Fronius e robô de soldagem ABB Robotics

3.3.3. Sistema de aquisição de dados

Para o armazenamento de dados e/ou imagens, como, por exemplo, os dados de corrente e tensão, além das imagens obtidas mediante a técnica de perfilografia, utilizou-se o computador industrial da marca ADVANTECH, de referência ICP-622, que contém uma placa de aquisição de dados PCI *Eagle 703S* encarregada de adquirir os sinais elétricos do processo, além de ser responsável por realizar a comunicação entre o computador e a interface ROB 5000, que divide suas tarefas na comunicação fornecendo um tempo de leitura e resposta dos dados com a fonte de soldagem. A fonte é controlada por um robô, cuja

programação foi feita em *Sport S3*. A aquisição dos sinais é feita por meio de um programa desenvolvido no *software* de instrumentação virtual LabVIEW, no caso das medidas de corrente e tensão. A manipulação da fonte para perfilografia tem uma placa de aquisição de dados adicional que grava 10.000 dados por segundo, no caso da perfilografia, o programa feito por meio da placa também é encarregado de manipular a mesa de deslocamento linear.

3.3.4. Montagem para a captura de imagem por perfilografia

A técnica de perfilografia realizada nesta pesquisa utilizou um expensor ótico composto por uma lente divergente e uma convergente. O sistema utiliza um laser de He-Ne (Hélio - Néon).

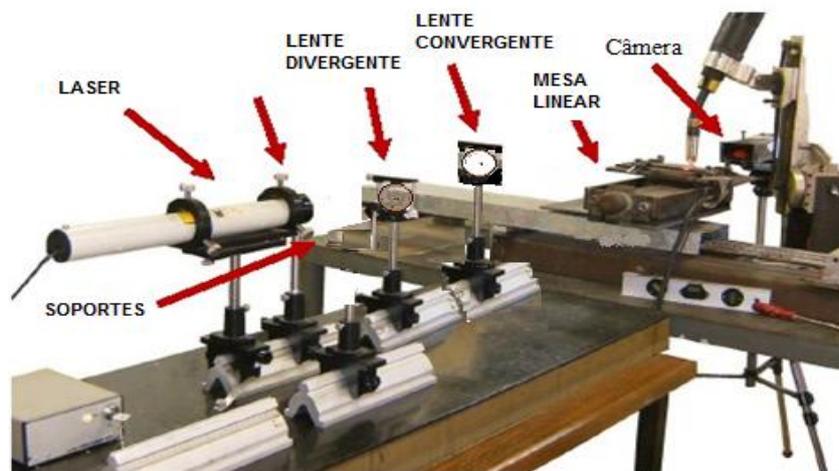


Figura 3.8. Bancada experimental para aplicação da técnica de perfilografia.

A lente divergente possui o comprimento focal (f_d) de 40mm. Pode-se observar que na primeira lente divergente encontra-se um expensor de feixe laser de Galileu, já a segunda lente, que é convergente, deixa a luz laser com um raio constante. A distância entre a segunda lente e o arame é de 70 cm, e a distância entre a câmera e o arame de 40 cm.

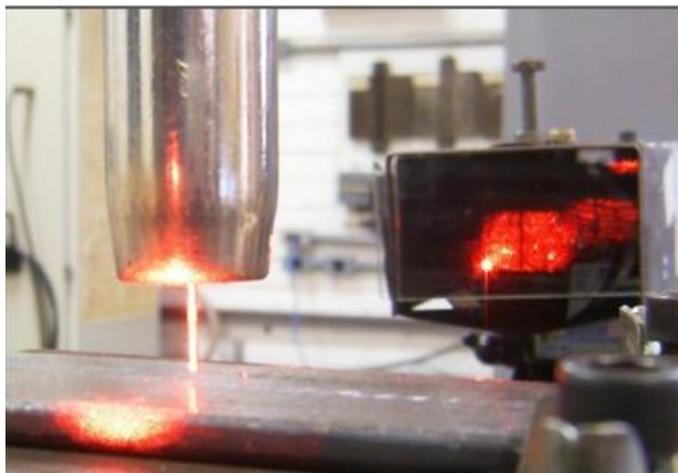


Figura 3.9. Iluminação do arame-eletrodo com o feixe laser expandido (Imagem adaptada do trabalho de LOPERA JESUS, 2010).

Para adquirir as imagens, a câmera faz uso de um programa desenvolvido por estudantes da UnB, Franco (2007), adaptado neste trabalho com uma lente divergente e uma lente convergente e com controle da mesa adaptado por Lopera, Jesus (2010), implementado em linguagem C na plataforma Microsoft Visual Studio 2005, o qual, a partir de um arquivo de configuração da câmera, executa uma captura durante um período determinado e cria um conjunto de arquivos contendo, em cada um, o quadro capturado pela câmera e um arquivo com o vídeo gerado pelas imagens capturadas. Foi utilizada uma câmera DALSA modelo DS-21-001M150 de tecnologia CMOS, monocromática com 256 níveis de cinza, que é de baixo custo em relação a outras utilizadas em monitoramento de processos de soldagem. O arquivo de configuração é gerado a partir de um programa fornecido pelo fabricante chamado *CamExpert*, a partir do qual são testadas e definidas todas as características do processo de captura.

3.4. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS INICIAIS NO PROCESSO GMAW PULSADO

3.4.1. Processos de soldagem

Conforme já explicitado no início desta pesquisa, um processo de soldagem, para ser empregado com sucesso na recuperação automatizada de superfícies danificadas por cavitação em turbinas hidráulicas, deve possuir as seguintes características:

- Depositar camadas isentas de defeitos de soldagem;
- Ter possibilidade de aplicar o processo com elevada taxa de deposição e em todas as posições de soldagem;
- Ausência de respingos e salpicos na formação de depósitos;
- Fácil abertura do arco elétrico;
- Produzir camadas de solda com excelente acabamento superficial.

A operação de deposição robotizada por soldagem apresenta uma série de vantagens em relação ao processo manual, tais como: melhor uniformidade e qualidade da soldagem; redução significativa dos defeitos de soldagem e da quantidade de material consumido; diminuição do tempo consumido; redução do custo; redução do tempo de permanência de pessoas em local insalubre (WAINER et al., 1992).

Atualmente, os processos de soldagem aplicáveis que mais se aproximam dessas características ideais são o MIG e o Plasma com alimentação automática de arame. O processo MIG, convencional ou pulsado, utiliza eletrodo consumível e apresenta maiores níveis de taxa de deposição e de velocidade de soldagem (WAINER et al., 1992).

Os parâmetros propostos inicialmente em soldagem pulsado, empregados na posição plana ou horizontal para o recobrimento de superfícies com uso do arame tubular de aço inoxidável ESAB OK Tubrod 410 NiMo (MC) de 1,2mm de diâmetro sobre o aço doce 1020, são apresentados na Tabela 3.2, a seguir. Estes parâmetros para GMAW-P são baseados principalmente nos dados encontrados com os diferentes critérios trabalhados em GMAW Convencional explicados mais adiante, e com a programação previa na fonte para o Arame com dopante de Ni tanto em GMAW Convencional quanto GMAW-P, a distância entre o bico de contato e a peça, diâmetro do arame e gás de proteção foram escolhidos com as referências utilizadas no capítulo 2.

Tabela 3.2. Parâmetros Iniciais.

<i>Parâmetros variáveis</i>	<i>Parâmetros fixos</i>
Velocidade de soldagem: $V_t = 6$ a 12mm/seg	A distância entre o bico de contato ou tocha e a peça (DBCP): 15mm
Velocidade de alimentação do arame: $V_a = 2$ a 8 m/min	
Frequência de pulsação: $F_r = 55$ a 300 Hz	Ângulo da tocha respeito da vertical: 0°
Corrente de pico: $I_p = 300$ a 450 A	
Corrente de base: $I_b = 15$ a 80 A	Diâmetro do arame: $1,2\text{mm}$
Corrente separadora de gotas: $I_s = 50$ a 110 A	
Indutância: 0 a 50%	
Tempo de ciclo ou período: $T_c = 1/F_r$	<i>(Stand Off)</i> Distância do bocal com a peça: 12mm
Tempo de base: $T_b = 40$ a $50\% T_c$	
Tempo de pico: $T_p = 40$ a $50\% T_c$	Gás proteção: Argônio + 6% de dióxido de carbono (CO_2), Vazão 15 lt/min
Tempo de pulso separador de gotas: $T_s = 0$ a $0,8\text{ ms}$	

*Ver Figura 4.73 da montagem experimental das distâncias ou parâmetros fixos entre a tocha e a peça.

3.4.2. Forma do pulso

Para escolher uma sequência de pulsos em GMAW-P, geralmente, é escolhida uma onda retangular com um pulso, mas dificilmente a onda de saída é retangular. Devido à indutância da fonte, sempre a onda tem pulsos mais estreitos na parte superior e grossos na parte inferior. Para uma indutância muito alta a onda terá forma de “dente de serra”, às vezes é utilizado outro pulso pequeno para ajudar a gota formada a cair mais rapidamente. Para a presente pesquisa, foi utilizada uma onda retangular com indutância 0 e 10% da indutância total da fonte, com um pulso em cada ciclo e também com uma combinação de dois pulsos em cada ciclo.

3.5. CRITÉRIOS PARA DETERMINAR PARÂMETROS NO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA GMAW PULSADO

Nesta etapa da pesquisa, e de acordo com outros trabalhos citados anteriormente, determinou-se que o maior controle durante a soldagem, com maior estabilidade e menor consumo de energia, é feito mediante a técnica GMAW-P. Além disso, determinou-se que, para chegar a parâmetros aceitáveis com menos testes, é importante trabalhar com critérios, tais como o critério de Burnoff ou de desprendimento da gota, o critério de transferência metálica e os critérios de avaliação de parâmetros para GMAW pulsado.

Para essa primeira parte do trabalho, de busca dos melhores parâmetros, foi seguida uma metodologia referenciada por Amin (1983), Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998) e Romero, S. P. (2012). Com essa metodologia, e os critérios de Burnoff ou de desprendimento da gota, foram encontradas a velocidade do arame e a corrente média apropriada para este arame. A metodologia proposta por Amin (1983) procura o equilíbrio entre a taxa de fusão do arame e a velocidade de alimentação do arame (V_a). Como a corrente média é proporcionalmente relacionada com a fusão do arame, são estabelecidas medidas entre a corrente média (I_m) e a taxa de alimentação do arame (V_a).

O critério de Burnoff apresentado no item 2.5.1 descreve o critério como a construção de uma relação funcional para representar todas as condições possíveis dos parâmetros de

pulso (I_p , I_b , T_p , T_b), associadas com uma corrente média (I_m), junto com todas as combinações possíveis de parâmetros numa região chamada Zona Paramétrica.

Por meio deste critério e outros foram analisados os dados de tensão e a corrente no modo de transferência spray ou goticular, procurando por meio das análises e com a técnica de perfilografia um tamanho da gota próximo ou igual ao raio do arame, que é o mais adequado para obter boas características geométricas no processo GMAW-P e evitar respingos e mudanças na geometria da solda.

Também foram feitas outras análises, de acordo com o critério da transferência metálica, além de cálculos de energia de aporte e energia efetiva necessária para obter uma gota por pulso, bem como foram realizados gráficos paramétricos procurando valores limites de corrente de pico e tempo de pico mais apropriado.

3.5.1. Determinação da zona da corrente de transição (transferência entre globular e goticular)

Foi feita a programação do robô e da fonte para o processo de soldagem em GMAW Convencional e GMAW-P, utilizando-se o Robô IRB 2000 AW da ABB Robotics para fazer um cordão inicialmente de 5 cm de comprimento no mapeamento em GMAW Convencional e para testes posteriores cordões de 10 cm, guardando os dados obtidos para cada um deles com seus valores e suas variâncias. Os valores de tensão e corrente, principalmente, são importantes para o mapeamento dos modos de transferência dos dados de corrente e tensão coletados por meio do computador com um dispositivo de aquisição de dados da *National Instruments*. A tocha do robô e seus movimentos foi programada e controlada por uma Interface ROB 5000 controlador RCU 5000 com programação feita no Software Sport S3, em uma Fonte *TRANS PULS SYNERGIC* 5000. Os parâmetros de soldagem foram ajustados com o controle remoto da fonte RCU 5000.

A fonte foi programada para fazer diferentes cordões variando os valores de tensão, inicialmente uma varredura de tensões na transferência convencional, iniciando com a transferência curto-circuito até goticular projetada. Trabalhou-se com dois comprimentos da distancia bico de contato ate a peça. (DBCP = 12mm e DBCP = 15mm).

A) Mapeamento e estudo dos tipos da transferência e regiões do trabalho ótimas na transferência convencional

Foi feita uma varredura de corrente e tensão com a distância entre o bico de contato e material base (DBCP) 15mm e 12mm, com uma velocidade de alimentação do arame de 6m/min a 8m/min e velocidade de soldagem de 10mm/seg. Foram tomados valores de corrente para diferentes grupos de soldas feitas com tensões que variam entre 18 e 36 volts, a uma taxa de 1 volt.

Através da perfilografia foi verificada a transferência metálica nos diferentes grupos, mostrados na figura 3.10, com os símbolos CC “curto circuito”, G “globular” e S “spray ou goticular”, e os números 1 para DBCP 12mm e 2 para DBCP 15mm. Os grupos mais importantes analisados, nesta pesquisa, foram as regiões G2 “transferência globular e globular repulsiva”, com gotas de raios maiores do que o raio do arame e DBCP 15mm, e Sg.2 “transferência goticular”, com tamanho da gota de diâmetro 1,2 a 0,9 vezes o tamanho do diâmetro do arame. Nesta pesquisa, buscaram-se valores de corrente e tensão onde o tamanho da gota fosse igual ao raio do arame, que são mais indicados na transferência GMAW-P, portanto é necessário ter o modo de transferência goticular cerca da corrente de transição entre o modo de transferência globular e goticular. Os outros casos de transferência metálica GMAW Convencional no estudo dos parâmetros para GMAW-P são indicados na figura 3.10, com as siglas CC1 “transferência por curto circuito com alta corrente, baixa energia, velocidade de arame 6 m/min e valor DBCP 12mm”, CC2 “transferência por curto circuito, baixa corrente, alta energia, velocidade de arame 4 m/min e valor DBCP 15mm”, G1 “transferência globular e globular repulsiva com baixa tensão e comprimento de arco pequeno”, Sga2 “transferência goticular com alongamento” e Sgr2 “transferência goticular rotacional e explosiva com alta corrente e alta energia” (RAJASEKARAN, KULKARNI E MALLYA, 1998; LOPERA, 2011; EASSA et al., 1983; SLANIA, 1996).

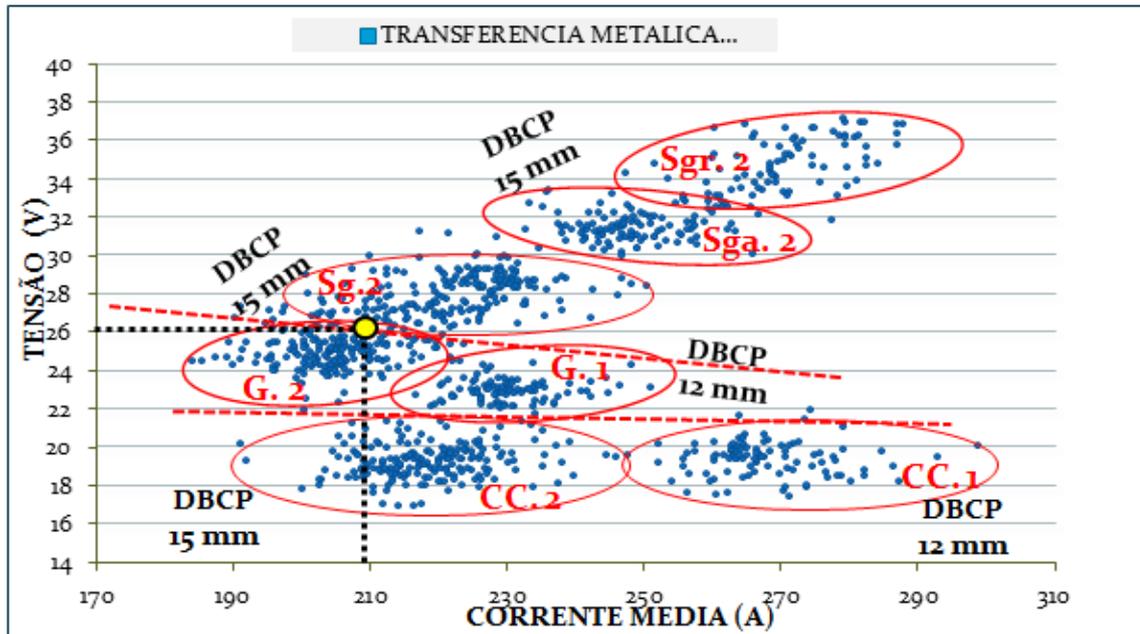


Figura 3.10. Mapeamento para os tipos de transferência de metal de acordo com a tensão e a corrente. Seleção de regiões por tipo de transferência de metal, Região Curto-Circuito (18 a 22 v) “CC”. Região Globular (22 a 26v) “G”; Região Goticular ou Spray (26 a 36v) “Sg”.

A primeira análise mostra um valor ótimo para a tensão em GMAW-P, entre 24v e 28v, obtendo gotas de raio aproximadamente igual ao raio do arame, com a corrente de transição entre 190A e 220A para a transferência convencional. O ponto adequado para trabalhar em GMAW-P deve ser a corrente de transição ou a interseção dos grupos globular (G2) e goticular (Sg2) indicado com valor de 26v e 199A na figura 3.10.

3.5.2. Critério de Burnoff

Buscando satisfazer ao critério de Burnoff, foram feitos cordões inicialmente utilizando GMAW Convencional e, posteriormente, GMAW-P para diferentes velocidades de alimentação de arame. Cabe ressaltar que os parâmetros foram ajustados para obter um arco estável. Para cada velocidade de alimentação (V_a) foi registrado o valor da corrente média (I_m) e foram feitos gráficos (V_a versus I_m), conforme abaixo.

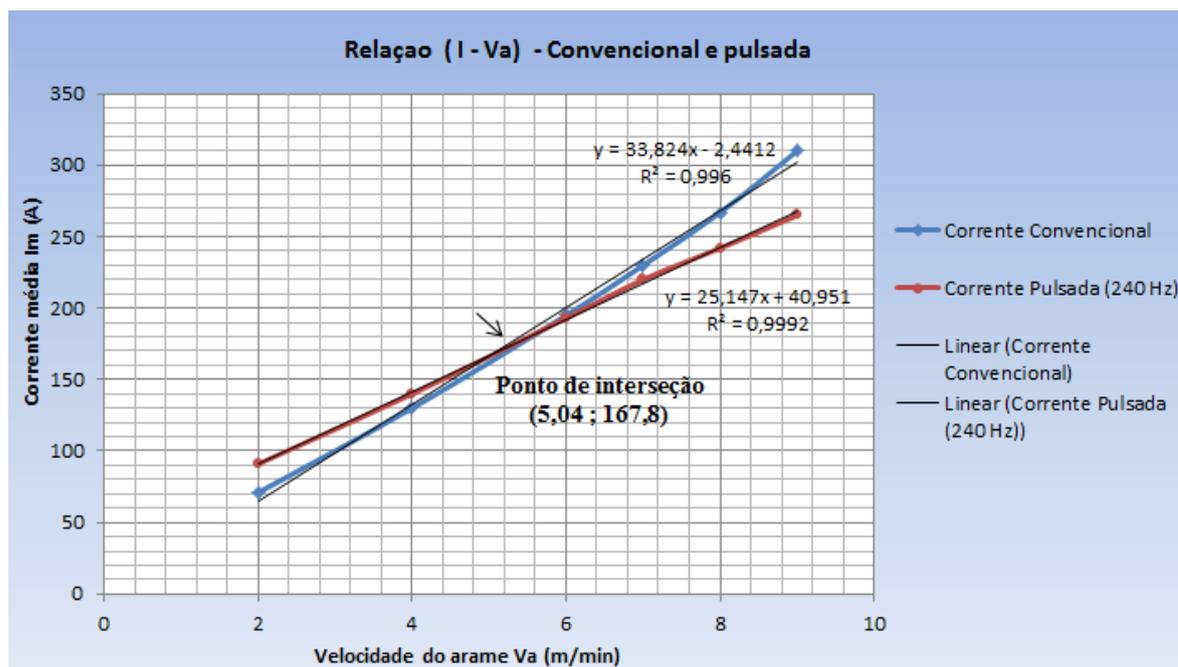


Figura 3.11. Ajuste de pontos por linhas retas e busca de sua interseção para as curvas Va “versus” Im obtidas para o processo convencional e pulsado.

A interseção das linhas, na figura 3.11, e com base nos critérios de Burnoff, determina o valor da corrente média para obter uma transferência spray estável com tamanho do diâmetro da gota próximo ao diâmetro do arame e com a velocidade mínima de alimentação para esta corrente. Também pode-se observar que, para GMAW-P, a corrente média para valores maiores é muito menor que para GMAW Convencional, indicando, assim, uma economia de energia. Agora, nesse ponto da interseção, o processo é estável e, por baixo desse ponto, há muita instabilidade tanto para GMAW-P quanto para GMAW Convencional. Por cima desse ponto, se tem mais estabilidade e a penetração da poça de fusão se incrementa junto com a energia, desta maneira o ideal é trabalhar com correntes maiores ao ponto de interseção embora próximo daquele, entre 170 e 240 A.

Na transferência convencional, necessita-se de valores mais altos de corrente média para obter uma transferência goticular ou spray. Já para pulsado, pode-se obter com valores menores de corrente média, mas quando os valores de corrente são muito baixos, há instabilidade, respingos na solda e uma geometria do cordão não aceitável. Portanto, pode-se manter a corrente média durante o processo de arco pulsado em valores um pouco mais baixos, diminuindo a energia, mas eles têm de estar muito próximos do ponto de interseção encontrado para ter uma boa estabilidade. Ainda conforme a figura 3.11, o ponto no qual se

espera melhor estabilidade na transferência e tamanho da gota com raio igual ao tamanho do raio do arame na transferência GMAW-P possui velocidade de alimentação de 5,04 m/min e corrente média com valor de 167,8 A. Esses valores podem ser ainda diminuídos em pulsado, apresentando uma corrente média muito mais baixa. Entretanto, se baixarmos muito o valor da corrente, a instabilidade e formação de respingos na solda serão cada vez maiores. Por outro lado, se aumentamos a corrente média, aumentam-se o calor gerado, a penetração da poça e o fluxo do material. Se o aumento da corrente for ainda maior, a transferência goticular é convertida em transferência goticular projetada, com muita instabilidade no processo.

Nesta pesquisa, foram analisados grupos localizados abaixo e acima do ponto de interseção para confirmar as afirmações anteriores, utilizando velocidades de alimentação do arame de 5, 6 e 7m/min com correntes médias de 175, 188 e 200A. As correntes médias apresentaram-se altas em função da densidade e do ponto de fusão do arame. Entretanto, a corrente acima de 167,8 amperes é necessária para uma boa estabilidade.

Conforme também a figura 3.11, e os valores encontrados, podem-se determinar domínios paramétricos, entretanto, deve-se considerar que o nosso atual sinal de entrada é uma onda quadrada, cuja função para a corrente média na transferência GMAW-P é:

$$I_m = (T_p \cdot I_p + T_b \cdot I_b) / (T_p + T_b) \quad (3.1)$$

Onde: I_m = Corrente média, T_p = Tempo de pico, I_p = Corrente de pico, T_b = Tempo de base, I_b = Corrente de base.

3.5.3. Critério de transferência de metal

Rajasekaran, Kulkarni e Mallya (1998), em sua pesquisa, consideram o volume da gota igual ao produzido por uma esfera “Eq. (3.2)”, onde r = raio do arame (mm) = 0,6mm e V_g = Volume da gota (mm³).

$$V_g = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3 ; \quad V_g = 0,90478 \text{mm}^3 \quad (3.2)$$

Sabemos, também, que a quantidade de material depositado sobre o metal de base é o produto do volume (V_g) da gota pela frequência do pulso (Fr), ou o produto da área da seção transversal do eletrodo (s) com a velocidade de alimentação do arame (V_a). Ou seja:

$$V_g \cdot Fr = s \cdot V_a \quad (3.3)$$

Onde: $V_g = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3$ e $s = \pi \cdot r^2$

Substituindo V_g e s em (3.3): $(4/3) \cdot \pi \cdot r^3 \cdot Fr = \pi \cdot r^2 \cdot V_a$

Finalmente, é obtido:

$$V_a = (2/3) \cdot d \cdot Fr \quad \text{ou} \quad Fr = 3 V_a / (2d) \quad (3.4)$$

Com uma velocidade de 100mm/s do arame calcula-se a frequência mínima com a qual deve ser derretida cada gota que tem um raio igual ao raio do arame.

$$Fr = 3 * 100 / (2 * 1.2) \text{ então};$$

$$Fr = 125\text{Hz} \quad \text{e} \quad T_c = 8\text{ms}$$

Portanto, uma gota deve ser derretida e cair cada 8ms ou cair com uma frequência de 125Hz, entretanto, se as gotas são menores e o calor fornecido é maior, a frequência deve ser mais alta. Assim, para uma gota menor com uma energia maior, tem-se mais estabilidade. Para isso, os valores adequados de tempo e frequência são:

$$\text{Para } 6 \text{ ms } Fr = 166,7\text{Hz}; \quad \text{Para } 5\text{ms } Fr = 200\text{Hz};$$

$$\text{Onde: } TC = T_p + T_b \quad (3.5)$$

Para a realização das zonas paramétricas com velocidade de arame de 100mm/s ou 6m/min o valor escolhido de corrente se fez com a reta de GMAW-P da Figura 3.8 que tem um valor de 190A, outras retas de GMAW-P tanto para aço doce como aço martensítico mostram para 6m/min valores similares de corrente entre 190A e 200A, mas para minimizar a energia e o valor de corrente média nos pulsos para os testes em GMAW-P iniciamos com 180A e $V_a = 6\text{m/min}$.

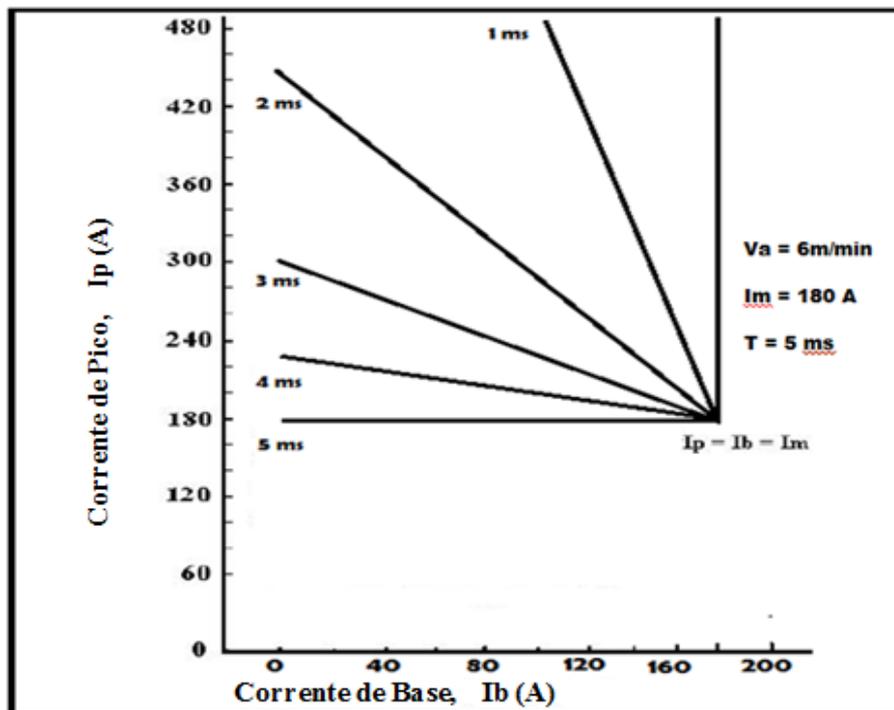


Figura 3.12. Zonas paramétricas de acordo com o critério de Burnoff ($Fr = 200\text{Hz}$).

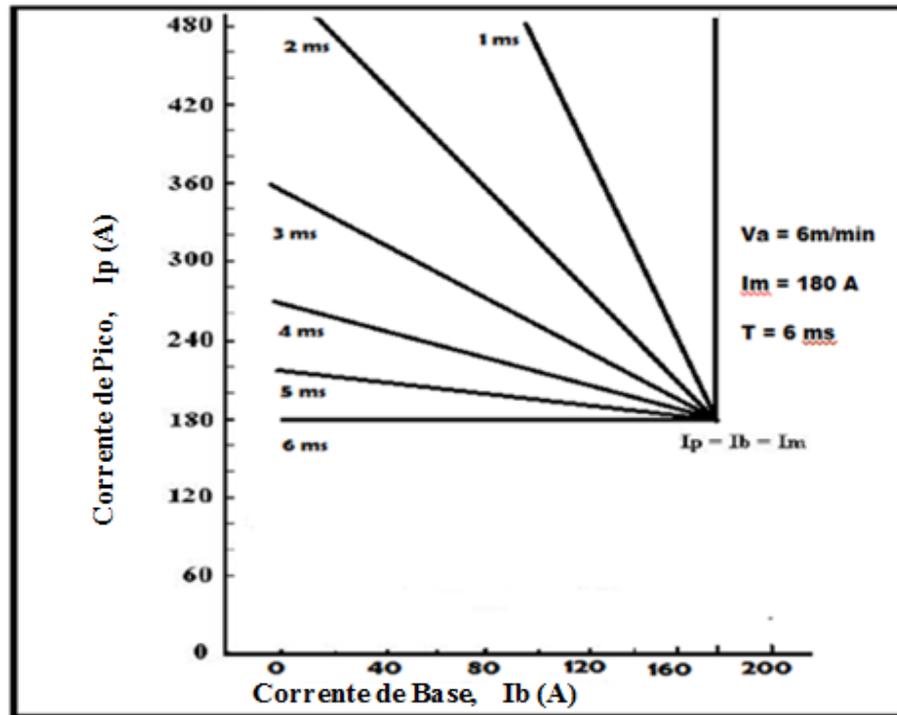


Figura 3.13. Zonas paramétricas de acordo com o critério de Burnoff ($Fr = 166,7\text{Hz}$).

3.5.4. Critério de energia efetiva e energia de fusão

O aporte calórico e quantidade de energia por gota por ciclo e no cordão são muito importante no estudo das características do cordão, isso devido à relação proporcional da energia por gota com a frequência no GMAW-P. Portanto, esta análise foi realizada para determinar a corrente de pulso e a frequência necessária, para alcançar a fusão do arame, na obtenção de um cordão com boas características, considerando a energia liberada e a energia eficaz.

De acordo com (SWIFT-HOOK, 1973; OKADA, 1977; DUPONT, 1995 e SMARTT, 1985) o aporte calórico na poça e no arame depende da eficiência e os gradientes de temperatura durante o processo, portanto, para este trabalho foi escolhido o valor de 85% da eficiência de energia consumida no processo para o calor fornecido no arame e na poça e um 15% de energia dissipada ou calor liberado por condução, convecção, radiação e energia dissipada por luz e som.

Agora desses 85%, o calor fornecido para o eletrodo com catodo positivo se distribuí 75% no catodo, arame e na ponta de ele e um 25 % na poça. (FUERSCHBACH, 1996; RYKALIN, 1951; FUERSCHBACH, 1998)

$\left\{ \begin{array}{l} 65\% E = \text{Calor fornecido para o arame e o gás (plasma); } 20\% E = \text{Calor fornecido na poça;} \\ 10\% E = \text{Calor liberado para o meio por condução, convecção e radiação;} 5\% E = \text{Luz e Som.} \end{array} \right.$

Onde E é: Energia Total gerada na fonte e Q: Calor;

A energia dissipada no processo de soldagem = 35%;

A energia efetiva = 65%

Portanto:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{dissipado}} + Q_{\text{fusão do arame}} = 30\% E_{\text{total}} + 65\% E_{\text{total}}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{dissipado}} + m \cdot C_e \cdot \Delta T$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{dissipado}} + m \cdot C_e \cdot \Delta T \quad (3.6)$$

Onde: m = massa do arame fundido, C_e = Calor específico e ΔT = Variação de temperatura.

Onde: 65 % Q_{total} = calor de fusão de arame para formar uma ou várias gotas por ciclo = $m \cdot C_e \cdot \Delta T$.

Cálculo para a fusão de uma gota de raio 1,2mm: A energia necessária para fundir uma gota ou várias gotas de volume (V_g) foi calculada como se segue: Raio da gota igual a raio do arame ($R = 0,6\text{mm}$);

$$V_g = 4/3 \pi * R^3 = 4,1888 * (0,6)^3 = 0,9047808\text{mm}^3 \quad (3.7)$$

Sabendo a densidade do arame, pode-se analisar a massa fundida com C_e e Q .

Para uma gota por pulso: Foi encontrado o valor de calor de fusão necessário, de acordo com os valores acima, e usando as equações de potência e energia para o cálculo. A tensão (T_e) usada foi de 26v , com uma frequência de 240Hz , com a qual se tem mais estabilidade nos testes e melhor geometria do cordão.

$$\text{Potência 1: } (P1) = 380 * 26 = 9880\text{w}; \text{ Potência 2: } (P2) = 80 * 26 = 2080\text{w}.$$

$$E = P1 * T_p + P2 * T_b \quad (3.8)$$

Conhecendo o tempo de ciclo $T_c = 1/F_r = 0,004167$ segundos ou $4,167\text{ms}$, e o tempo de pico $T_p = 2,5\text{ms}$, é possível saber o tempo de base T_b e a energia E .

$$T_b = T_c - T_p = 1,67\text{ms}$$

Por conseguinte, a energia é: $E = 28,1736 \text{ J}$.

$$\text{E a massa da gota: } M = D * V_g = 3,7\text{gr/cm}^3 * 0,0009047808\text{cm}^3 = 0,003347689\text{gr}.$$

Onde D = Densidade e V_g = Volume da gota

$$Q_{total} = 95\% (E. total) = 26,7649 J = \mathbf{26,76J};$$

$$Q_{fus\tilde{a}o} = 65\% (E. total) = 28,1736 * 0,65 J = 18,3128 J = \mathbf{18,31J} \text{ por ciclo.}$$

Essa energia é distribuída 33% no plasma e 67% na fusão da gota com um valor de (12,268J).

Com os valores da densidade do arame, ponto de fusão, raio do arame e assumindo formação esférica para o cálculo de volume da gota com raio igual ao raio do arame e com os dados encontrados na anterior análise, pode-se calcular a corrente de pico e corrente de base com o processo inverso. Agora tendo em conta que a área por baixo da curva de um ciclo completo de corrente positiva entre 0A e o valor da corrente durante tudo o ciclo em função do tempo, representa a corrente media dada pela integral:

$$I_m = \frac{1}{T_p + T_b} * \left(\int_0^{T_p} I_p \cdot dt + \int_{T_p}^{T_p + T_b} I_b \cdot dt \right)$$

$$\text{ou da equação 3.1 } I_m = (T_p \cdot I_p + T_b \cdot I_b) / (T_p + T_b)$$

Também, pode-se calcular a energia média por ciclo, calculando a geração de calor por efeito Joule no choque de elétrons com os átomos e partículas do material e do gás, e calculando as dissipações de calor por condução, convecção e radiação, assim com os dados da energia efetiva se pode calcular o tempo para a fusão de uma gota, portanto temos já os valores de corrente de pico, corrente de base e o tempo de cada ciclo para a formação de uma gota por pulso. Usando a mínima energia para fundir só uma gota por ciclo os cálculos indicam que é possível ter diferentes valores de corrente de pico e corrente de base para volumes diferentes de arame, portanto uma ferramenta útil é a programação em MatLab para encontrar valores mínimos.

3.5.5. Critério de estabilidade do arco

Este critério faz limitar o pico de corrente (I_p) e tempo de pico (T_p). Determina as condições de corrente de base e tempo de base mais adequada para estabelecer a relação I_p versus T_p na transferência goticular ou spray.

Para isso, foram feitos vários testes nos limites onde se estingue o arco e foram determinados os limites máximos de corrente que podem ser utilizados. O manual do fabricante foi consultado, mas a corrente máxima usada foi 400A, para obter um bom cordão, e tendo ainda como base a análise acima obtida. Cabe ressaltar que a fonte tem capacidade máxima de 500A.

3.5.6. Determinação de parâmetros de Destacamento (kV)

Utilizando GMAW Convencional e procurando obter o modo de transferência spray, são registrados valores de I_m para cada V_a , obtendo, desta maneira, os tempos entre sucessivos desprendimentos de gota subsequentemente à obtenção do valor modal da gota DTM e volume modal da gota VMD para cada velocidade de alimentação ($VMD = 0,913-1,35mm^3$), com a construção de gráficos foi determinado o parâmetro de destacamento KV.

3.5.7. Determinação de corrente de pico, tempo de pico e frequência

Encontrados todos os parâmetros com os critérios acima descritos, realizou-se uma análise relacionando a energia efetiva e a corrente média, tendo em conta os limites de corrente e tensão. Também fez-se uma análise de valores para corrente de pico, corrente de base, tempo de pico e a frequência para os testes posteriores e a determinação dos melhores valores dos parâmetros para obter as características desejadas na geometria do cordão. Cabe ressaltar que devem ser consideradas as características visuais nos cordões feitos e os métodos de avaliação.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo é iniciada a análise de resultados dos primeiros sinais com a técnica GMAW Convencional, por meio dos quais foi feito o mapeamento mostrado na figura 3.7 do capítulo anterior. Outras análises foram feitas para os sinais e os métodos de avaliação tanto para GMAW Convencional quanto para GMAW-P. Em seguida foram analisados os sinais e dados da técnica GMAW Convencional, depois foi feito um resumo dos dados seguindo os critérios de análises utilizados no capítulo anterior para finalmente fazer as análises para GMAW-P.

4.1. ANÁLISE DE SINAIS DA TRANSFERÊNCIA GMAW CONVENCIONAL

Foi feita a coleta de dados para o mapeamento mostrado na figura 3.7 do capítulo anterior e uma varredura de sinais de corrente e tensão, onde analisou-se a estabilidade e fez-se uma filmagem mediante a técnica de perfilografia. Fez-se ainda análise para identificar cada sinal, dentro de cada tipo de transferência, analisou-se o comportamento dos oscilogramas, comparando-se os resultados com as análises feitas para as imagens por perfilografia, nas quais foi feito o processamento com filtros e técnicas programadas em MatLab.

4.1.1. Análise de estabilidade e identificação do modo de transferência metálica mediante oscilogramas

Para determinar o comportamento na estabilidade no processo de soldagem foi necessário escolher pontos acima e abaixo do ponto central, encontrado inicialmente com os oscilogramas cujo valor foi de 26v, velocidade de arame 7m/min e DBCP 15mm, tendo como base a varredura e os dados da figura 3.7 no capítulo anterior. Todas essas análises foram avaliadas e confirmadas pela técnica de filmagem com perfilografia.

Tabela 4.1. Varredura de dados para o teste com perfilografia, variando tensão e velocidade de arame em relação ao ponto central (26v, velocidade de arame 7m/min e DBCP 15mm).

TENSÃO	Va 1	Va 2	Va 3
18	5.5	-	-
20	6	-	-
22	6	-	-
24	6	7	-
26	7	8	9
28	7	8	-
30	10	-	-
31	12	-	-

Inicialmente, a varredura foi feita desde o modo curto-circuito até o goticular rotacional, o qual foi denominado Va1; depois, foram feitos três testes com velocidade de arame um pouco maior no modo goticular, sendo este o grupo Va2; e no final foi feito um teste no valor central, no modo goticular, porque este apresentou mais estabilidade, e o valor escolhido para este teste foi 26v, denominado Va3.

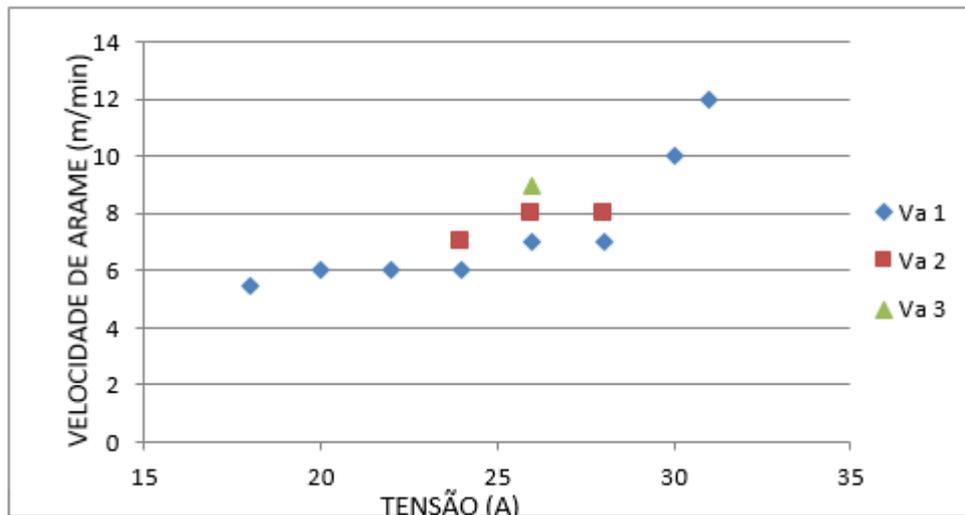
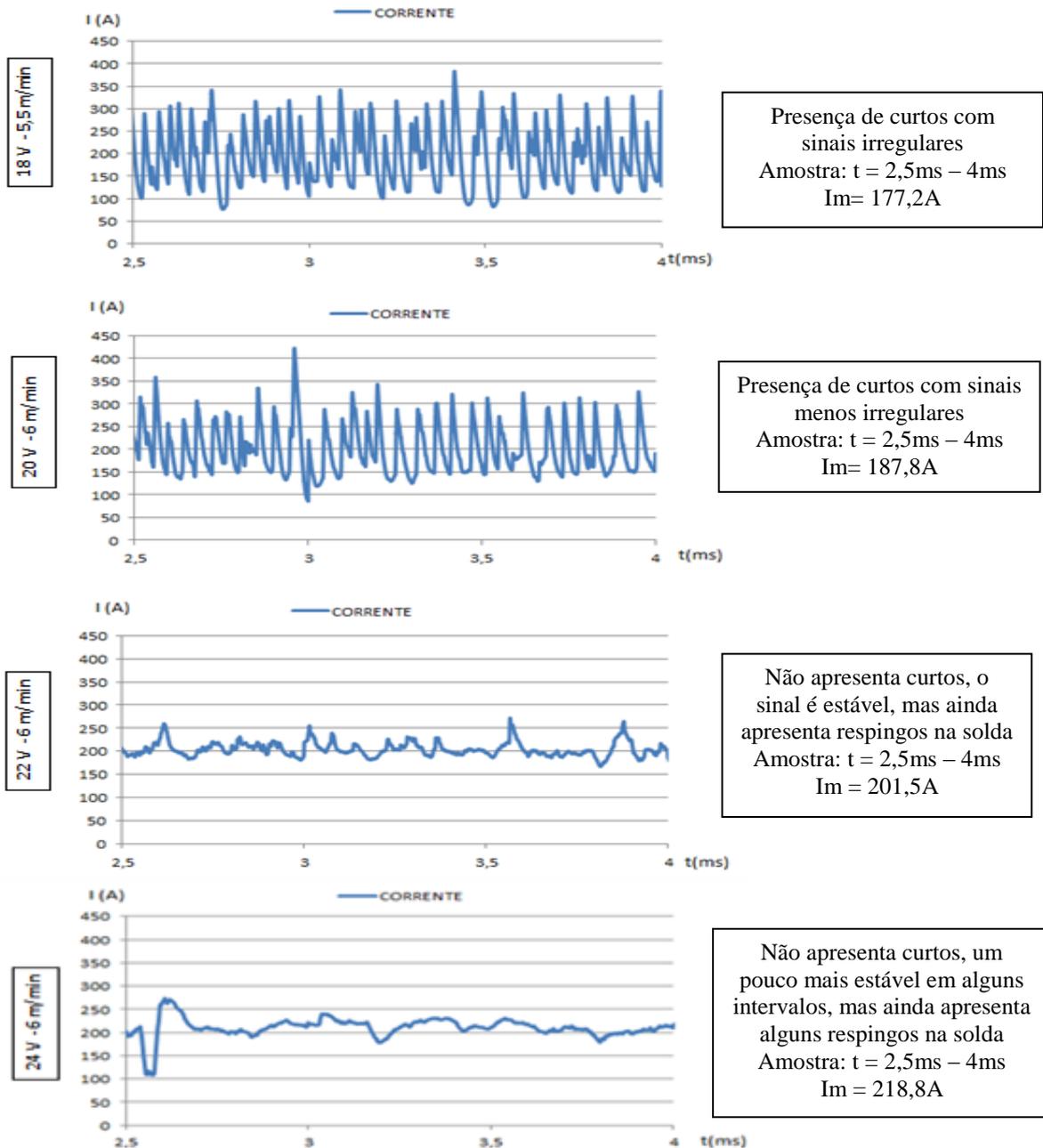


Figura 4.1. Varredura por grupos variando Va e Te em função de um valor central estável.

A) Análise de estabilidade e modos de transferência com variação de tensão para o primeiro grupo Va1

Na figura 4.2, apresenta-se os oscilogramas dos sinais de corrente do grupo Va1, identificando os curtos, quais deles são mais estáveis e determinando, ainda, o modo de transferência.



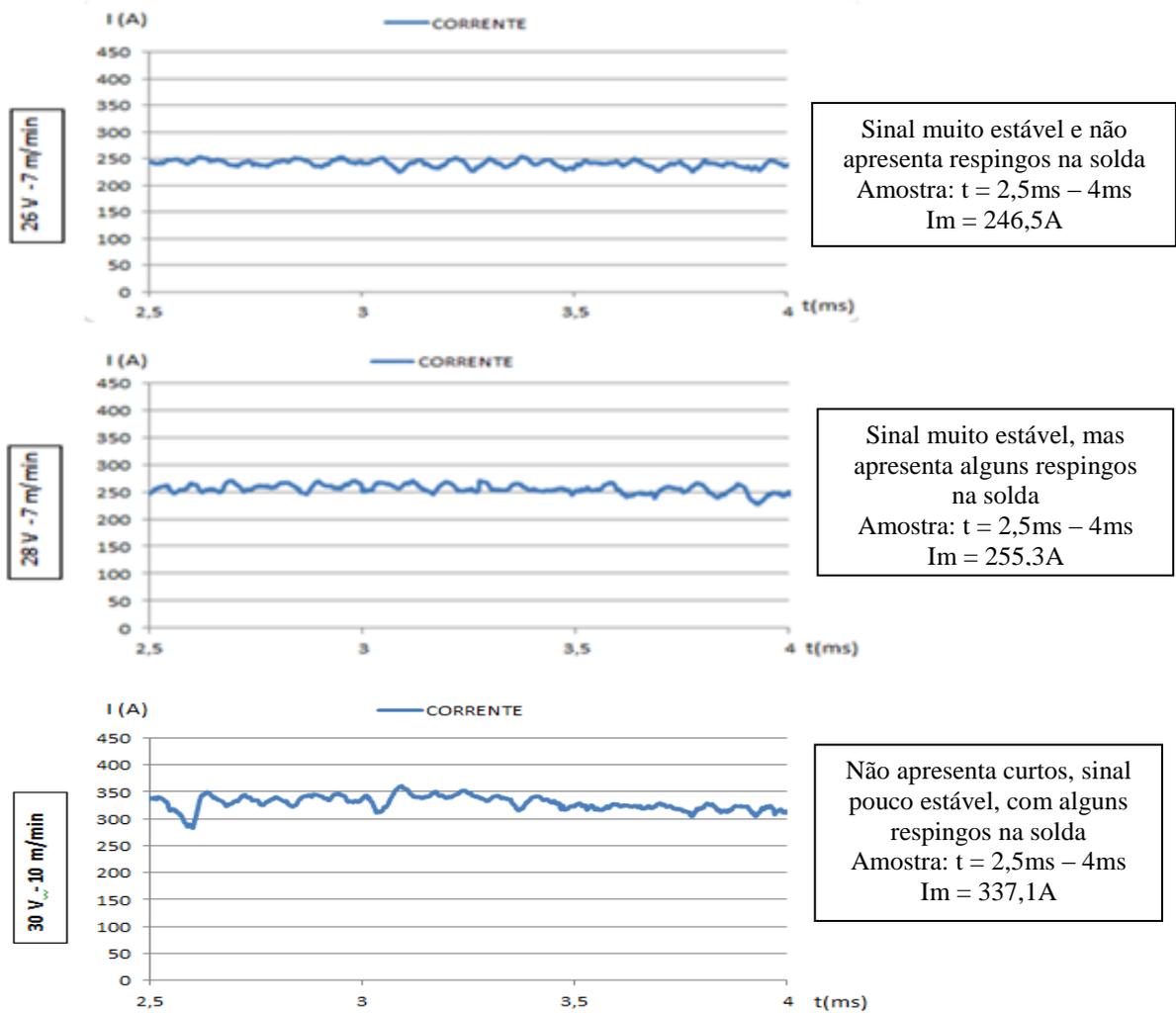


Figura 4.2. Oscilogramas de I na determinação do modo de transferência e estabilidade.

A partir da visualização dos oscilogramas anteriores pode-se determinar que o mais estável deles é o de 26v com velocidade de arame 7m/min, pois não apresenta respingos na solda e encontra-se numa pequena faixa de corrente entre 225A e 250A com corrente média de 246,5A.

A partir da figura 4.2 pode-se determinar os modos de transferência da seguinte maneira:

- No oscilograma com $T_e = 18\text{v}$ e $V_a = 5,5\text{m/min}$ a transferência é do tipo curto-circuito, com uma frequência dos curtos muito irregular e com períodos entre curtos de 0,37ms.

- No oscilograma com $T_e = 20v$ e $V_a = 6m/min$ a transferência também é do tipo curto-circuito, porém com uma frequência dos curtos regular, com períodos quase iguais entre curtos de 0,505ms.

- No oscilograma com $T_e = 22v$ e $V_a = 6m/min$ a transferência é do tipo globular, com alguns picos ainda bem definidos, altos e estreitos, gerando uma faixa de 60A entre a base e os picos mais altos. Esse teste apresenta ainda muitos respingos na solda, porém muitos menos que nos dois anteriores.

- No oscilograma com $T_e = 24v$ e $V_a = 6m/min$ a transferência também é do tipo globular, aproximando-se do ponto de corrente de transição ou mudança de modo de transferência, com picos menos definidos ou arredondados, mas muito menos estável que o anterior. Nesse oscilograma há uma faixa mais ampla, isso porque a gota está crescendo e nesse ponto ela apresenta repulsão, o que lhe permite crescer mais até sua queda com um comportamento irregular. Algumas vezes chegam a estourar gerando muitos respingos. Desse modo, as subidas de tensão são pequenas, mas a instabilidade causada pela frequência e quedas de corrente é maior, as faixas de corrente são de 70A entre a base e os picos mais altos.

- No oscilograma com $T_e = 26v$ e $V_a = 7m/min$ a transferência é do tipo goticular. Pode-se observar que pouco depois do ponto da corrente de transição a gota se comporta de maneira regular com um tamanho menor de raio igual ao tamanho do raio do arame. Esse oscilograma é o mais estável e apresenta oscilações regulares, sem picos altos dentro de uma faixa pequena de 25A, sem respingos na solda.

- No oscilograma com $T_e = 28v$ e $V_a = 7m/min$ a transferência é do tipo goticular, porém muito depois do ponto de transição; como no anterior a gota se comporta de maneira regular, mas com o raio pouco menor que o tamanho do raio do arame. Esse oscilograma ainda é estável com oscilações regulares, sem picos altos dentro de uma faixa pequena de 38A, mas com poucos respingos na solda.

- No oscilograma com $T_e = 30v$ e $V_a = 10m/min$ a transferência é do tipo goticular rotacional, onde a gota novamente se comporta de maneira irregular e tem um tamanho de

raio muito menor que o tamanho do raio do arame. A faixa de oscilações é de 51A e apresenta novamente alguns respingos.

Cabe dizer que os sinais de curto-circuito apresentam frequências de curto diferentes, sendo o segundo oscilograma o que apresentou uma frequência mais regular.

Na figura 4.3 se apresenta o oscilograma entre 3,2ms e 4,2ms. Este oscilograma parece ter dois picos com período de 0,37ms.

Na figura 4.4 se apresenta o oscilograma entre 3ms e 4ms com um só pico bem definido com período de 0,51ms.

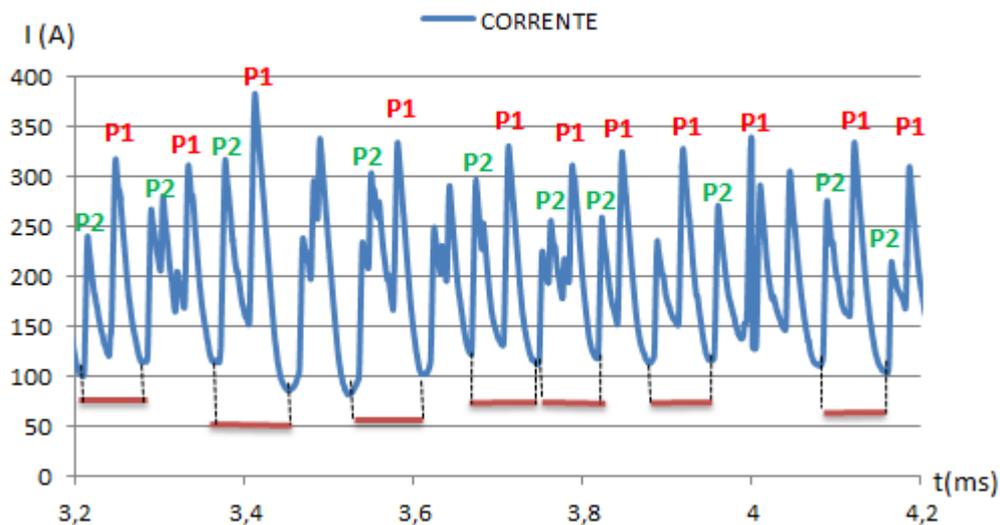


Figura 4.3. Oscilograma de corrente do grupo Va1 com tensão 18v e velocidade de arame 5,5m/min, identificando características dos picos e frequência do pulso.

A figura 4.3 mostra a transferência curto-circuito com 18v, onde o oscilograma apresenta certa regularidade, com uma sequência de picos gerado sempre por uma dupla, um pico menor e ao seu lado um pico maior. O pico mais protuberante ou principal, rotulado no oscilograma como P1, vem acompanhado antes de um pico menor rotulado como P2; os dois picos juntos têm um período de tempo de 0,74ms e cada pico isolado tem um tempo de 0,37ms.

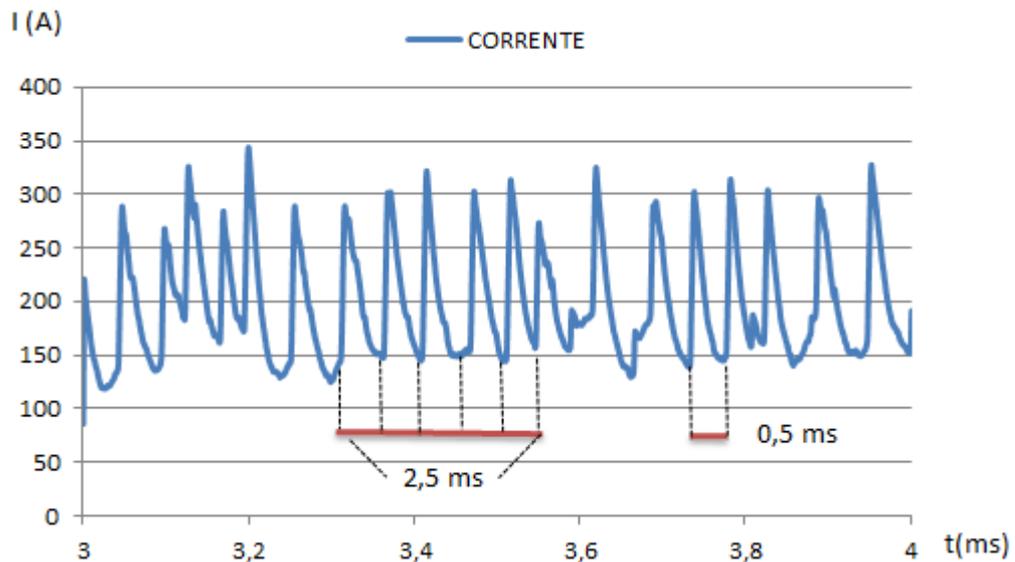


Figura 4.4. Oscilograma de corrente do grupo Va1 com $T_e = 20v$ e $V_a = 6$ m/min, identificando características nos picos e sua frequência.

A figura 4.4 mostra a transferência curto-circuito com 20v, onde o oscilograma apresenta uma regularidade muito maior que o oscilograma de 18v da figura 4.3, a sequência de picos é regular apresentando só um tipo de pico com período de 0,5ms.

B) Análise de estabilidade e corrente com a variação da velocidade de arame no ponto central 26v

Nas figuras 4.5. A, B e C apresentam os oscilogramas dos sinais de corrente, com uma tensão de 26v e velocidades de arame de 7, 8 e 9m/min, identificando quais deles são mais regulares e estáveis, estudando o comportamento do sinal e ainda, o modo de transferência.

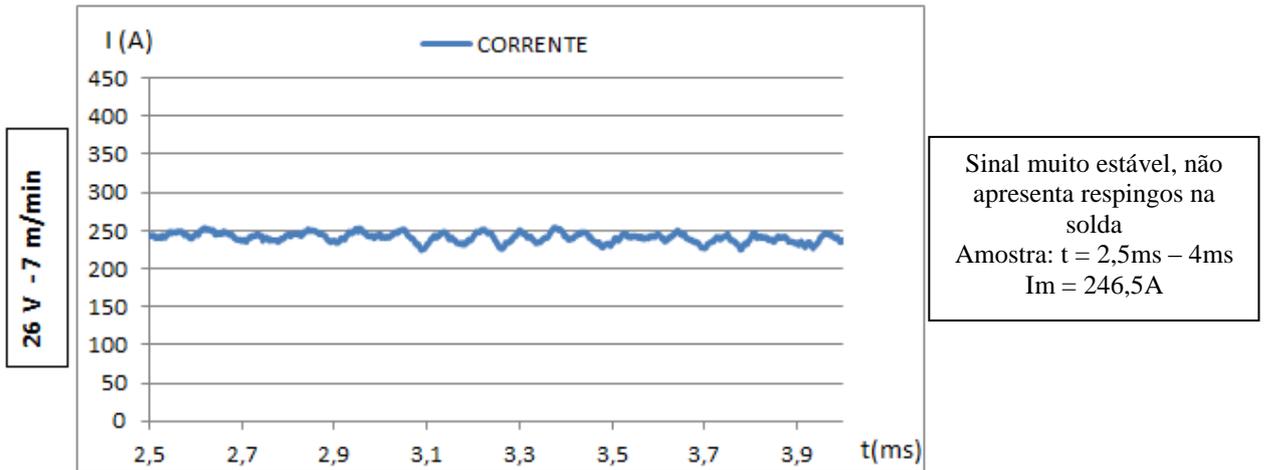


Figura 4.5. A. Oscilograma de corrente com $T_e = 26\text{v}$ e $V_a = 7\text{ m/min}$

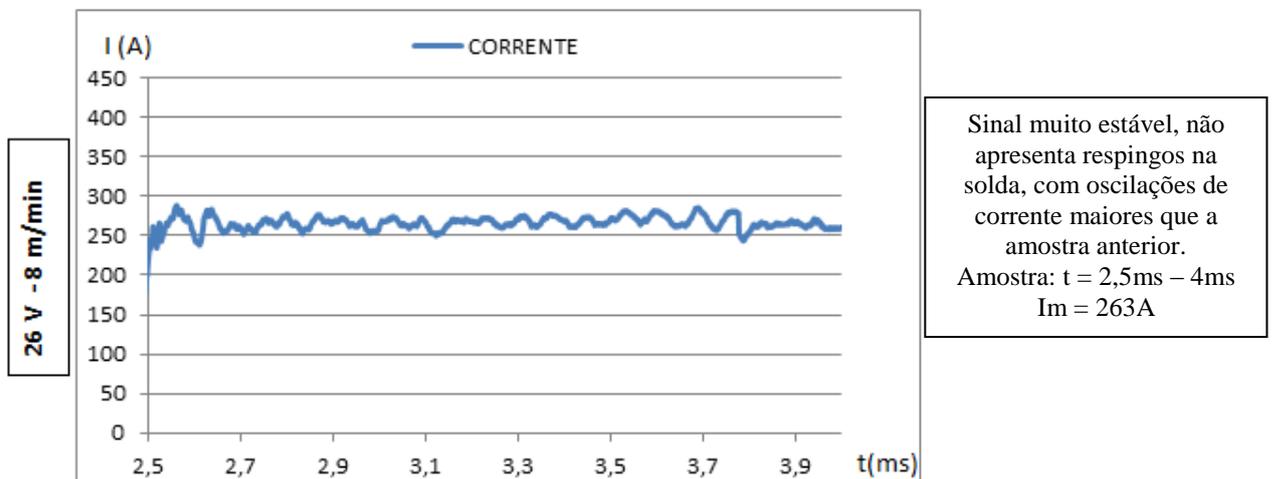


Figura 4.5. B. Oscilograma de corrente com $T_e = 26\text{v}$ e $V_a = 8\text{m/min}$

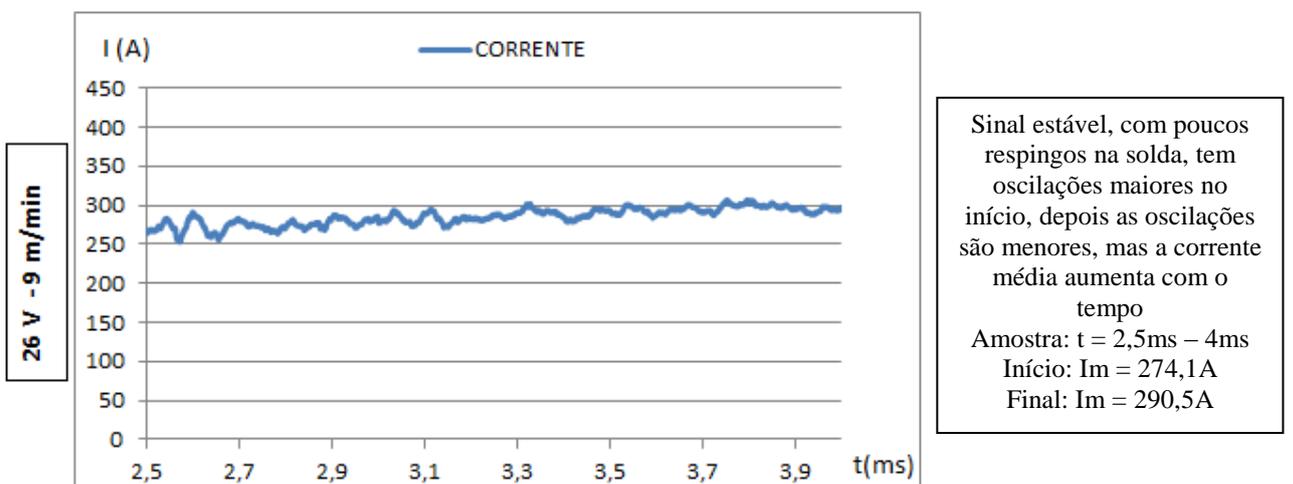


Figura 4.5. C. Oscilograma de corrente com $T_e = 26\text{v}$ e $V_a = 9\text{ m/min}$

Nos oscilogramas acima, pode-se verificar que o mais estável foi com $V_a = 7\text{m/min}$, depois $V_a = 8\text{m/min}$, sendo este o que mais oscilou dentre os três; por último, o oscilograma de $V_a = 9\text{m/min}$, que aumenta sua corrente com o tempo, uma vez que o comprimento do arco vai diminuindo, enquanto o arame vai ficando cada vez mais perto da peça, até ficar estável. Este não tem muita oscilação da corrente, mas é o teste que mais utilizou corrente na transferência. O que utilizou menos foi o teste de 7m/min . Portanto, a escolha para os próximos testes foi uma velocidade de arame de 7m/min , com uma tensão de 26v .

4.1.2. Análise do comprimento de arco, tamanho e frequência de queda da gota utilizando oscilogramas e perfilografia

O comportamento dos grupos será agora analisado com a técnica de perfilografia para a determinação do tamanho da gota, destacamento e a frequência de queda das mesmas. Para tanto, foi realizado um processamento de sinais para melhorar a qualidade das imagens e destacar a forma e tamanho da gota. Na primeira etapa do tratamento da imagem foram feitos: erosão, dilatação, filtros gaussianos e binarização ou filtro de branco e preto, atribuindo um nome para estas imagens como imagem A e, na segunda etapa, adicionando uma multiplicação de matrizes do resultado com a imagem original, filtros de média e mediana e ajuste de tons e resalte de cor na área central vertical, como imagem B.

Imagem A: Erosão, dilatação, filtragem gaussiana, filtro de branco e preto.

Imagem B: Erosão, dilatação, filtragem gaussiana, filtro de branco e preto, filtros de média e mediana + multiplicação por imagem original, intensificação de tons com resalte de tons escuros na zona vertical central.

Imagem C: A mesma imagem B com as medidas da gota e do comprimento do arco.

a) Grupo $T_e = 18\text{v}$ e $V_a = 5,5\text{m/min}$:

No grupo V_{a1} com tensão 18v e com velocidade de arame $5,5\text{m/min}$, apresentam-se curtos-circuitos com geração de gotas grandes formadas até tocar a poça de fusão, elas possuem, geralmente, um tamanho variável. Nas imagens da figura 4.6 se observa a gota em

formação e o comprimento do arco para duas gotas diferentes do mesmo grupo (Gota 1 e Gota 2), onde se fez um processamento das imagens, para finalmente determinar as medidas do tamanho da gota e comprimento do arco (Imagem C).

A faixa do tamanho da gota nesse grupo foi de $(1,95 - 2,60\text{mm}) \pm 0,2\text{mm}$, e o comprimento vertical do arco foi de $0,5\text{mm} \pm 0,20\text{mm}$, como se pode ver na imagem C, Figura 4.6; com respeito ao cordão em formação, o seu comprimento oblíquo é menor que o comprimento vertical, em algumas ocasiões, durante a formação da gota, como se observa na mesma figura, onde o comprimento do arco na direção do cordão em formação é de $0,2\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$.

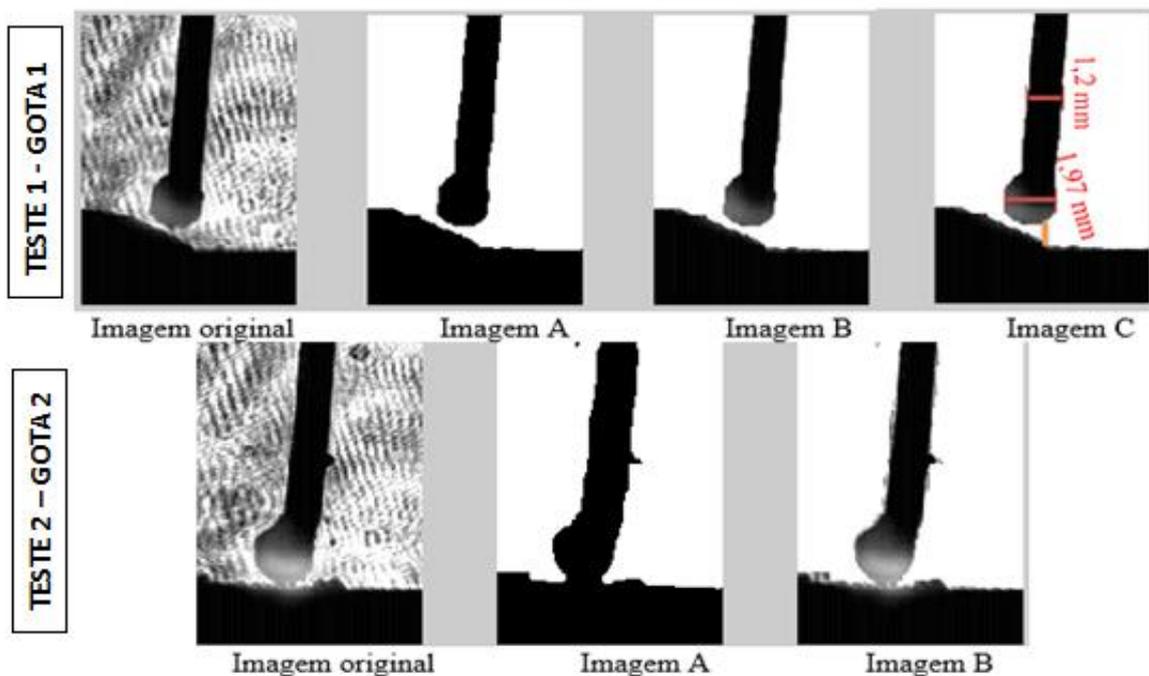
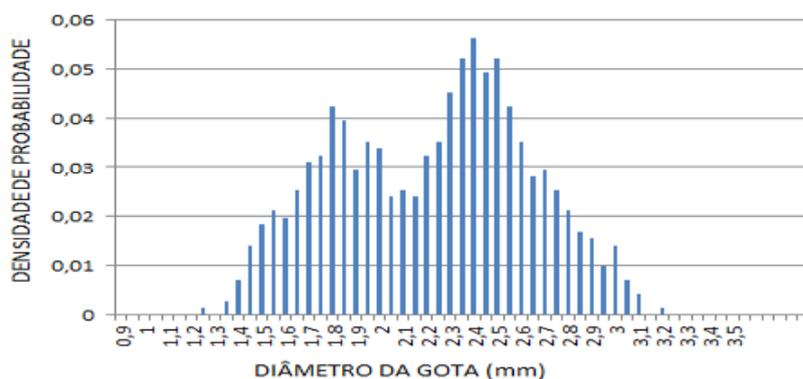


Figura 4.6. Grupo com $T_e = 18v$ e $V_a = 5,5\text{m /min}$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).

A instabilidade neste grupo foi devida, principalmente, ao calor insuficiente para fundir a gota não conseguindo transferir completamente o material derretido, por falta de fluidez, apresentando assim, simultaneamente, os dois estados da matéria, por falta de calor para uma fusão completa. Além disso, outros fatores como tensão superficial e forças intermoleculares mudam ao passar do estado sólido para líquido. A fluidez, a tensão superficial e a gravidade são importantes no destacamento da gota para ela descer rapidamente na poça e reiniciar o arco.



**Figura 4.7. Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota.
Grupo (18v – 5,5m/min)**

Média amostral: 2,223mm

Moda = 2,4mm

Desvio padrão amostral: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}$ então $S = 0,53\text{mm}$

Frequência de destacamento:

O valor da frequência de destacamento nestes testes é muito difícil de perceber devido ao fato de que o arame fica muito perto da poça de fusão, mas a análise para algumas imagens que puderam ser analisadas, o cálculo fica numa faixa entre 100 e 250Hz (gotas/segundo) ou 0,010 a 0,004 segundos por gota.

b) Grupo $T_e = 20v$ e $V_a = 6m/min$:

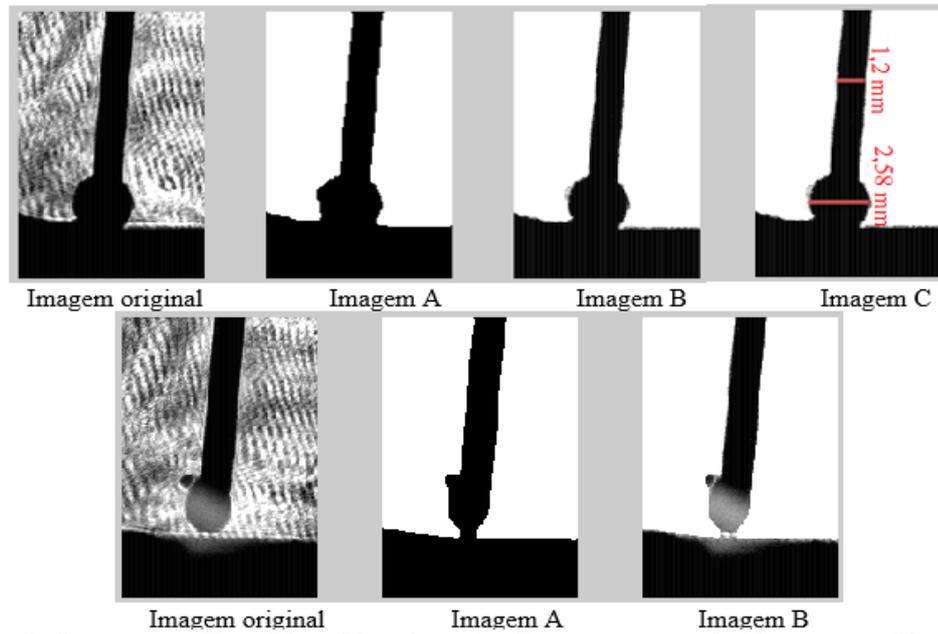


Figura 4.8. Grupo com $T_e = 20v$ e $V_a = 6m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).

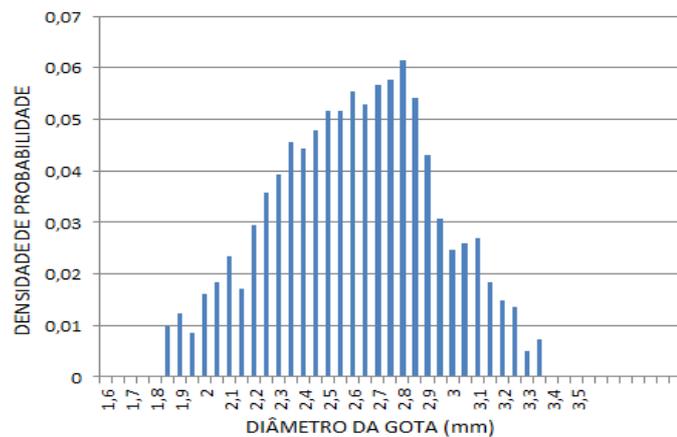


Figura 4.9. Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota.
Grupo ($20v - 6 m/min$)

Média amostral: 2,606mm

Moda = 2,8mm

Desvio padrão amostral: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}$ então $S = 0,41mm$

Frequência de destacamento:

Como no grupo anterior, o valor da frequência de destacamento é muito difícil de perceber já que o arame fica muito perto da poça de fusão. A análise para algumas imagens que puderam ser analisadas está numa faixa entre 83 e 143Hz (gotas/segundo) ou 0,012 a 0,007 segundos por gota. O desvio amostral é muito grande devido à dificuldade de medir este parâmetro para estes grupos. Na figura 4.10 Pode-se observar mas imagens com um comprimento pequeno de 0,2 mm.

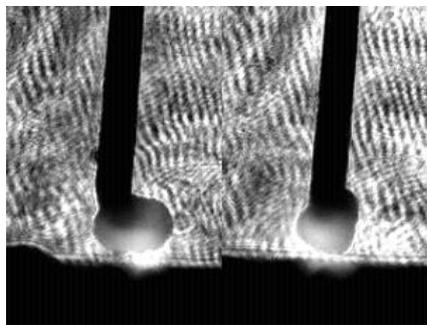


Figura 4.10. Outras imagens do grupo (20v – 6m/min) onde se pode observar o comprimento do arco.

c) Grupo $T_e = 22v$ e $V_a = 6m/min$:

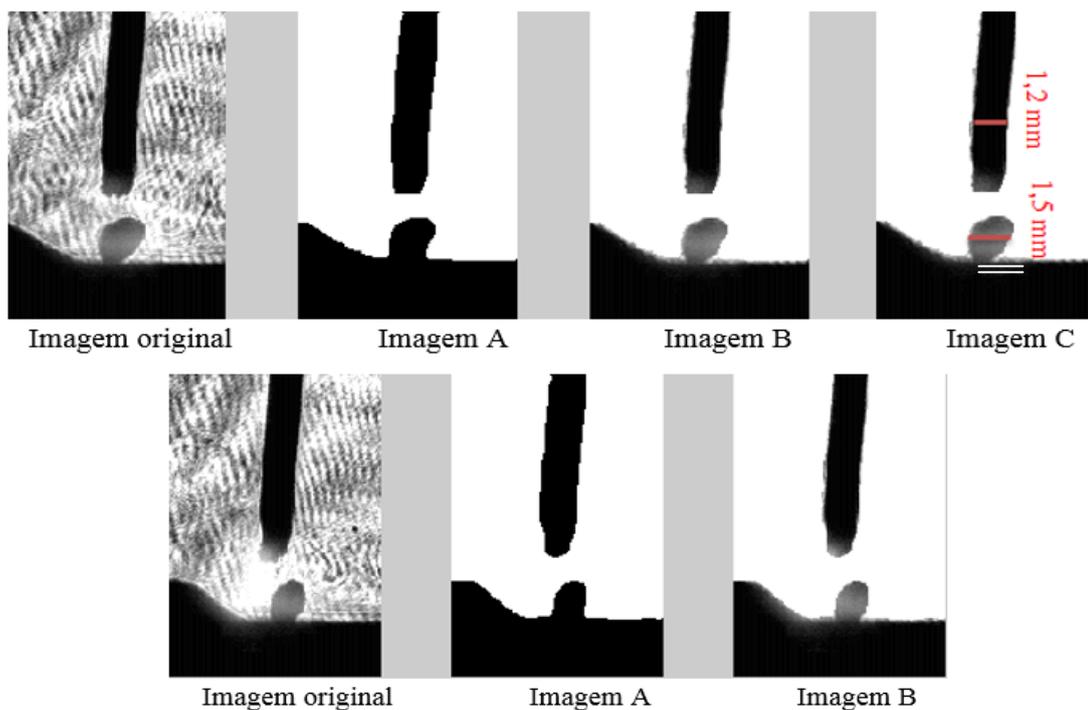


Figura 4.11. Grupo com $T_e = 22v$ e $V_a = 6m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).

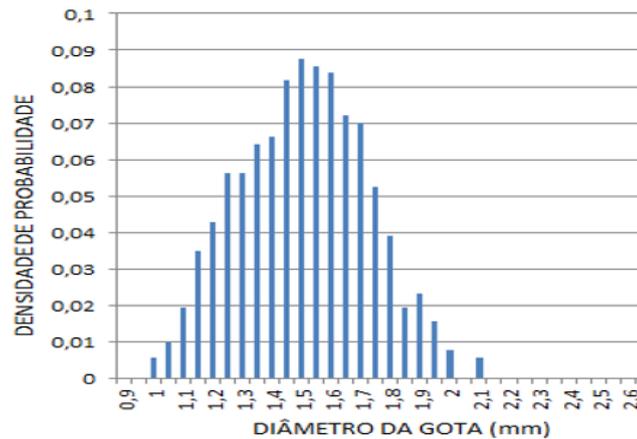


Figura 4.12. Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota. Grupo (22v – 6m/min)

Média amostral: 1,507mm

Moda = 1,5mm

Desvio padrão amostral: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}$ então $S = 0,28\text{mm}$

Frequência de destacamento:

Em seguida se faz um histograma da frequência de destacamento da gota e o tempo em função de sua densidade de probabilidade, os dados analisados tanto para frequência e tempo são tomados da mesma faixa de 300 dados, com imagens tomadas com a câmera cada milissegundo, portanto a análises para o tempo e feita cada ms, mas para a frequência são organizados cada 10Hz.

No seguinte grupo de 22v o tempo de queda da gota varia, já que no equilíbrio de forças na queda da gota, se tem efeitos de repulsão, variando o tempo de queda e o tamanho da gota, aumentando tanto o tempo como o tamanho da gota. Este efeito acontece na transferência goticular para tensões iguais ou menores a 22v.

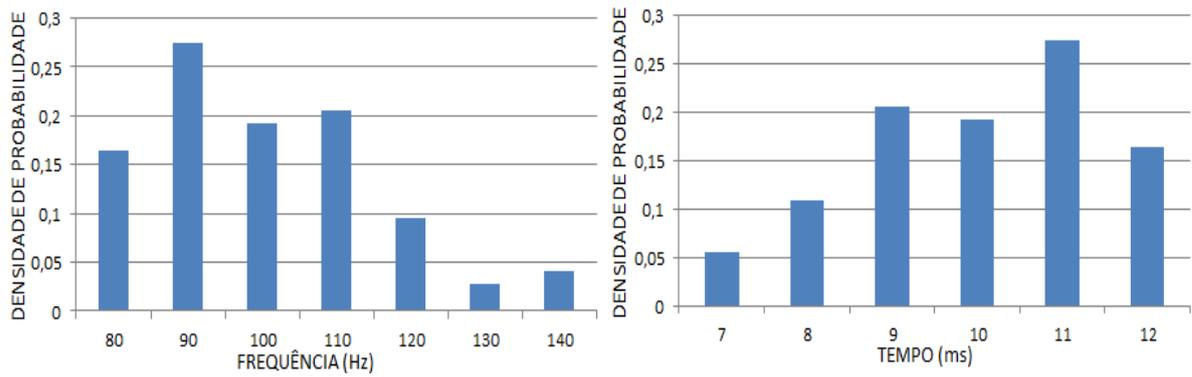


Figura 4.13. Densidade de probabilidade vs frequência e vs tempo Grupo (22v – 6 m/min).

d) Grupo $T_e = 24v$ e $V_a = 6m/min$:

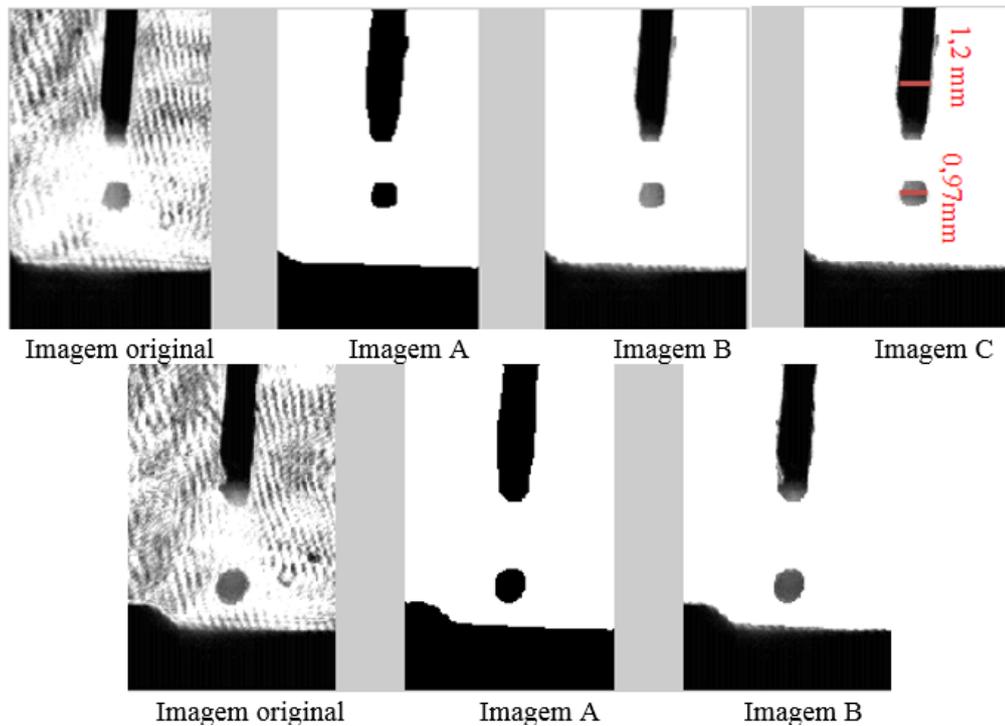
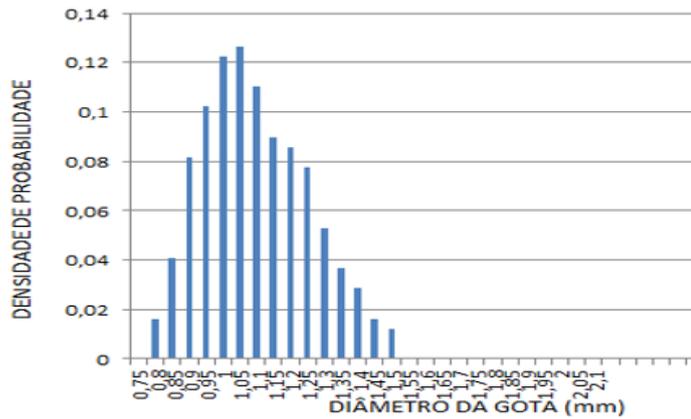


Figura 4.14. Grupo com $T_e = 24v$ e $V_a = 6m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia)



**Figura 4.15. Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota.
Grupo (24v – 6 m/min)**

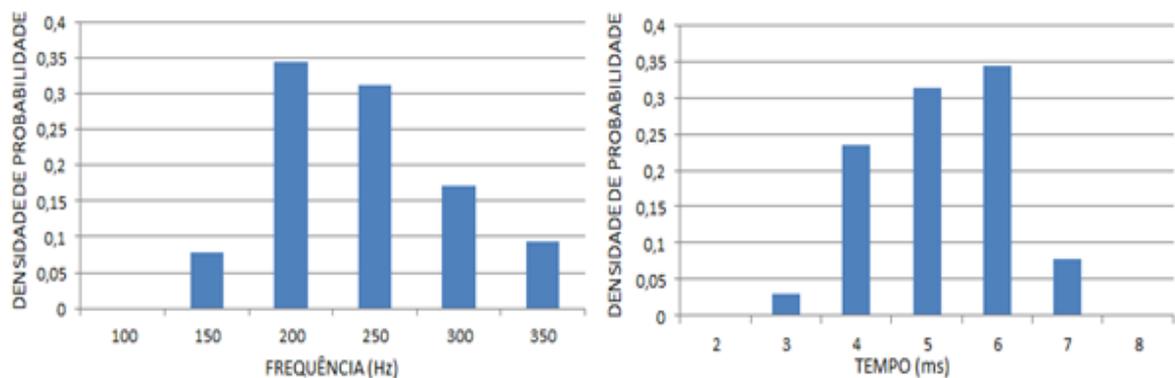
Média amostral: 1,15mm

Moda = 1,05mm

Desvio padrão amostral: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ então $S = 0,21\text{mm}$

Frequência de destacamento:

Neste grupo a frequência da queda da gota aumenta e seu comportamento é mais regular que o grupo de 22v. Na figura 4.16, pode-se observar os valores.



**Figura 4.16. Densidade de probabilidade vs frequência e vs tempo.
Grupo (24v – 6m/min)**

e) Grupo $T_e = 26v$ e $V_a = 7 \text{ m/min}$:

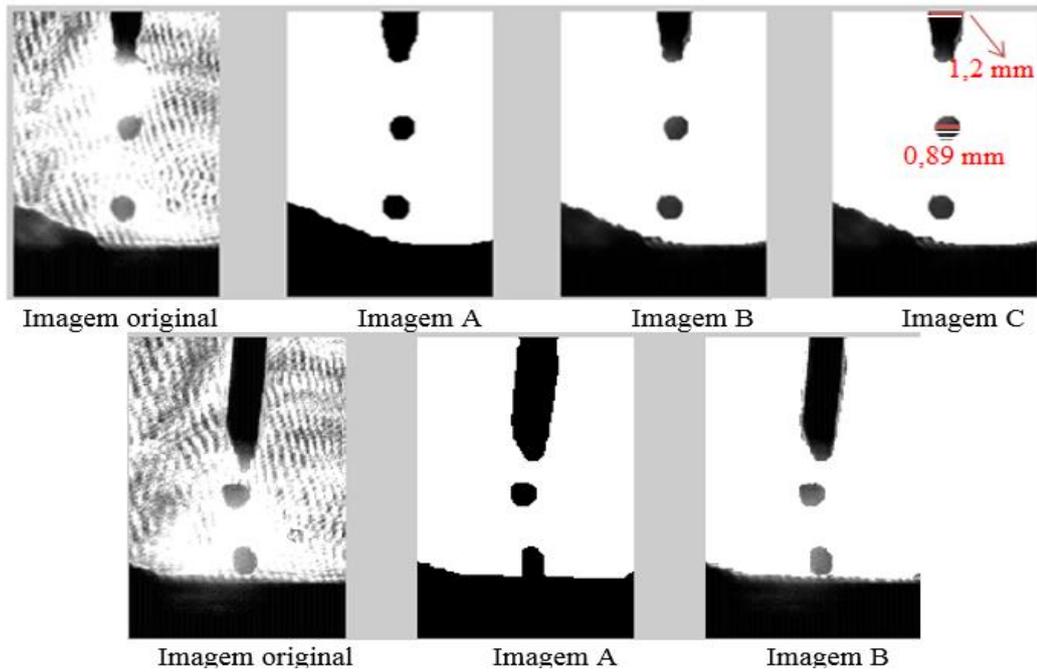


Figura 4.17. Grupo com $T_e = 26v$ e $V_a = 7\text{m/min}$ (Duas imagens obtidas por perfilografia).

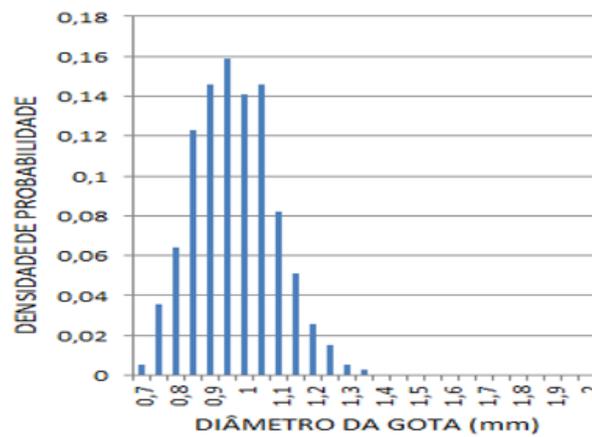


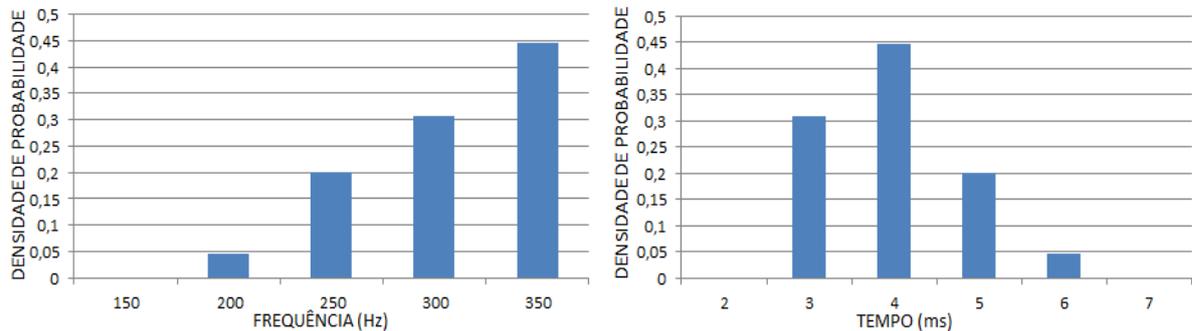
Figura 4.18. Densidade de probabilidade vs diâmetro da gota.
Grupo ($26v - 7\text{m/min}$)

Média amostral: 0,967mm

Moda = 0,95mm

Desvio padrão amostral: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}$ então $S = 0,13\text{mm}$

Frequência de destacamento:



**Figura 4.19. Densidade de probabilidade vs frequência e vs tempo.
Grupo (26v – 7 m/min)**

Nos testes para 28v e 30v a frequência de destacamento da gota apresenta períodos regulares entre 250 e 350Hz, onde a densidade de probabilidade tem um valor de 0,75 para valores de 350Hz o maior, ou apresenta tempos de 3ms no período de queda da gota, portanto, nesses grupos, não se apresenta o gráfico só se indica o valor das densidades de probabilidade com tendência em 350Hz, já que a maior corrente, a gota diminui seu tempo de queda por baixo de 3ms em decimares, igualmente para os seguintes grupos, 26v - 8m/min, 28v - 8m/min e 30v - 10m/min.

f) Grupo com $T_e = 26v$ e $V_a = 8m/min$:



Figura 4.20. Grupo com $T_e = 26v$ e $V_a = 8m/min$. (Imagem obtida por perfilografia)

g) Grupo $T_e = 28v$ e $V_a = 8m/min$:

Este grupo apresenta vários tipos de gota, geralmente pequenas, mas algumas vezes apresenta algumas gotas maiores.

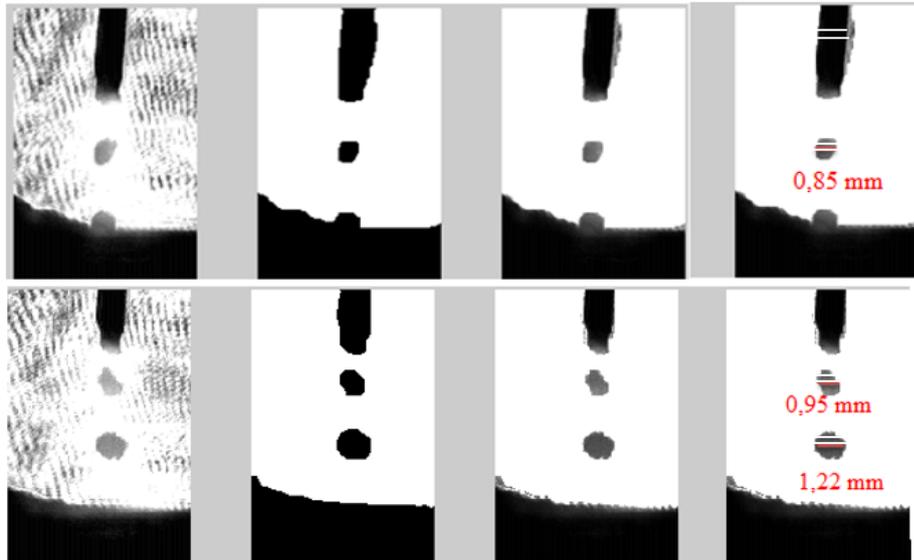


Figura 4.21. Grupo com $T_e = 28v$ e $V_a = 8m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia)

h) Grupo com $T_e = 30v$ e $V_a = 10m/min$:

Neste último grupo observa-se um movimento rotacional das gotas ou fio de arame fundido que é gerado por forças eletromagnéticas que ocasionam este efeito no metal fundido junto com a combinação de outras forças. O comprimento do arco é muito grande, por isso só se fez testes até 30v, já que as outras voltagens não eram de interesse no presente estudo.

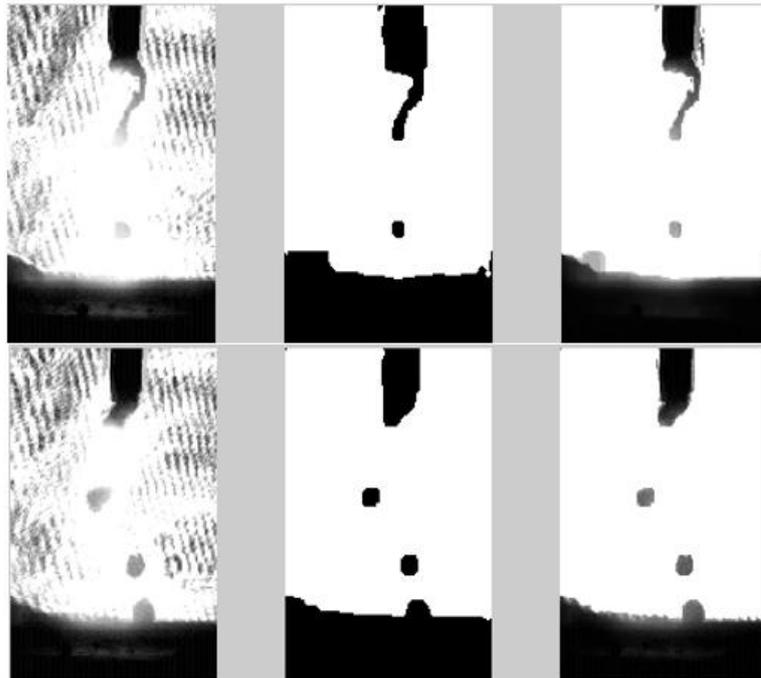


Figura 4.22. Grupo com $T_e = 30v$ e $V_a = 10m/min$ (Duas imagens obtidas por perfilografia)

Nesta última figura não foi medido o tamanho das gotas devido à sua variação através do tempo. Geralmente a gota apresenta um diâmetro menor que o diâmetro do arame, podem ser geradas muitas gotas seguidas com diferentes diâmetros ou um fio de arame fundido.

4.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS EM GMAW PULSADO

Baseando-se primeiramente na tabela 3.2 do capítulo 3, onde se têm os dados iniciais estabelecidos de acordo com a literatura e com os dados analisados nos diferentes critérios e testes acima descritos, e ainda, nas análises de oscilogramas e perfilografia para GMAW convencional, fez-se uma nova tabela de dados (tabela 4.2). Foram fixadas certas características definidas de acordo com as desejadas no trabalho, os equipamentos e materiais utilizados, tendo como base análises do estudo anterior, que mostraram ter boas características na solda feita com a técnica GMAW-P.

Na tabela 4.2 se mostra os parâmetros iniciais para os testes trabalhados em GMAW Pulsado.

Tabela 4.2. Parâmetros para GMAW-P.

<i>Parâmetros variáveis</i>	<i>Parâmetros fixos</i>
Velocidade de soldagem: $V_t = 6$ a 12 mm/seg	A distância entre o bico de contato ou tocha e a peça (DBCP): 15mm
Velocidade de alimentação do arame: $V_a = 2$ a 8 m/min	
Frequência de pulsação: $F_r = 55$ a 280 Hz	Ângulo da tocha respeito da vertical: 0°
Corrente de pico: $I_p = 120$ a 450^a	
Corrente de base: $I_b = 50$ a 80^a	Diâmetro do arame: 1,2mm
Corrente separadora de gotas: $I_s = 50$ a 110^a	
Indutância: 0 a 50 %	(Stand Off) Distancia do bocal com a peça: 12 mm
Tempo de ciclo ou período: $T_c = 1/F_r$	
Tempo de base: $T_b = 40$ a $50\% T_c$	Gás proteção: 94% Argônio + 6% de dióxido de carbono (CO_2), Razão 15 lt/min
Tempo de pico: $T_p = 40$ a $50\% T_c$	
Tempo de pulso separador de gotas: $T_s = 0$ a $0,8$ ms	Polaridade positiva

Uma vez identificados os dados para uma boa solda com a aplicação dos critérios, fixamos esses dados como básicos, como pontos de partida na busca dos parâmetros aceitáveis. Os valores definitivos devem ser buscados ainda com mais detalhe e precisão, mas é necessário ressaltar que os dados encontrados aqui são feitos para o arame de aço inoxidável ESAB OK Tubrod 410 NiMo (MC), de 1,2mm de diâmetro, sobre o aço doce (AISI 1020) de 6,35mm. “Se for mudado o aço do material base ou o arame, a metodologia e os resultados nesta pesquisa ajudam a identificar mais rápido o novo valor para o novo material”. Neste trabalho foi utilizado aço doce para economizar custos e, no final, foi utilizado aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA-6NM, presente nas pás de turbinas. Para o aço doce foi feita uma análise experimental de 37 testes mostrados a seguir.

Inicialmente, dividimos a análise em dois grupos: de baixo aporte energético e alto aporte energético. Os valores para I_b , I_p , I_m e I_s são dados em amperes (A) para frequência (f_r), tensão, velocidade de arame (V_a) e velocidade de avanço de soldagem (V_t) as unidades são: hertz (Hz), volts (v), metros por minuto (m/min) e milímetros por segundo (mm/seg) respectivamente.

Tabela 4.3. Parâmetros fixos com variação na corrente de pico para baixa energia de aporte

REFERENCIA	I_b	I_p	T_p	F_r	Tensão	V_a
Cordão 0	15	320	2,0	52	20	2,0
Cordão 1	15	350	2,0	52	20	2,0
Cordão 2	15	370	2,0	52	20	2,0

O melhor resultado em geometria e estabilidade foi para o cordão 1 com 350A, mas todos apresentam curtos e respingos da solda.

A figura 4.23 mostra o parâmetro de entrada corrente de pico (I_p) versus os dois parâmetros de saída, reforço e largura.

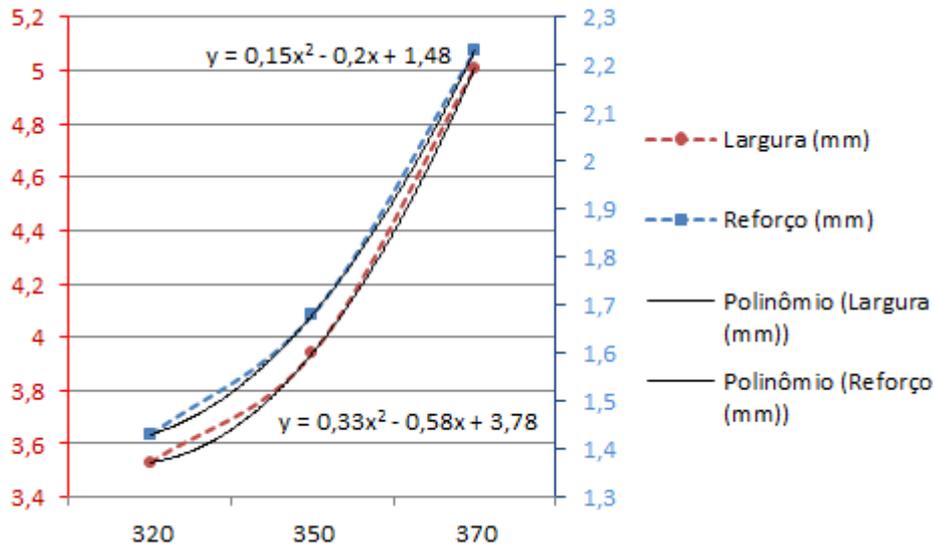


Figura 4.23. I_p vs Reforço e Largura para parâmetros com baixa energia.

Tendência: Polinômio grau 2 onde: $x = I_p$ (A)

Largura : $y_1 = 0,33x^2 - 0,58x + 3,78$

Reforço: $y_2 = 0,15x^2 - 0,2x + 1,48$

Tabela 4.4. Parâmetros fixos com variação no tempo de pico e com baixa energia de aporte

REFERENCIA	I_b	I_p	T_p	Fr	Tensão	Va
Cordão 1	15	350	2,0	52	20	2,0
Cordão 3	15	350	2,5	52	20	2,0
Cordão 4	15	350	3,0	52	20	2,0

O resultado da geometria e estabilidade foi igual para os três cordões anteriores.

Tabela 4.5. Parâmetros fixos com variação na corrente pico, alta energia de aporte e V_a 8,0m/mim

REFERENCIA	I_b	I_p	T_p	Fr	Tensão	Va
Cordão 1A	80	320	2,0	200	26	8,0
Cordão 2A	80	380	2,0	200	26	8,0
Cordão 3A	80	450	2,0	200	26	8,0

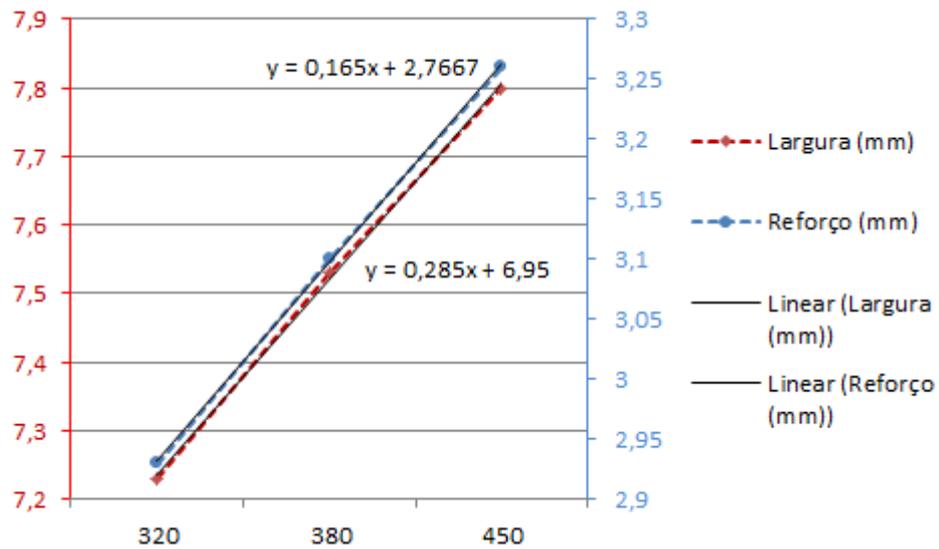


Figura 4.24. Ip vs Reforço e Largura para parâmetros com alta energia.

Tendência: Linear

Largura : $y_1 = 0,165x + 2,7667$ onde: $x = I_p$ (A)

Reforço: $y_2 = 0,285x + 6,95$

O melhor resultado em geometria e estabilidade foi para o cordão 2A com 380A, mas ainda com alguns respingos da solda.

Tabela 4.6. Variação no tempo de pico (T_p), alta energia de aporte e V_a 8,0m/min

REFERENCIA	I_b	I_p	T_p	Fr	Tensão	V_a
Cordão 4A	80	380	1,5	200	26	8,0
Cordão 2A	80	380	2,0	200	26	8,0
Cordão 6	80	380	2,5	200	26	8,0
Cordão 5	80	380	3,0	200	26	8,0

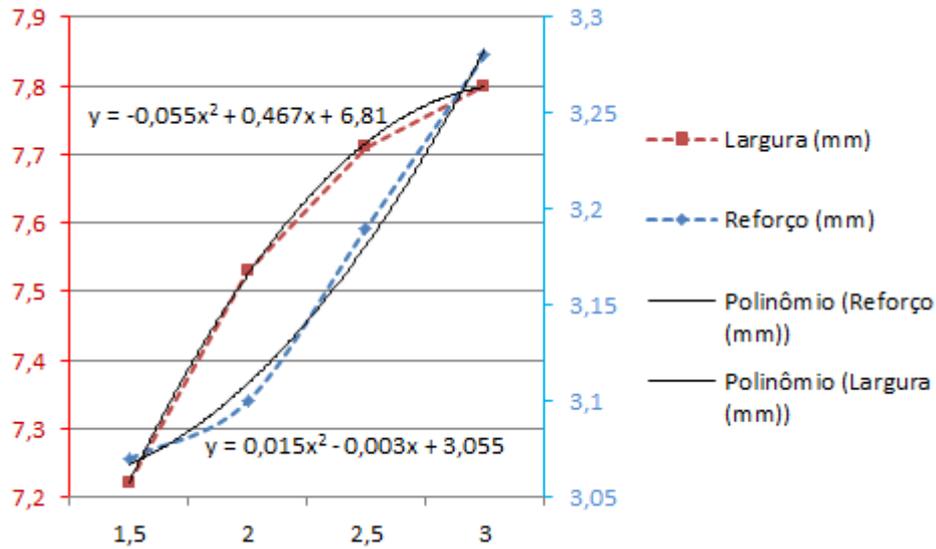


Figura 4.25. Tp vs Reforço e Largura.

Tendência: Polinômio grau 2 onde: $x = T_p$ (ms)

Largura : $y_1 = -0,055x^2 + 0,467x + 6,81$

Reforço: $y_2 = 0,015x^2 - 0,003x + 3,055$

O melhor resultado foi para o cordão 6, com melhor geometria e com um pouco mais de estabilidade, mas ainda tem alguns respingos da solda.

Tendo em conta os dados acima foi diminuída a velocidade do arame para diminuir a presença de curtos na solda e foi variada a corrente de pico I_p .

Tabela 4.7. Variação na corrente de pico (I_p), alta energia de aporte e V_a 7,5 m/min

REFERENCIA	I_b	I_p	T_p	Fr	Tensão	V_a
Cordão 7	80	370	2,5	200	26	7,5
Cordão 17	80	380	2,5	200	26	7,5
Cordão 10	80	385	2,5	200	26	7,5

O melhor resultado foi para o cordão 10 com 385A, esta amostra apresenta menos respingos da solda que as amostras anteriores e apresenta uma geometria melhor.

Tabela 4.8. Variação na velocidade de soldagem (Vt), alta energia de aporte e Va 7,0 m/min

REFERENCIA	lb	lp	Tp	Fr	Tensão	Va	ls	Ts	Ind	Vt
Cordão 16	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 18	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	8
Cordão 19	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	6
Cordão 22	80	378	2,2	280	26	7,0	110	0,5	0,10	12

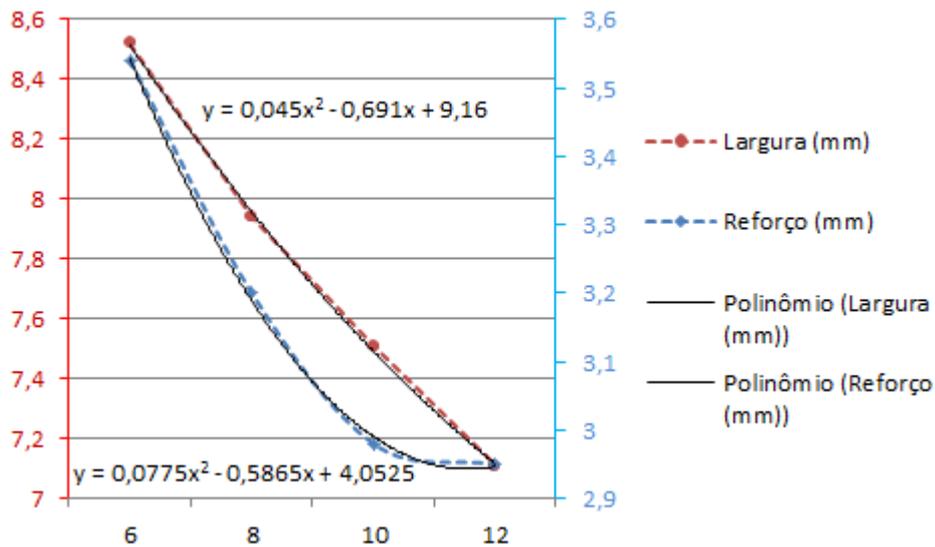


Figura 4.26. Vt vs Reforço e Largura.

Tendência: Polinômio grau 2 onde: $x = Vt$ (mm/seg)

Largura: $y_1 = 0,045x^2 - 0,691x + 9,16$

Reforço: $y_2 = 0,0775x^2 - 0,5865x + 4,0525$

Não há mudanças significativas, mas os melhores resultados na geometria do cordão foi para 8 e 10, respectivamente.

Foi escolhido o valor da velocidade de soldagem $Vt = 10$ mm/seg como valor fixo para os próximos testes, desta forma, ter alta velocidade na formação de camadas e boas características ao mesmo tempo.

Tabela 4.9. Variação na velocidade do arame (Va), alta energia de aporte e Fr de 200 Hz.

REFERENCIA	lb	lp	Tp	Fr	Tensão	Va
Cordão 6	80	380	2,5	200	26	8,0
Cordão 16	80	380	2,5	200	26	7,0
Cordão 17	80	380	2,5	200	26	7,5
Cordão 27	80	380	2,5	200	26	6,5

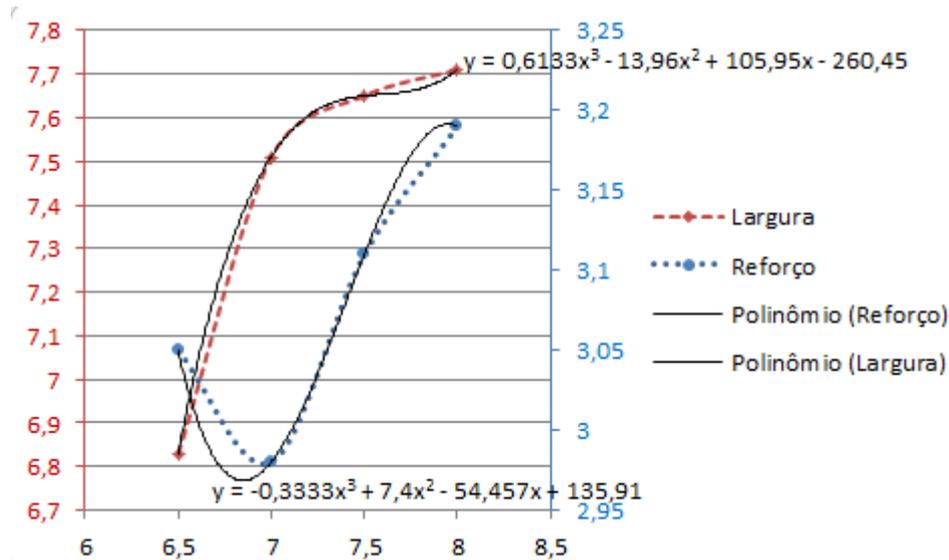


Figura 4.27. Va vs Reforço e Largura.

Tendência: Polinômio grau 3 onde: $x=Va$ (m/min)

Largura: $y_1 = 0,6133x^3 - 13,96x^2 + 105,95x - 260,45$

Reforço: $y_2 = -0,3333x^3 + 7,4x^2 - 54,457x + 135,91$

O melhor resultado foi para 8,0 mas se é aumentada a frequência tem-se mais estabilidade e pode ser diminuída a velocidade de arame devido ao fato do valor de energia de fusão ser maior. Foram tomados também valores com combinações que não aparecem nas tabelas acima e não pertencem a uma relação de mais de três valores, mas podem dar informação do que acontece nessa pequena faixa.

Como ainda há curtos, decidiu-se aumentar a corrente média diminuindo o tempo de base e facilitar a estabilidade diminuindo o tempo de ciclo, portanto, aumentamos a frequência de pulso de 200 a 240Hz e diminuindo o tempo de pico de 2,5ms a 2,0ms para se ter uma relação maior entre tempo de pico e tempo de base e o aumento com as frequências para ter mais controle na estabilidade do processo de soldagem diminuindo curtos e respingos,

para o arame não avançar perigosamente mais rápido que o material fundido até gerar um curto.

A relação inicial para 200 Hz foi de 2,5ms para o tempo de pico, que representa 2,5ms para o tempo de base e isso representa 50% do tempo de pico; mas, para 240Hz o tempo de pico foi de 2,4ms e o tempo de base foi 1,77ms, o que representa 57,55% do tempo de pico em relação ao tempo de base; para 280Hz o tempo de pico foi de 2,2ms e o tempo de base de 1,37ms, o que seria 61,6% na relação do tempo de pico e tempo de base.

Tabela 4.10. Variação na frequência (Fr), alta energia de aporte e Va 7,0 m/min

REFERENCIA	lb	lp	Tp	Fr	Tensão	Va	ls	Ts	Ind	Vt
Cordão 16	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 20	80	380	2,4	240	26	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 21	80	380	2,2	280	26	7,0	110	0,5	0,10	10

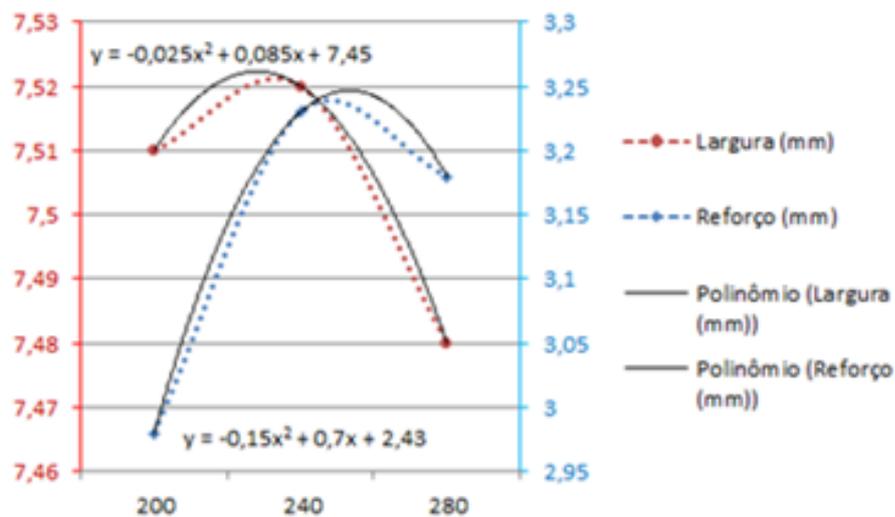


Figura 4.28. Frequência vs Reforço e Largura.

Tendência: Polinômio grau 2 onde: $x = fr$ (Hz)

Largura: $y_1 = -0,025x^2 + 0,085x + 7,45$

Reforço: $y_2 = -0,15x^2 + 0,7x + 2,43$

Os resultados obtidos foram os esperados, ou seja, não houve respingos da solda e tem-se uma estabilidade muito boa. A geometria do cordão foi melhor para o cordão com frequência de 240 Hz e 2,4ms do tempo de pico.

Tabela 4.11. Variação da Tensão, alta energia de aporte e Fr de 240Hz.

REFERENCIA	lb	lp	Tp	Fr	Tensão	Va
Cordão 23	80	378	2,4	240	26	7,0
Cordão 24	80	378	2,4	240	25	7,0
Cordão 25	80	378	2,4	240	24,5	7,0
Cordão 26	80	378	2,4	240	27	7,0

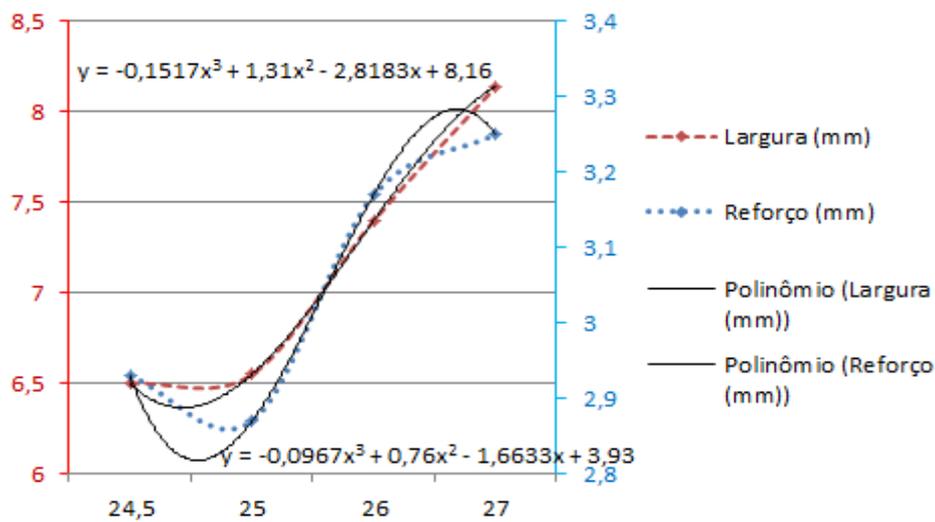


Figura 4.29. Tensão vs Reforço e Largura.

Tendência: Polinômio grau 3 onde: $x = Te(v)$

Largura: $y1 = -0,1517x^3 + 1,31x^2 - 2,8183x + 8,16$

Reforço: $y2 = -0,0967x^3 + 0,76x^2 - 1,6633x + 3,93$

Foi preciso aumentar Va a 8,0 para diminuir o comprimento do arco, conforme foi feito no teste 26, mas aumentar a velocidade pode aumentar os curtos-circuitos e os respingos; na busca de outras possibilidades para diminuir os respingos na solda e com umas melhores análises, tendo como base que a velocidade do arame tem relação com aumento de corrente e energia efetiva por tempo, se pode conseguir um equilíbrio com aumento da energia de fusão, que é dada pela corrente e a tensão, mas pode aumentar-se com a frequência sem mudar valores de tensão e corrente de pico.

Nos testes seguintes os parâmetros foram misturados sem repetir os valores dos testes anteriores. Foram feitas combinações diferentes tentando diminuir a energia e aumentar a velocidade até alcançar a estabilidade. Por exemplo, ir diminuindo a corrente de pico e a tensão para diminuir a energia e aumentar a velocidade do arame para tentar diminuir os respingos da solda.

Tabela 4.12. Outras variações dos parâmetros para uma melhor compreensão do estudo da geometria

REFERENCIA	lb	lp	Tp	Fr	Tensão	Va
Cordão 8	80	380	1,5	200	26	7,5
Cordão 9	80	378	1,5	200	26	6,0
Cordão 9 R	40	375	1,5	200	23	6,0
Cordão 11	80	385	1,5	200	26	6,0
Cordão 12	80	385	1,5	200	22	7,5
Cordão 13	80	380	1,5	200	24	7,0
Cordão 14	80	380	1,5	200	24,5	6,5
Cordão 15	80	380	1,5	200	24	6,0

Ainda com a diminuição da corrente de pico, tempo de pico, tensão e com diferentes velocidades de arame não foi possível conseguir uma solda sem nenhum respingo. Somente ao aumentarmos a frequência não houve mais respingos e a estabilidade aumentou.

Os últimos testes foram feitos para diminuir a energia utilizada na formação da solda e assim economizar energia.

Tabela 4.13. Outros testes realizados na procura de minimizar a energia

REFERENCIA	lb	lp	Tp	Fr	Tensão	Va	Is	Ts	Ind	Vt
Cordão 27	80	380	2,5	200	26	6,5	110	0,8	0,10	10
Cordão 28	80	375	1,5	250	24,5	6,4	110	0,8	0,10	10
Cordão 29	80	360	2,0	250	24,5	6,4	110	0,8	0,10	10
Cordão 30	75	300	2,0	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 31	75	300	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 32	75	320	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 33	75	280	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 34	75	250	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 35	75	200	1,5	250	24	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 36	75	150	1,5	250	24	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 37	70	120	1,5	250	22	6,0	110	0,5	0,10	10

Fez-se uma tabela com a recopilação de todos os dados trabalhados nesses testes.

Tabela 4.14. Resumo de todos os testes feitos para GMAW-P.

Unidades para I em (A), Fr (Hz), Tensão (v), Va (m/min), Vt (mm/s) e Tp e Ts em (s)

REFERENCIA	Ib	Ip	Tp	Fr	Tensão	Va	Is	Ts	Ind	Vt
Cordão 0	15	320	2,0	52	20	2,0	50	0,8	0,25	10
Cordão 1	15	350	2,0	52	20	2,0	50	0,8	0,25	10
Cordão 2	15	370	2,0	52	20	2,0	50	0,8	0,25	10
Cordão 3	15	350	2,5	52	20	2,0	50	0,8	0,25	10
Cordão 4	15	350	3,0	52	20	2,0	50	0,8	0,25	10
Cordão 2R	15	370	2,0	52	20	2,5	50	0,8	0,25	10
Cordão 1 A	80	320	2,0	200	26	8,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 2 A	80	380	2,0	200	26	8,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 3A	80	450	2,0	200	26	8,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 4A	80	380	1,5	200	26	8,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 5	80	380	3,0	200	26	8,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 6	80	380	2,5	200	26	8,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 7	80	370	2,5	200	26	7,5	110	0,8	0,25	10
Cordão 8	80	380	1,5	200	26	7,5	110	0,8	0,25	10
Cordão 9	80	370	1,5	200	26	7,5	110	1,0	0,25	10
Cordão 10	80	385	2,5	200	26	7,5	80	1,0	0,25	10
Cordão 11	80	385	1,5	200	26	8,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 12	80	385	1,5	200	22	7,5	110	0,8	0,25	10
Cordão 13	80	380	1,5	200	24	7,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 14	80	380	1,5	200	24	6,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 15	80	380	1,5	200	25	6,0	110	0,8	0,25	10
Cordão 16	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 17	80	380	2,5	200	26	7,5	110	0,8	0,10	10
Cordão 18	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	8
Cordão 19	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	6
Cordão 20	80	380	2,4	240	26	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 21	80	380	2,2	280	26	7,0	110	0,5	0,10	10
Cordão 22	80	378	2,2	280	26	7,0	110	0,5	0,10	12
Cordão 23	80	378	2,4	240	26	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 24	80	378	2,4	240	25	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 25	80	378	2,4	240	24,5	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 26	80	378	2,4	240	27	7,0	110	0,8	0,10	10
Cordão 27	80	380	2,5	200	26	6,5	110	0,8	10	10
Cordão 28	80	375	1,5	250	24,5	6,4	110	0,8	0,10	10
Cordão 29	80	360	2,0	250	24,5	6,4	110	0,8	0,10	10
Cordão 30	75	300	2,0	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 31	75	300	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 32	75	320	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 33	75	280	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 34	75	250	1,5	250	24,5	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 35	75	200	1,5	250	24	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 36	75	150	1,5	250	24	6,4	110	0,5	0,10	10
Cordão 37	70	120	1,5	250	22	6,0	110	0,5	0,10	10

Os três primeiros testes sombreados com cor verde cinza (amostra 1, 8 e 10) são os melhores desse grupo, mas ainda com respingos na solda e instabilidade, os 4 testes seguintes sombreados com cor azul (20,21,23 e 24) são os mais estáveis do grupo com frequência 240 Hz e os cordões sombreados com verde claro (29 e 32) são os melhores do último grupo onde foi diminuída a energia, mas com um pouco de instabilidade na solda.

Em seguida se apresenta as medidas dos parâmetros de saída no cordão, largura e reforço com seu desvio padrão. As medidas foram feitas em diferentes partes do cordão, do início até o final dele, utilizando-se a medida direta com paquímetro e a medida com um detector laser calibrado. A seguir foi feito o resumo dessas medidas eliminando-se as medidas do início e final do cordão, que apresentaram consideráveis variações na largura e reforço do cordão.

Tomaram-se 4 dados por cordão para medir a largura e o reforço, e se fez uma média dos dados; os dados dos extremos foram medidos, mas não foram tomados na média só 4 dados em diferentes pontos da solda. Calculou-se o desvio padrão para todas as medidas.

Tabela 4.15. Medidas de reforço e largura com o desvio padrão.

REFERENCIA	Largura		Reforço	
	Media das medidas na parte central do cordão (mm)	Desvio padrão (mm)	Media das medidas na parte central do cordão (mm)	Desvio padrão (mm)
Cordão 0	3,53	0,173	1,43	0,107
Cordão 1	3,94	0,205	1,68	0,123
Cordão 2	5,01	0,224	2,23	0,095
Cordão3	3,91	0,197	1,57	0,083
Cordão 4	3,98	0,219	1,69	0,110
Cordão 1A	7,23	0,257	2,93	0,128
Cordão 2A	7,53	0,298	3,10	0,099
Cordão 3A	7,80	0,304	3,26	0,147
Cordão 4A	7,22	0,276	3,07	0,116
Cordão 5	7,80	0,288	3,28	0,130
Cordão 6	7,71	0,245	3,19	0,117
Cordão 6 P	4,06	0,198	1,62	0,075
Cordão 7	7,30	0,310	3,19	0,128
Cordão 8	6,33	0,240	2,88	0,112
Cordão 9	4,85	0,283	2,34	0,105
Cordão 9 R	4,24	0,270	2,11	0,084
Cordão 10	7,01	0,235	2,73	0,097
Cordão 11	7,44	0,341	3,32	0,124
Cordão 12	5,02	0,235	2,43	0,138
Cordão 13	5,90	0,278	2,52	0,098
Cordão 14	6,23	0,291	2,79	0,127
Cordão 15	4,68	0,247	2,26	0,101
Cordão 16	7,51	0,292	2,98	0,125
Cordão 17	7,65	0,273	3,17	0,149
Cordão 18	7,94	0,264	3,20	0,152
Cordão 19	8,52	0,297	3,54	0,127
Cordão 20	7,52	0,198	3,31	0,095
Cordão 21	7,48	0,230	3,18	0,100
Cordão 22	7,11	0,223	2,95	0,112
Cordão 23	7,40	0,243	3,17	0,093
Cordão 24	6,55	0,205	2,87	0,110
Cordão 25	6,50	0,218	2,93	0,086
Cordão 26	8,14	0,288	3,25	0,125
Cordão 26 P	9,78	0,302	4,03	0,127
Cordão 27	6,83	0,233	3,31	0,108

Tabela 4.16. Cálculo da corrente média teórica dos primeiros testes.

REFERENCIA	GRUPO	I _b	I _p	T _p	Fr	Tensão	V _a	I _s	T _s	I _m
<i>Cordão 1</i>	Baixa Energia	15	350	2,0	52	20	2,0	50	0,8	51,3
<i>Cordão 2</i>		15	370	2,0	52	20	2,0	50	0,8	53,4
<i>Cordão 3</i>		15	350	2,5	52	20	2,0	50	0,8	60
<i>Cordão 2 A</i>	Alta Energia	80	380	2,0	200	26	8,0	110	0,8	204,8
<i>Cordão 3A</i>		80	450	2,0	200	26	8,0	110	0,8	232,8
<i>Cordão 6</i>		80	380	2,5	200	26	8,0	110	0,8	234,8

4.2.1. Determinação dos valores de indutância e forma do pulso

A análise da indutância foi feita para valores de 0%, 10%, 25% e 50%. Como os melhores resultados foram obtidos para 10% e 25% os cálculos foram feitos apenas para estes valores. O valor de 50% da indutância foi considerado regular com relação a geometria obtida da solda, ainda diminuiu muito a energia efetiva e, portanto, se considerou trabalhar com valores menores que este.

A fonte internamente tem um enrolamento ou bobina interna com um número de voltas do fio por onde circula a corrente que produz o fluxo magnético, a medida da indutância é dada em Henrys (Wb/A); este valor limita a subida da corrente opondo-se a ela, mas também existe uma indutância nos cabos, própria do sistema. Esta fonte tem o valor mínimo da indutância em 0 e o valor máximo em 5 que, dependendo da mudança da corrente o valor máximo representa uma oposição que pode ser de 70% baseado no ângulo de subida em relação na escala do tempo. A indutância é a constante de proporcionalidade que existe entre o fluxo magnético total gerado no processo de soldagem na formação do arco e a corrente.

$$\lambda = L * I$$

Onde: λ = Constante de Proporcionalidade da Indutancia
 L = Fluxo magnético
 I = Corrente

A indutância é importante para diminuir os valores de variação da corrente quando o processo de soldagem apresenta curtos-circuitos, desta forma melhora a solda diminui os respingos e gera estabilidade no processo evitando mudanças grandes de corrente com uma

tendência na resposta, comportando-se como um amortecedor. Neste trabalho se decidiu trabalhar com 10% da indutância. Na figura 4.30, mostra-se diferentes indutâncias e diferentes tempos de pico.

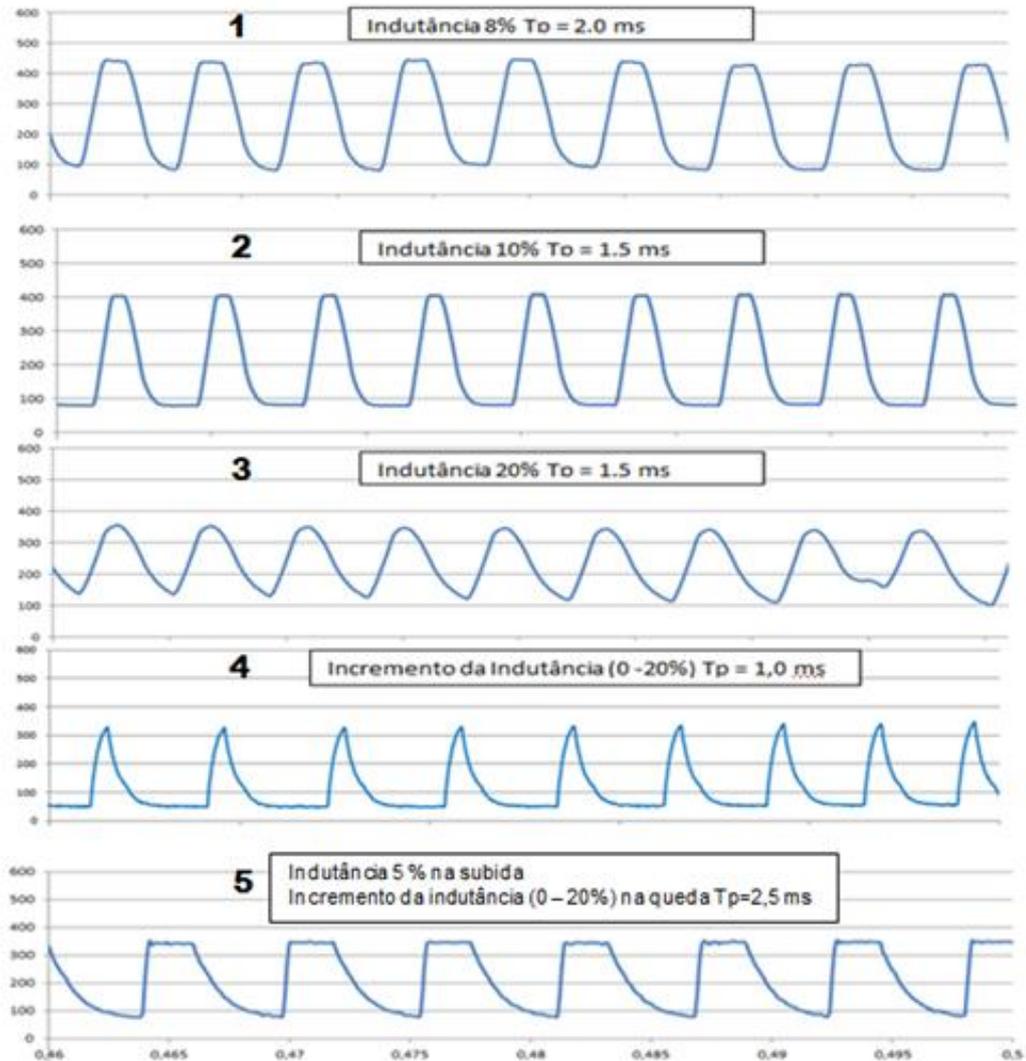


Figura 4.30. Oscilogramas de corrente com indutância alta e baixa e com tempos de pico diferentes para uma frequência de 200 Hz.

Os melhores resultados obtidos na geometria dos cordões e sua estabilidade foram com os pulsos 1 e 5.

Para um cordão com $f_r = 200$ Hz, $Ind = 0$ e $T_p = 2,5$ ms o pulso tende a ter pequenas oscilações. O aumento de indutância, diminui o tempo de pico e pode diminuir a amplitude da

corrente, então é inconclusiva o análises da indutância, não da para concluir somente aumentando a indutância, ela vem ligada com os outros parâmetros.

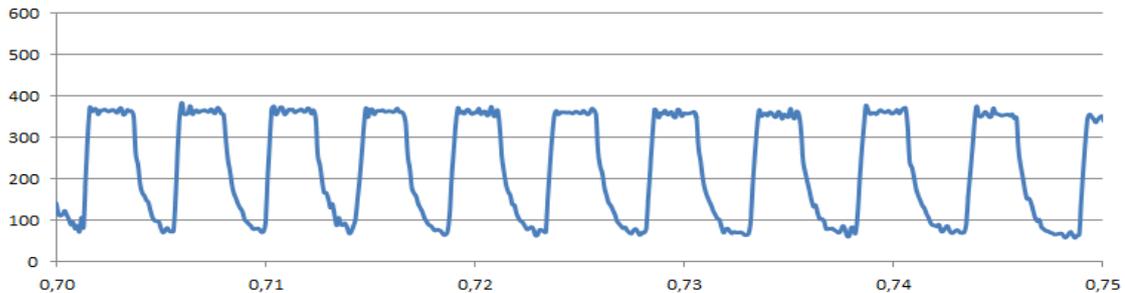


Figura 4.31. Oscilograma de corrente sem indutância e frequência de 200 Hz.

Para um cordão com $f_r = 200$ Hz, $Ind = 0,2$ e $T_p = 2,4$ ms o pulso tende a ter pequenas oscilações.

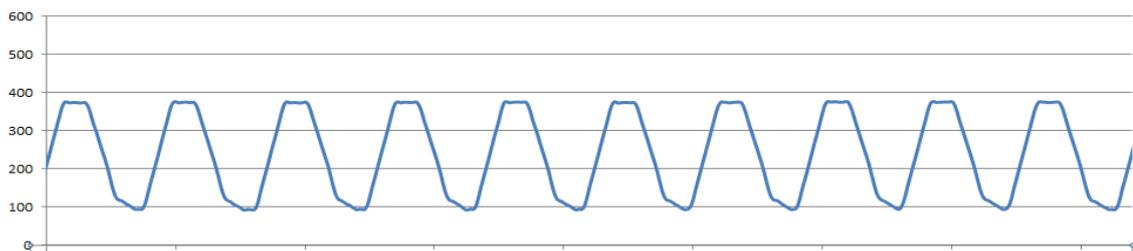


Figura 4.32. Oscilograma de corrente com indutância 25% e frequência de 200 Hz.

Para a determinação dos intervalos de tempo de pico, tempo de base e frequência, foi difícil decidir os valores porque para cada pulso na obtenção de bons parâmetros de saída e ausência de respingos as variações podem ser muitas, mas fazendo o cálculo da área baixo a curva e possível determinar mais facilmente a energia media com cálculos feitos em MatLab para diferentes valores de correntes e tempos, ate encontrar bons resultados baseados nos critérios e análises descritos antes. As diferentes formas do pulso podem apresentar melhores resultados ligando uns com outros no processo de soldagem, no entanto, considerando-se nossos parâmetros iniciais, os resultados dos oscilogramas e a observação direta do cordão, resolveu-se trabalhar com um pulso só de baixa indutância como o pulso 5 da figura 4.30 e também com uma composição de dois pulsos ou pulso com escada de correntes que foi o que obteve melhor resultado para o destacamento da gota sem utilizar muita energia como se amostra na figura 4.33. Porém, foi necessário realizar uma análise para determinar a corrente

média com os dois pulsos, sua corrente de pico, corrente de desprendimento, corrente de base e ainda determinar os tempos do pulso para a corrente do pulso e a corrente de desprendimento da gota.

A análise da corrente para o pulso de desprendimento ou separador das gotas e o tempo do pulso de desprendimento foram obtidos pelas seguintes equações:

$$I_s = I_b + (I_p - I_b) * 10\%$$

Onde: I_s = Corrente auxiliar do pulso para o desprendimento da gota ou separação da gota.

T_s = (20% - 50%) de T_p . Para este trabalho foi escolhido 30%

$$T_s = 0,3 * T_p$$

Onde: T_s = tempo do pulso para o desprendimento da gota

O valor de 10% para I_s e 30% para T_s , foi escolhido baseado em nos testes com tentativa e erro para obter melhores características dos cordões com um segundo pulso e baseado em os valores escolhidos de corrente media e corrente de pico encontrados com os critérios.

Portanto, para dois pulsos no mesmo ciclo, a maior corrente de pico com a qual se trabalhou foi 380 A, que apresenta bons resultados na geometria do cordão e soldagem sem respingos, a corrente de desprendimento foi de 110 A e, no caso da menor corrente de pico sem corrente de desprendimento, foi de 50A, estes testes apresentaram respingos.

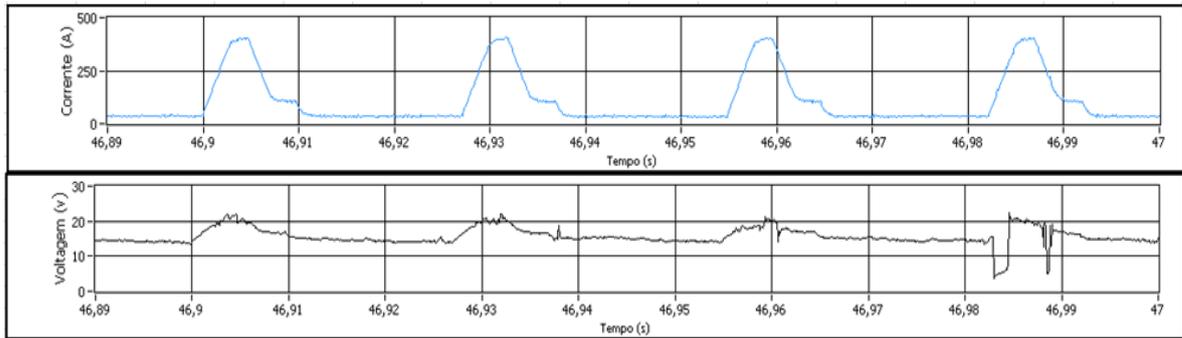


Figura 4.33. Teste com pulso duplo. $I_p=380A$, $I_s=110A$, $T_p=2.0$ ms, $T_s=0.8$ ms, $Ind=0.25\%$ e $fr = 52$ Hz Cordão 1.

O oscilograma de corrente tem um bom comportamento, mas o oscilograma de tensão apresenta diferenças que indicam instabilidade na solda, cabe ressaltar que a indutância esta expressada em porcentagem do valor máximo e não tem unidades em Henrys.

Para os testes de frequência=240 Hz, que mostrou melhores resultados, e o melhor dentre eles foi o teste do cordão 20 se apresenta aqui a forma do pulso de corrente e o sinal de tensão para este teste. Este cordão tem uma indutância de 10% e apresenta um segundo pulso para o desprendimento da gota.

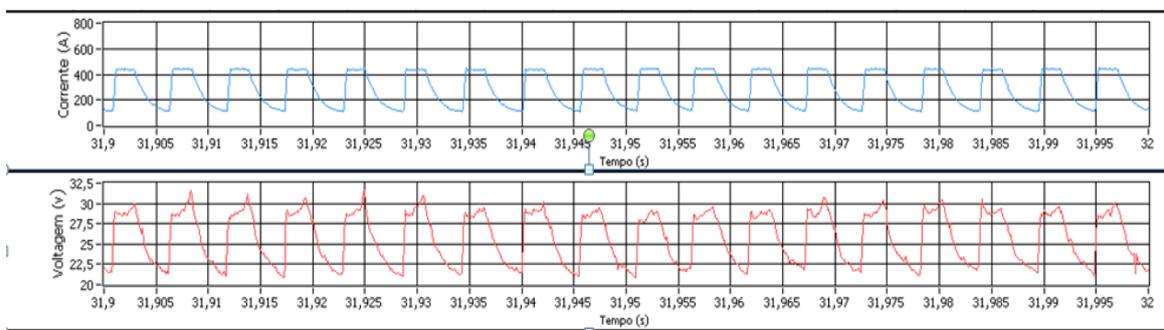


Figura 4.34. Oscilograma com um bom comportamento de corrente e tensão. Cordão 20. $I_p=380A$, $I_s=110A$, $T_p=2,0ms$, $T_s=0,8$ ms, $Ind=0,1$ e $fr = 240$ Hz.

Outros tipos de formas de onda que não apresentaram boas características e apresentaram instabilidade, pode-se observar na tensão dos seguintes oscilogramas Figura 4.35.

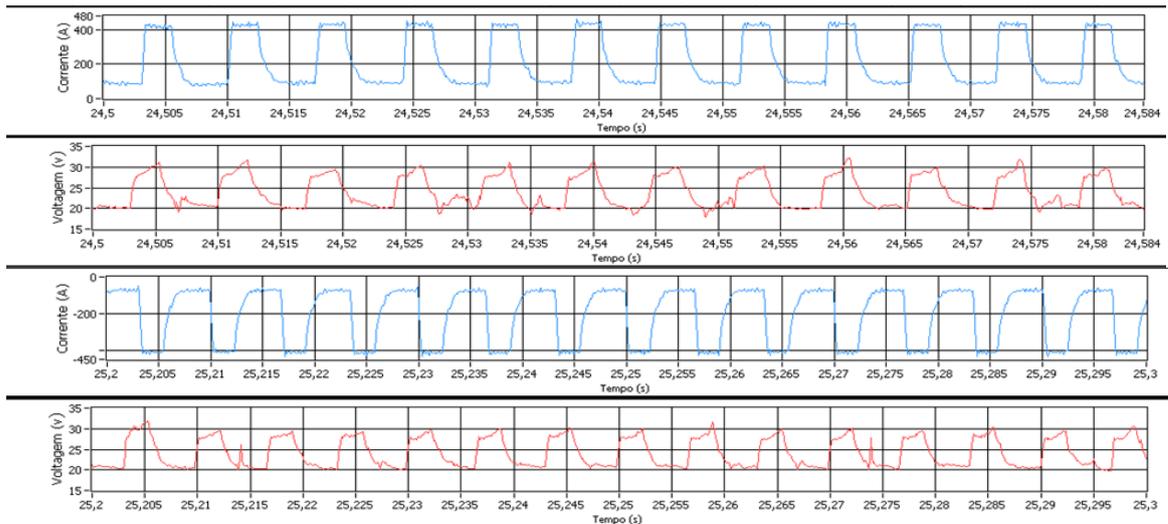


Figura 4.35. Oscilogramas de corrente e tensão com pulsos diferentes variando sua indutância na subida ou sua queda.

O comportamento do oscilograma de tensão para os testes anteriores da figura 4.35 não é muito estável, mas o oscilograma de corrente permanece estável sem apresentar curtos. Em seguida se apresenta na figura 4.37 a influencia da indutância no comportamento do ponto de interseção com o critério de Burnoff relacionada com o ponto de transição sem indutância na figura 4.36.

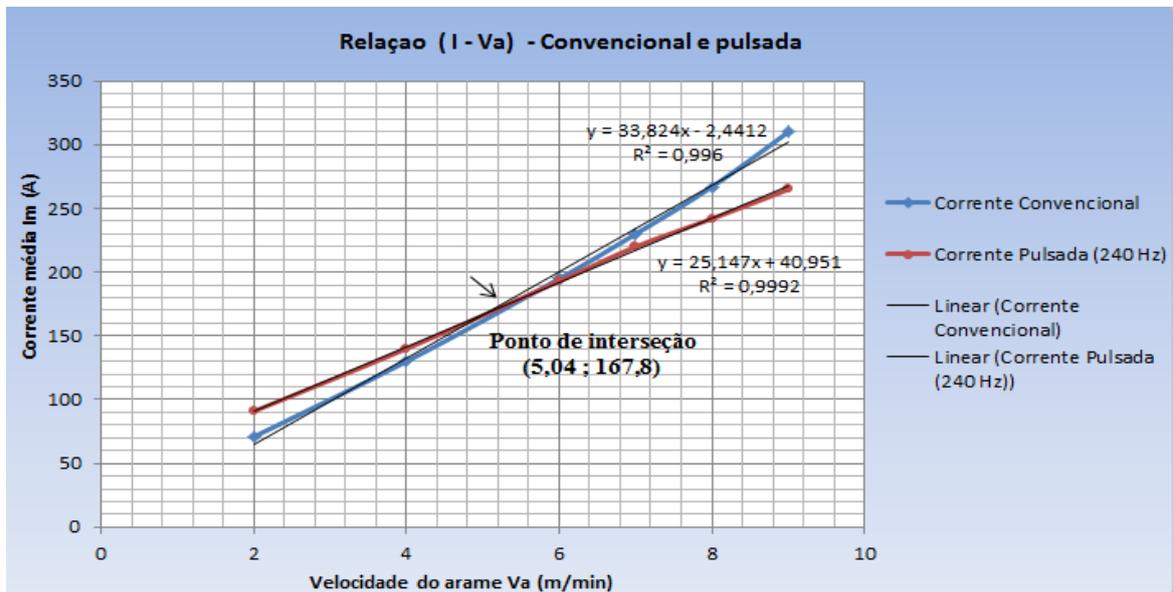


Figura 4.36. Ajuste de pontos por linhas retas e busca de sua interseção para as curvas V_a “versus” I_m obtidas para o processo convencional e pulsado sem indutância

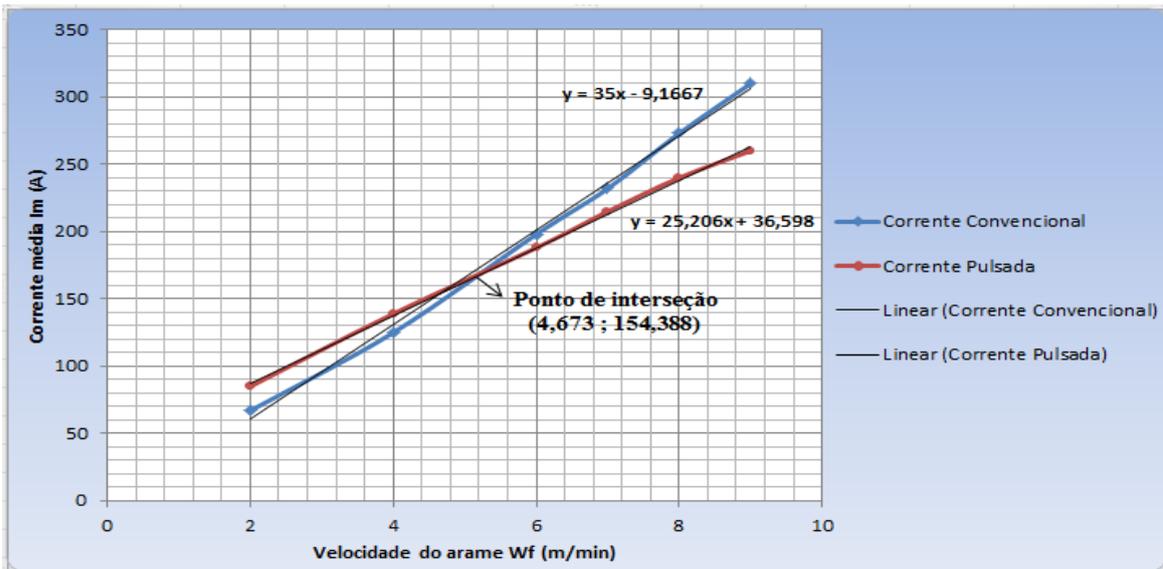


Figura 4.37. Ajuste de pontos por linhas retas e busca de sua interseção para as curvas V_a “versus” I_m obtidas para o processo convencional e pulsado com 20% indutância

4.2.2. Análise de corrente média, energia e estabilidade por meio de ferramentas de software

Foi feita para a análise dos sinais uma programação em MatLab, se calculou a corrente média do oscilograma e a regularidade da sinal no tempo, baseado no contagem dos sinais dentro e fora das zonas que delimitam um comportamento regular. Com o contagem de sinais homogêneas e dentro dos limites das faixas, é possível determinar uma estabilidade na oscilação da sinal com o tempo, o desenho da proposta está indicado mais para frente na figura 4.47. Também se apresenta a contagem dos curtos-circuitos, a homogeneidade do sinal e a energia efetiva. Na tabela 4.17 podemos visualizar a tabela resumida para os sinais com melhores resultados.

Tabela 4.17. Cálculo teórico e experimental da corrente média, energia e estabilidade

Referencia	Corrente media teórica (A)	Corrente media experimental (A)	Energia - valor teórico por ciclo (J)	Energia - valor experimental (J)	Estabilidade do sinal	Homogeneidade do pulso
Cordão 1 Baixa energia	51,3	48,57	12,61 J	12,64 J	70,4%	78,9%
Cordão 2	204,8	203,54	26,62 J	25,41 J	71,1%	81,6%
Cordão 8	174,8	174,13	22,72 J	21,73 J	75,8%	84,4%
Cordão 10	237,3	235,92	30,85 J	29,57 J	80,3%	87,1%
Cordão 20	261,5	259,8	27,87 J	27,80 J	92,5%	95,3%
Cordão 21	244,6	242,5	26,08 J	26,72 J	87,8%	89,2%
Cordão 23	260,3	258,9	27,75 J	27,23 J	90,3%	91,0%
Cordão 24	260,3	259,5	26,68 J	26,14 J	90,1%	91,7%
Cordão 29	203,1	199,3	20,40 J	21,05 J	84,2 %	81,5 %

Cabe ressaltar que a energia na tabela 4.17 é dada por ciclo e cada cordão pode apresentar tempos diferentes por ciclo. Um ciclo com tempo maior tem mais energia consumida nesse tempo, mas não necessariamente se gasta mais energia durante o processo completo.

A homogeneidade do pulso faz referência a comparação da área abaixo da curva dos pulsos e a sua forma, tanto para o tempo de pico como para o tempo de base; o programa feito em Matlab identifica a semelhança entre pulsos tanto em quantidade como em sua forma, ajudando a identificar um valor de referência para comparar com o valor da estabilidade da solda.

A respeito da energia se obteve testes com bons resultados mediante o modo de transferência GMAW-P, onde é usada uma energia mais baixa que com o modo GMAW Convencional. Porém, cabe ressaltar que, quando a energia é muito baixa, o processo tende a ser cada vez menos estável para os modos de transferência, entendendo por processo instável a formação de respingos e sinais não uniformes com presenças de curtos circuitos, mas pode ser estável em quanto ao fluxo de massa constante como no caso da transferência no modo curto circuito que usa energias muito baixas na transferência, mas com presença de respingos. Por isso, a energia utilizada nesta pesquisa para o arame de NiMO 410 deve ter valores altos de corrente de pico para cumprir com as características de fusão e densidade específicas do arame, mas com a transferência GMAW-P com uma alta estabilidade, a corrente média e a energia é menor que com a transferência goticular no modo convencional.

4.2.3. Comparação do tempo de estabilização entre GMAW Convencional e Pulsado

Para determinar o tempo que demora para se estabilizar o processo de soldagem, fez-se uma comparação da estabilização do sinal de corrente, entre GMAW Convencional e GMAW-P. O sinal de corrente está relacionado com outros parâmetros de entrada e saída motivo pelo qual permite determinar o tempo de estabilização para os diferentes modos de transferência metálica.

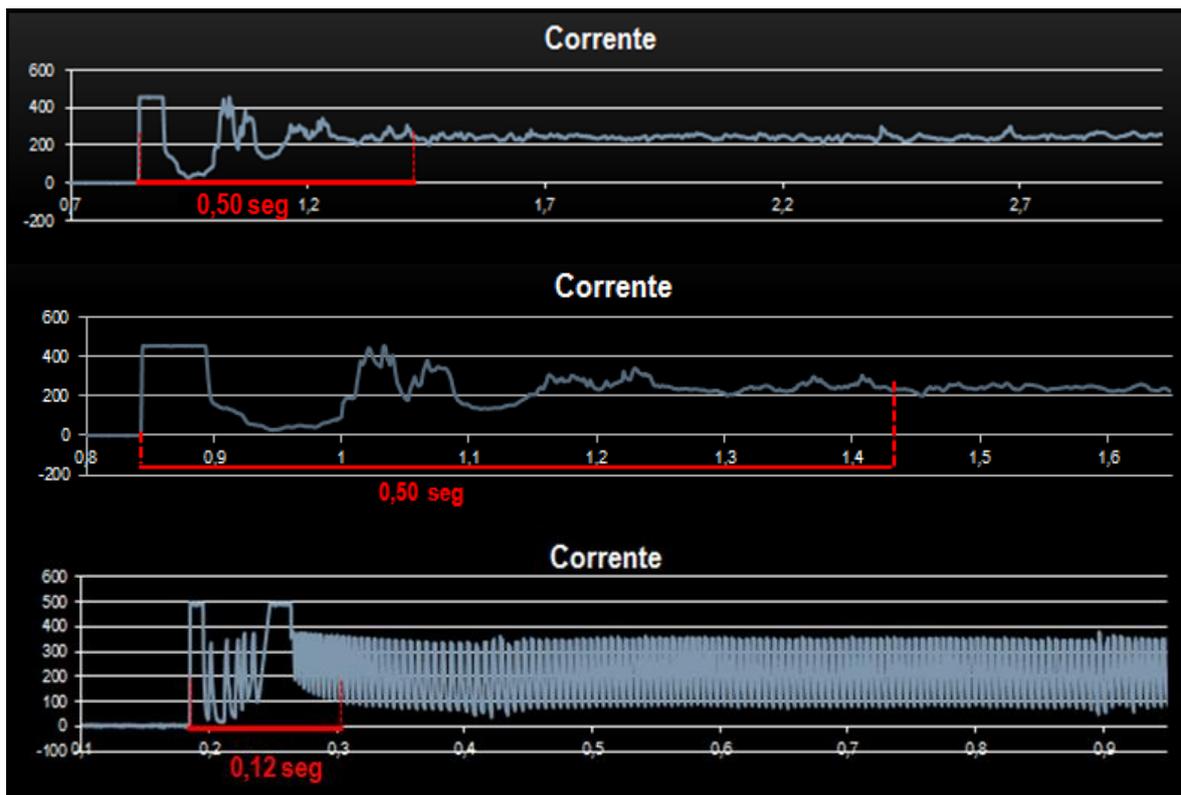


Figura 4.38. Relação entre GMAW Convencional e Pulsado determinando o tempo de estabilização da corrente no início do pulso.

Os dois primeiros oscilogramas de corrente são a mesma figura para a transferência GMAW Convencional, mas o segundo oscilograma foi ampliado para compara-lo com o oscilograma de GMAW-P na mesma escala.

Os valores e a forma do pulso com melhor resultado para um cordão com boas características geométricas sem respingos e boa estabilidade no processo são mostrados na figura 4.39

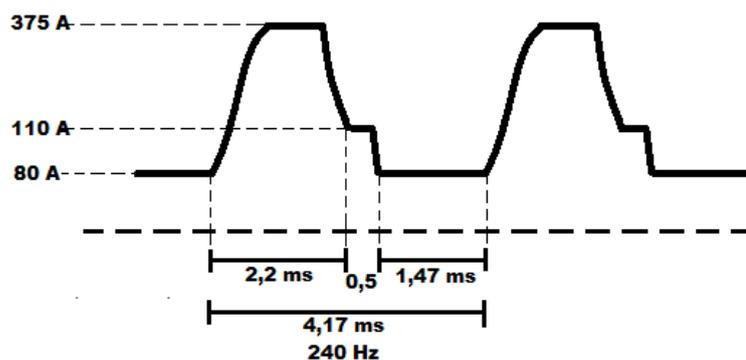


Figura 4.39. Pulso com valores e formato mais representativo para obter boas características.

4.3. DETERMINAÇÃO DE INSTABILIDADE E FALHAS NA SOLDA APLICANDO ANÁLISE DE SINAIS COM TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Para determinar a instabilidade nos sinais de corrente e tensão relacionada com a instabilidade do processo de soldagem e com as falhas na solda foi realizada uma análise de Fourier dos sinais de corrente e tensão e adicionalmente a aplicação de filtros; tudo isso com uma programação feita em Matlab, na qual se obtiveram dados interessantes, como a identificação de diferentes falhas por instabilidade na solda, causadas por mudanças nos parâmetros, e defeitos durante a soldagem, além de obter uma convergência dos sinais de resposta a uma frequência ou um grupo pequeno de frequências.

A análise de Fourier foi feita para 30 amostras escolhidas baseadas em análises anteriores, tendo apresentado melhores resultados em estabilidade as amostras 20, 21, 23 e 24. Um exemplo de como essa análise de Fourier pode determinar e classificar falhas é apresentado com a análise do sinal do cordão 15 que apresentava instabilidade. A análise com este método mostrou que o cordão apresentava instabilidade tanto na intensidade da corrente quanto na frequência e formato do pulso. Porém, nesse exemplo, o oscilograma foi feito só para 500 dados nos quais houve instabilidade por aumento de corrente, alterações na frequência e no formato do pulso, com o objetivo de perceber melhor a análise por Fourier.

Na primeira parte o sinal passou por um filtro de mediana de três dados, para diminuir o ruído. Depois, o domínio do tempo foi substituído pelo domínio da frequência por Fourier, tanto para o sinal original quanto para o sinal tratado com o filtro. Após isso, observou-se se as frequências para determinar as frequências representativas do pulso que pertencem a uma onda periódica e realizou-se uma subtração dos dois sinais da frequência para determinar as que possuem mais relevância na mudança do sinal periódico. Com esse sinal se aplicou um filtro de média e um filtro de mediana e, novamente, trocado ao domínio do tempo. Os dois sinais foram subtraídos com a original e entre si para observar onde são apresentadas as falhas, causadas tanto por mudanças na frequência do pulso como na intensidade ou por outras mudanças na periodicidade. Na Figura 4.40 as mudanças na intensidade estão representadas pela cor verde e as mudanças na frequência do formato, flutuações ou instabilidade, principalmente na corrente de base do pulso harmônico, estão representadas

pela cor vermelho. Ainda na Figura 4.43, podem ser vistas, representadas pela cor azul, todas as falhas sem filtros.

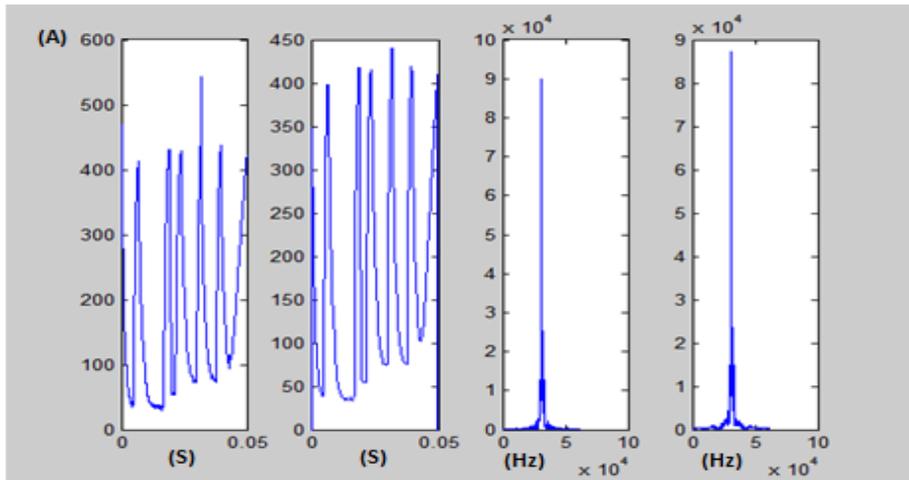


Figura 4.40. Sinal no domínio do tempo e de frequência para uma fração do oscilograma do cordão 15.

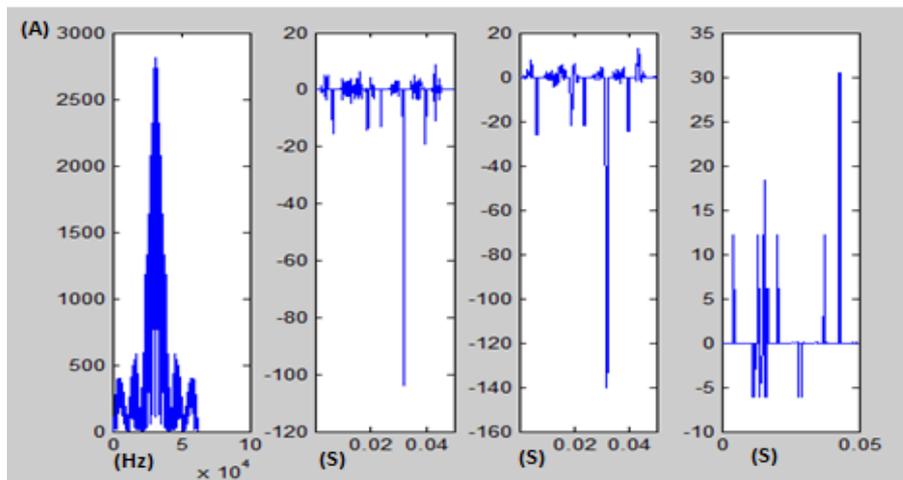


Figura 4.41. Aplicação de filtros de média e mediana do sinal obtida por Fourier.

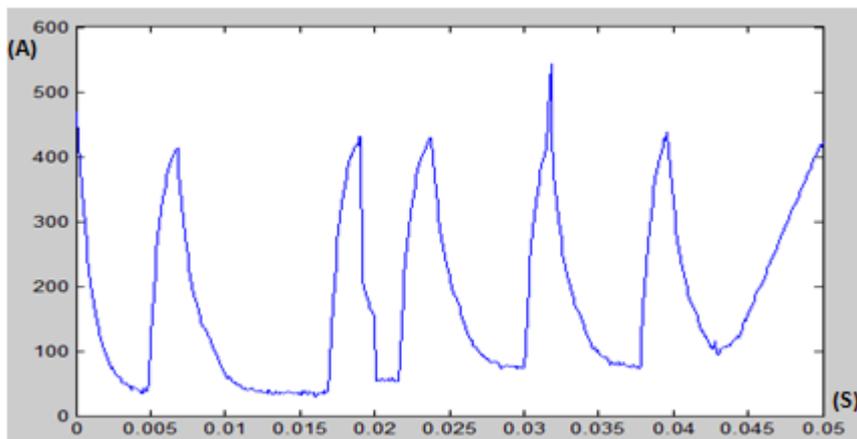


Figura 4.42. Sinal original de 500 dados no domínio do tempo (cordão 15).



Figura 4.43. Sinal no domínio do tempo após o tratamento com Transformada Rápida de Fourier e com os diferentes filtros. Em azul, o sinal original com os primeiros filtros, e em verde e vermelho, os demais filtros.

Na Figura 4.44, pode-se ver como no sinal original os picos mais altos são detectados com picos de cor verde e as falhas de instabilidade na corrente de base e na frequência da onda harmônica com vermelho. Na Figura 4.45, foi aplicado um filtro passa-alto e passa-baixo para deixar os sinais mais representativos e posteriormente amplificar o sinal.

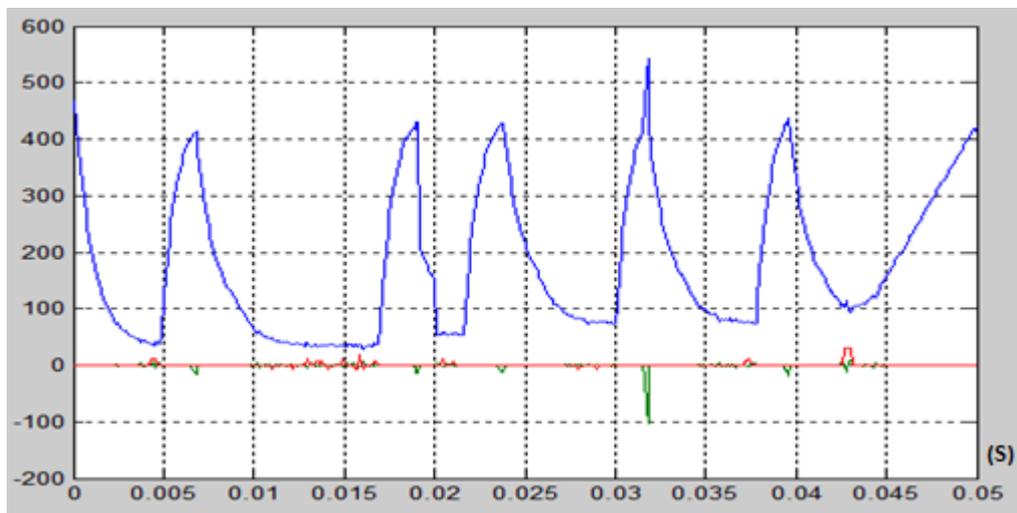


Figura 4.44. Comparação do sinal original com o sinal processado no domínio do tempo.

Pode-se observar na figura 4.44 que na comparação das sinais se detecta as falhas na periodicidade do sinal por mudanças de corrente e frequência, o sinal em verde e com picos para baixo identifica mudanças de corrente na periodicidade do sinal tanto com valor positivo

como negativo e os sinais em vermelho com picos para acima identifica as mudanças de frequência e outros defeitos por oscilações pequenas no sinal.

Para ver melhor o sinal é amplificada e filtrada novamente com filtros passa-alto para as sinais vermelhas e passa-baixo para as sinais verdes, deixando só as falhas mais representativas no sinal.

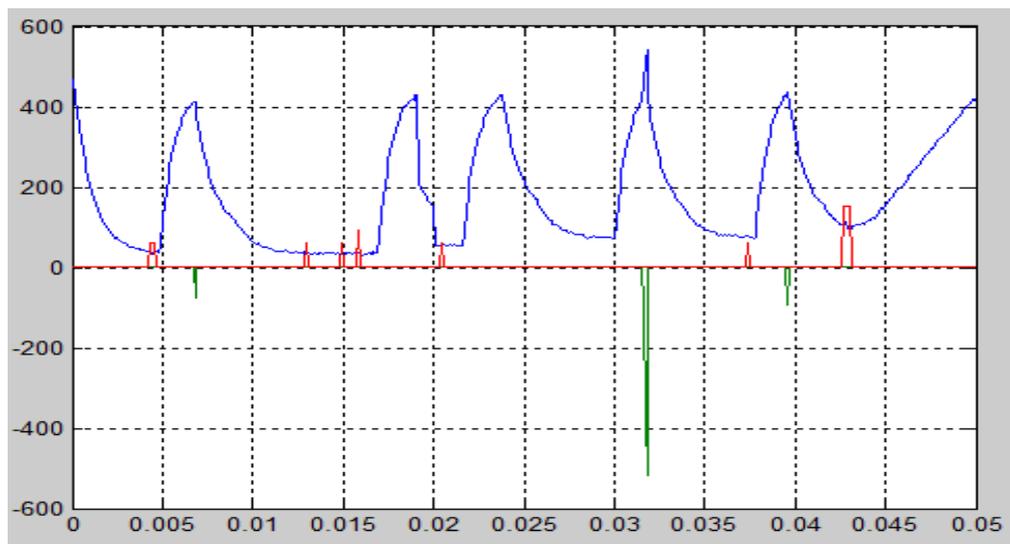


Figura 4.45. Aplicação de filtros passa-alto e passa-baixo com amplificação dos sinais.

Cabe destacar que neste tópico é apresentada a análise dos oscilogramas com a transformada rápida de Fourier, para os sinais que apresentaram melhores características no cordão e melhor comportamento e que tiveram sinais mais uniformes, principalmente os testes na parte central, onde se obteve a melhor estabilização dos sinais; estes testes que não apresentaram respingos da solda são: 20, 21, 23, 24 e 29. Estes testes e os quatro dos melhores testes iniciais, cordão 1, 2, 8 e 10, que são estáveis, apresentaram os seguintes resultados analisados com esta técnica.

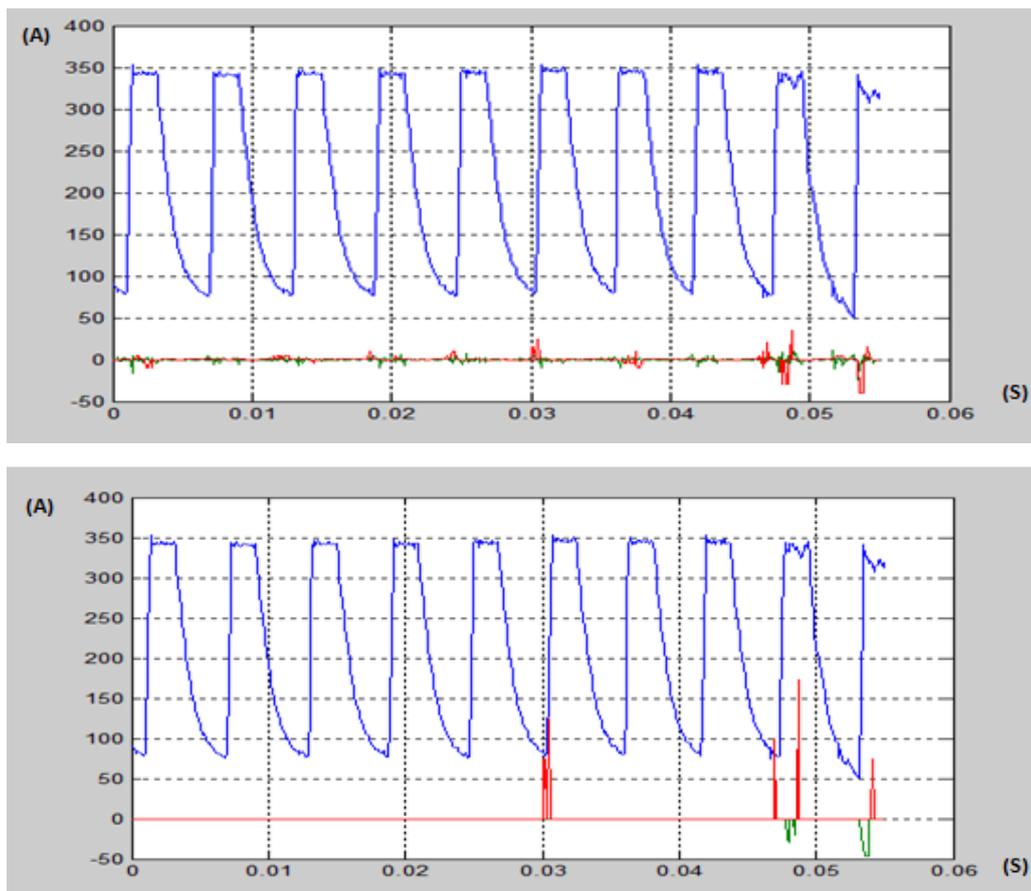


Figura 4.46. Comparação do sinal original com a sinal processada no domínio do tempo do teste 32. Aplicação de filtros passa-alto e passa-baixo com amplificação dos sinais.

Tabela 4.18. Cálculo da estabilidade da solda com programação em Matlab.

	Porcentagem de Estabilidade respeito a um sinal perfeita e os dados obtidos por Fourier
Cordão 1	80,3 %
Cordão 2	74,6%
Cordão 8	79,8%
Cordão 10	83,0 %
Cordão 20	92,4%
Cordão 21	87,5%
Cordão 23	89,2%
Cordão 24	90,5%
Cordão 29	85,1%

O melhor resultado foi para o cordão 20 seguido do cordão 24, os resultados corroboram com os testes anteriores que os parâmetros para estes cordões apresentam regularidade e estabilidade dos sinais com boa geometria no cordão.

4.4. ANÁLISE DE OSCIOGRAMAS PARA GMAW PULSADO

Programação e análise de estabilidade com MatLab e os oscilogramas obtidos.

4.4.1. Cálculo de estabilidade da solda com análises dos oscilogramas

Foi aplicada a programação em Matlab para determinar a estabilidade dos sinais de tensão e corrente para uma solda, levando em conta sua homogeneidade e mudanças tanto na frequência quanto na altura dos picos, bem como foi feito um cálculo da área dos pulsos. Os oscilogramas são analisados por faixas, nas quais se fez uma contagem dos dados que ficam nas zonas 1, 2, 3, 4 e 5, conforme figura 4.46, onde foi possível determinar tipos de estabilidade e homogeneidade baseados na quantidade de dados para cada zona. Para isso, foram propostas as seguintes faixas, abaixo apresentadas, nas quais se calculou uma porcentagem de dados para cada uma delas. Também se realizou um cálculo da área para cada pulso, dando, assim, um peso para cada análise. O programa entrega uma porcentagem da estabilidade para cada sinal analisado, tendo como base a homogeneidade do sinal e os erros por curtos-circuitos ou quedas de tensão e instabilidade no arco elétrico.

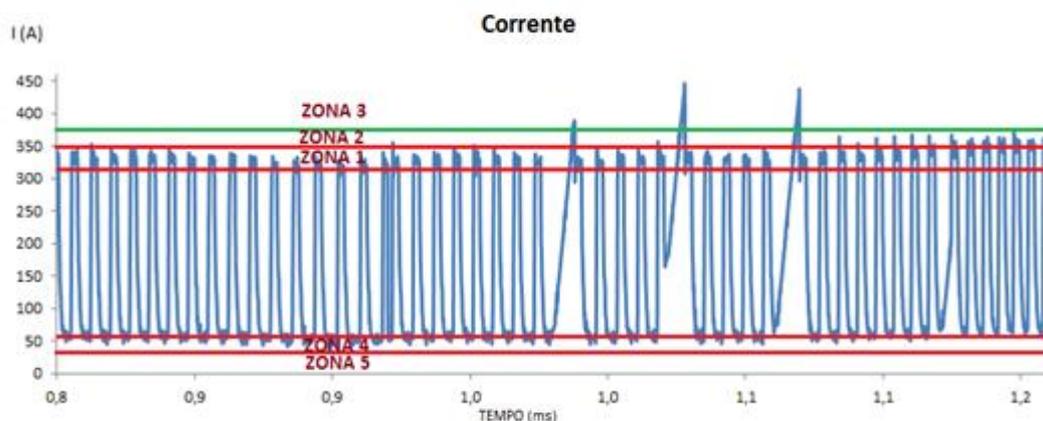


Figura 4.47. Faixas na programação da contagem de pontos para determinar a estabilidade.

O programa faz uma contagem dos dados do sinal na zona 1, que é a faixa ótima, onde a corrente de pico deve permanecer em todos os pulsos, se o sinal é considerado estável

respeito do formato do sinal no tempo e a geometria do cordão. A contagem dos pontos na zona 2 são pequenos aumentos da corrente, causados por defeitos durante o processo de soldagem ou mudanças nos parâmetros, considerados então instabilidades pequenas, e a contagem de pontos na zona 3 são defeitos maiores ou falhas no processo de soldagem, causadas por curtos-circuitos ou mudanças grandes nos parâmetros que geram instabilidades maiores no processo de soldagem e mudanças na geometria do cordão. Também foi medida a estabilidade dos pontos na zona 4, que é a faixa ótima para a contagem dos dados da corrente de base, e medida dos dados na zona 5, onde a corrente diminui devido à defeitos que geram instabilidade no arco elétrico.

Ao encontrar a porcentagem para os sinais das 30 amostras, foi possível identificar as amostras com mais estabilidade, isto é, as amostras 23, 24, 20, 10 e 21, respectivamente.

4.4.2. Problemas com frequências baixas e com a velocidade do arame

Neste caso, analisaram-se os 30 testes, escolhendo o cordão 15, que apresenta boa estabilidade. Porém, a cada 20 pulsos, aproximadamente, ele apresenta uma irregularidade, a saber, curtos-circuitos. Nesses períodos, podemos atribuir os curtos-circuitos a mudanças nas distâncias do comprimento do arco, mudanças estas ocorridas porque o fluxo de deposição em cada pulso ou a taxa de material fundido por segundo, referente a velocidade do arame, variam com o tempo, fazendo com que o comprimento do arco diminua, até o arame tocar o material, produzindo curtos-circuitos. Esse problema é muito mais fácil de controlar se a frequência é mais alta.

Na figura 4.48, apresenta-se um oscilograma de corrente, cada 20 pulsos apresenta um curto-circuito devido a sua instabilidade no comprimento do arco, onde o arame se aproxima muito da base até gerar um curto-circuito; diminuir a velocidade do arame não resolve em sua totalidade a instabilidade, por isso foi aumentada a frequência para aumentar a energia por tempos mais curtos e melhorar a estabilidade do processo como se vê na figura 4.49 para frequências de 240 Hz.

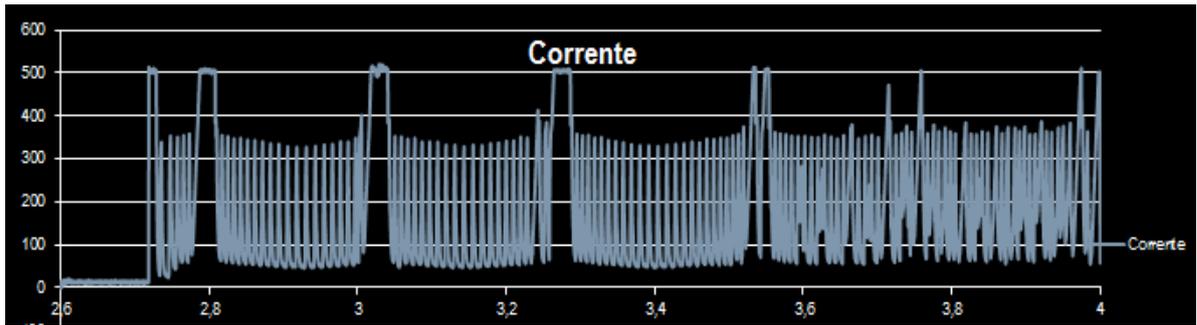


Figura 4.48. Oscilograma com frequência de 200 Hz. Teste do cordão 8

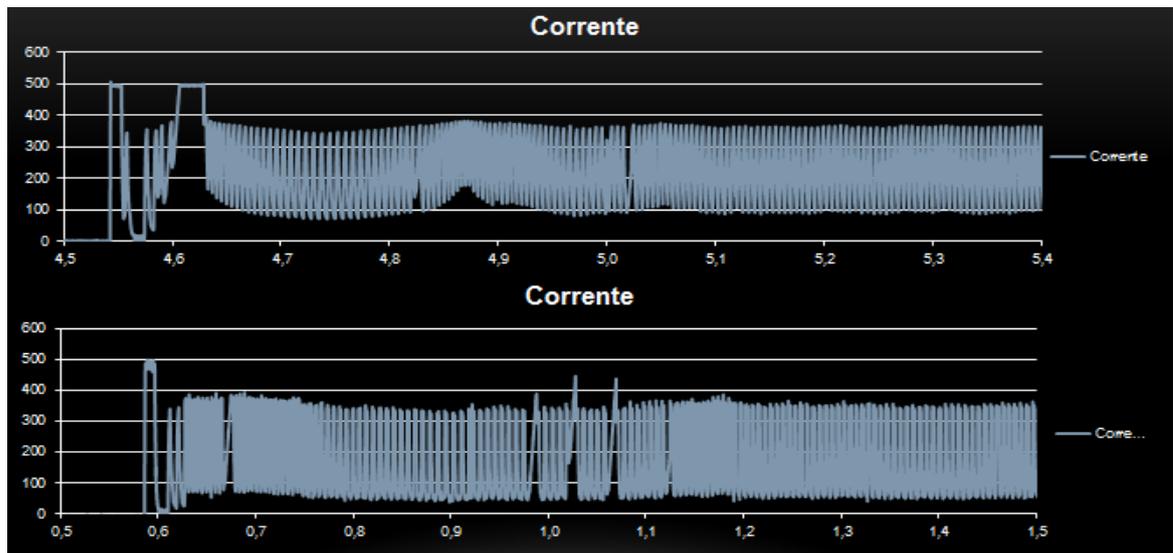


Figura 4.49. Oscilograma com frequência de 240 Hz cordão 23 e 24.

O aumento de frequência melhora a estabilidade do pulso como se pode observar nos anteriores oscilogramas, mas ainda apresenta picos e variações nos oscilogramas, em seguida um exemplo onde os oscilogramas são estáveis, mas apresentam instabilidade depois de um tempo devido a mudanças no comprimento do arco.

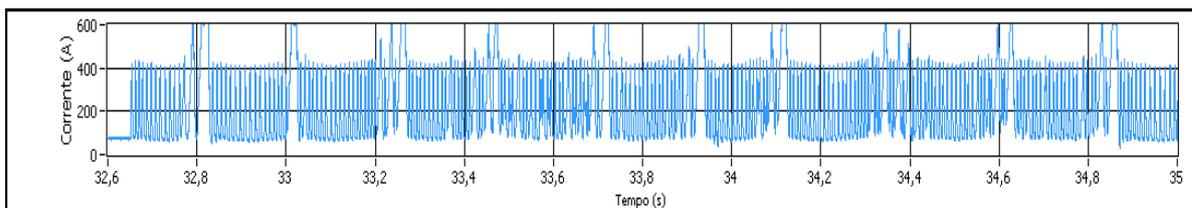


Figura 4.50. Oscilograma da corrente para a amostra 15. Dados de 32,6 s a 35 s.

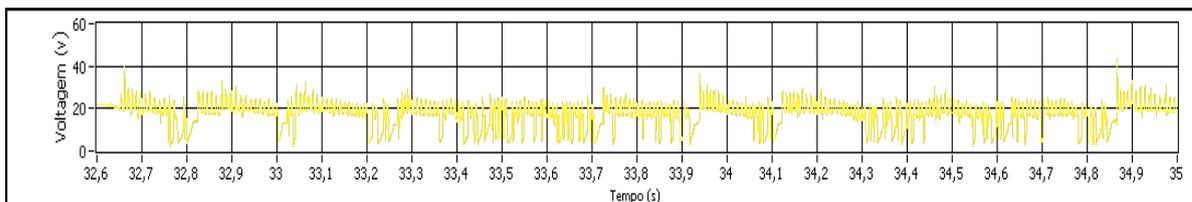


Figura 4.51. Oscilograma da tensão para a amostra 15. Dados de 32,6 s a 35s.

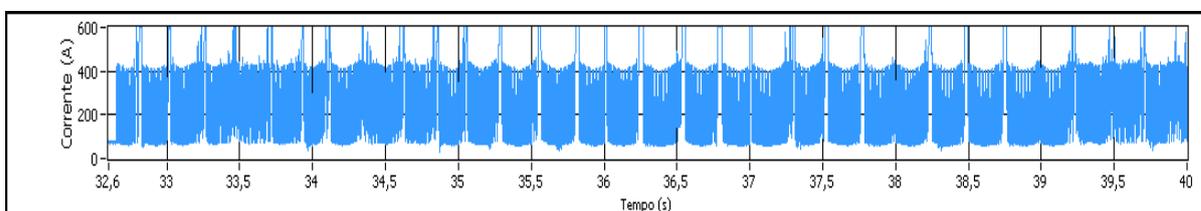


Figura 4.52. Oscilograma da corrente para a amostra 15. Dados de 32,6 s a 40 s.

Devido a instabilidade nos cordões feitos com frequências de 200 Hz, causada pela dificuldade de controlar a velocidade do arame referente à energia de fusão, ou ao calor efetivo para derreter o arame na transferência spray ou goticular, foi necessário o aumento da frequência para evitar que o arame se aproximasse do material de base, gerando, desta maneira, curtos-circuitos. O aumento da frequência deve-se ao fato de que, com frequências menores, os tempos mais longos geram mais instabilidade. Aumentando a frequência, pode-se trabalhar com a mesma energia sem mudar a transferência de uma gota por pulso e aumentar a estabilidade para evitar que o arame sofra mudanças na distância, ficando sempre com o mesmo comprimento do arco.

Para os cordões ou amostras 18, 20 e 21 a frequência foi modificada para 240 e 280, onde mostraram melhor estabilidade e ausência de curtos e respingos na solda. No entanto, a frequência escolhida foi 240, por causa da estabilidade.

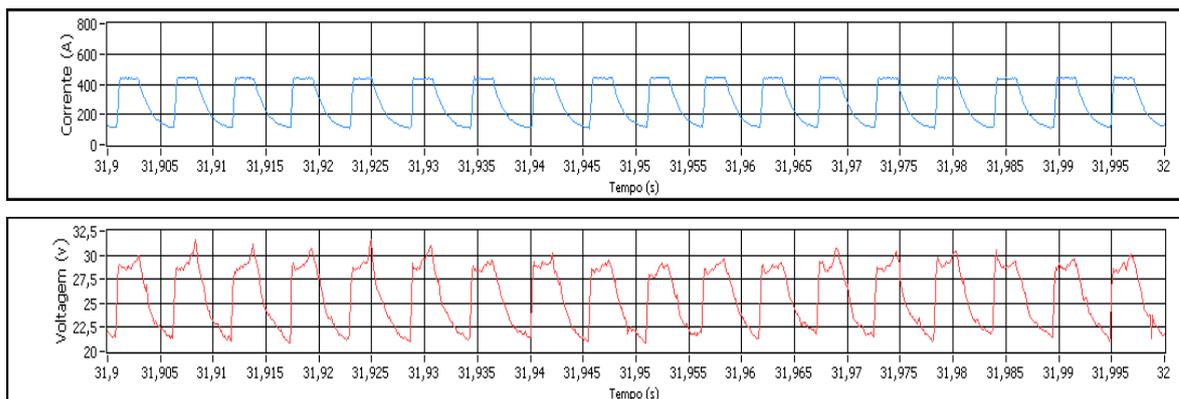


Figura 4.53. Oscilogramas de corrente e tensão da amostra 20. Dados entre 31,9 s até 32 s.



Figura 4.54. Fotos da solda da amostra 20.

As figuras 4.52 e 4.53 apresentam os resultados dos oscilogramas e fotografias da amostra com melhores resultados tanto por inspeção visual na geometria do cordão, como também na uniformidade nos sinais de corrente e tensão.

A figura 4.52 apresenta o oscilograma de corrente e o oscilograma de tensão com boa uniformidade no sinal, indicando ausência de respingos e uma única gota por pulso.

A figura 4.53 apresenta duas fotografias da amostra 20, onde se tem ausência de respingos e uma boa geometria do cordão.

4.4.3. Cálculo de UGPP

De acordo com a análise dos dados encontrados acima para os 30 testes, mostram-se os oscilogramas de duas das amostras mais representativas, que apresentam boa geometria de cordão, mas com diferente valor da corrente de pico, diferente frequência e diferente indutância.

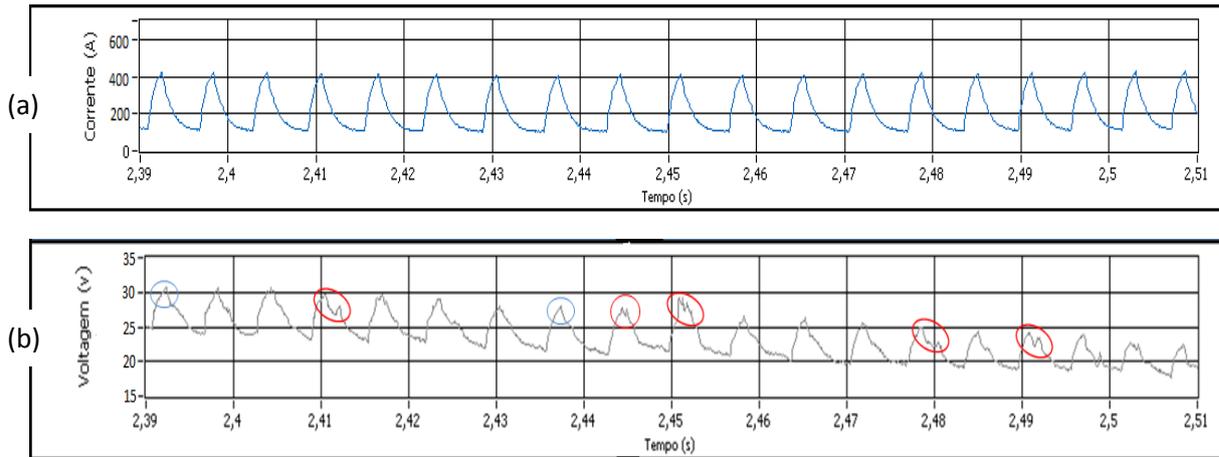


Figura 4.55. a) Gráfico (I vsT) Cordão 10, alta indutância, Ip 385A, Ib 80 A, Tensão 26v, Va 6m/min e frequência 180Hz b) Gráfico (v vsT).

A alta indutância faz com que o pulso aumente devagar até o seu valor máximo, da mesma forma, ela diminui devagar, portanto, não permite que o tempo de pulso fique no ponto máximo por muito tempo, tendo em vista a alta frequência de pulso; por esta razão diminui a energia e a potência suficiente para a formação de uma gota. A Figura 4.55(a) mostra o gráfico de corrente para o cordão 10, que é estável e homogêneo, e não apresenta curtos-circuitos, porém, pela alta indutância, a forma do pulso é triangular ou “serrada”, portanto, o aporte energético é menor. A Figura 4.55(b) mostra o gráfico de tensão do cordão 10, sinalizando os pulsos com um único pico em azul e dois picos em vermelho, os quais são relacionados pela quantidade de gotas isoladas ou oscilações da mesma. Quando há dois picos definidos é porque são geradas duas gotas e, quando há dois picos com formas heterogêneas, é porque pode acontecer a formação de uma gota grande e uma pequena, esta última gerada pela atração da tensão superficial da gota grande com o material fundido, ou pode ser uma oscilação da gota gerada.

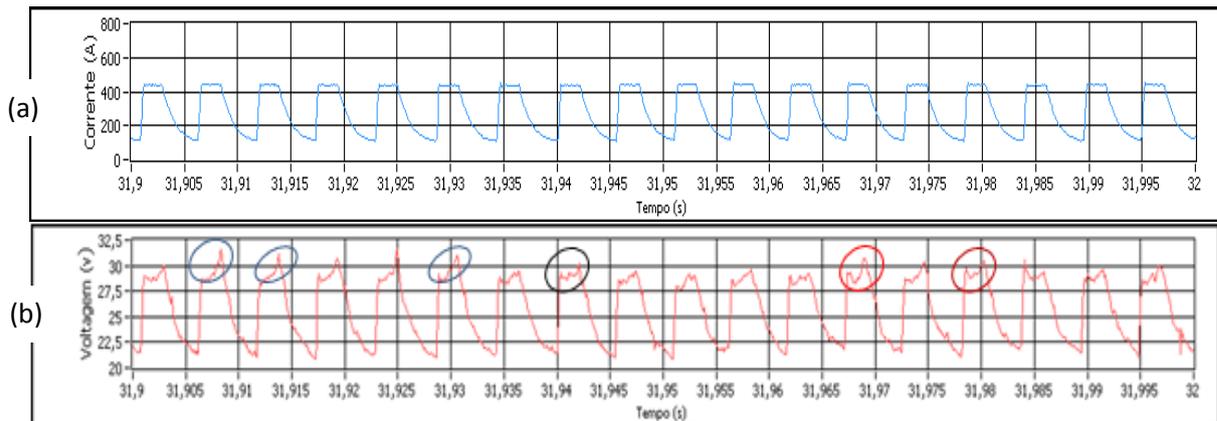


Figura 4.56. Cordão 18, baixa indutância, I_p 380A, I_b 80A, Tensão 26v, V_a 7m/min, Frequência 200Hz.

Na Figura 4.56(a), o gráfico de corrente para o cordão 18 é homogêneo, muito estável, isto é, não apresenta curtos-circuitos. Na Figura 4.56(b), o gráfico de tensão para o cordão 18 sinaliza os pulsos com um único pico e dois picos, conforme explicado acima, devido à formação de duas gotas ou de oscilações na gota gerada.

Para os cordões 20 a 24, com frequência de 240Hz, os picos são mais estáveis e homogêneos e apresentam um único pico de forma mais definida.

4.5. ANÁLISE DA SOLDA E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO COM IMAGENS OBTIDAS POR PERFILOGRAFIA

Com a aplicação dessa técnica, isto é, da perfilografia, foi comprovado que é gerada uma gota por pulso nos cordões que têm elevada estabilidade e boa geometria, conforme mostrado na Figura 4.56. Nas figuras acima indicou-se a formação de duas gotas ou oscilações de uma gota para os oscilogramas que apresentaram dois picos em cada pulso. Nas figuras 4.57 a 4.61 a análise com perfilografia comprova isso, de maneira visual, por meio de filmagem ou fotografias do processo.

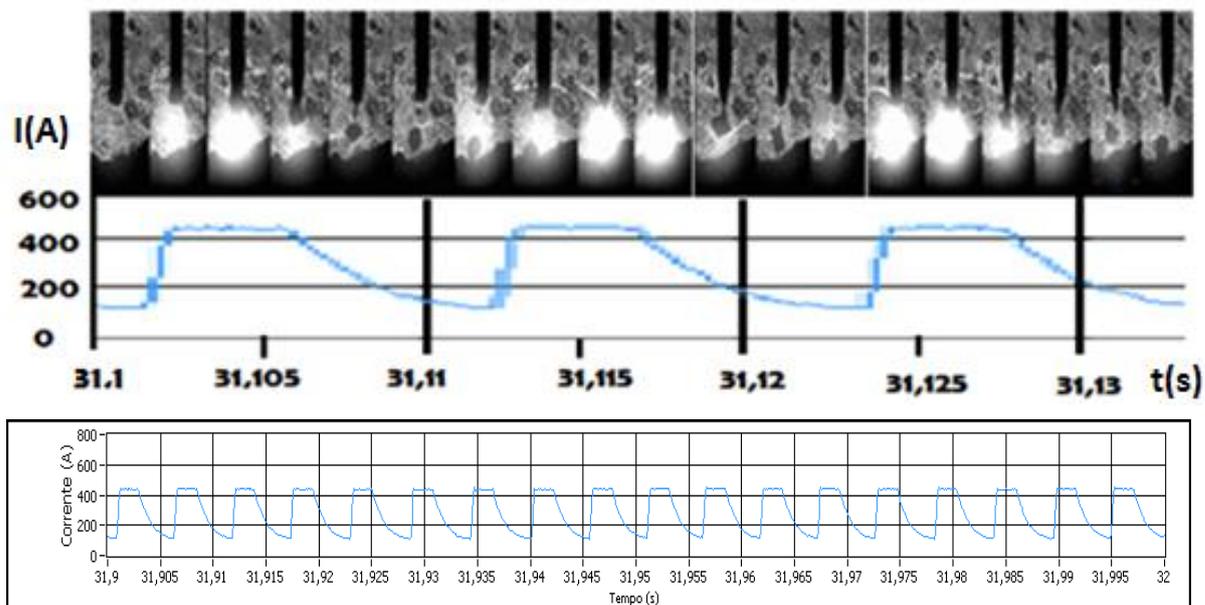


Figura 4.57. Sequência de imagens por perfilografia com comparação no tempo do oscilograma de corrente da amostra 20.

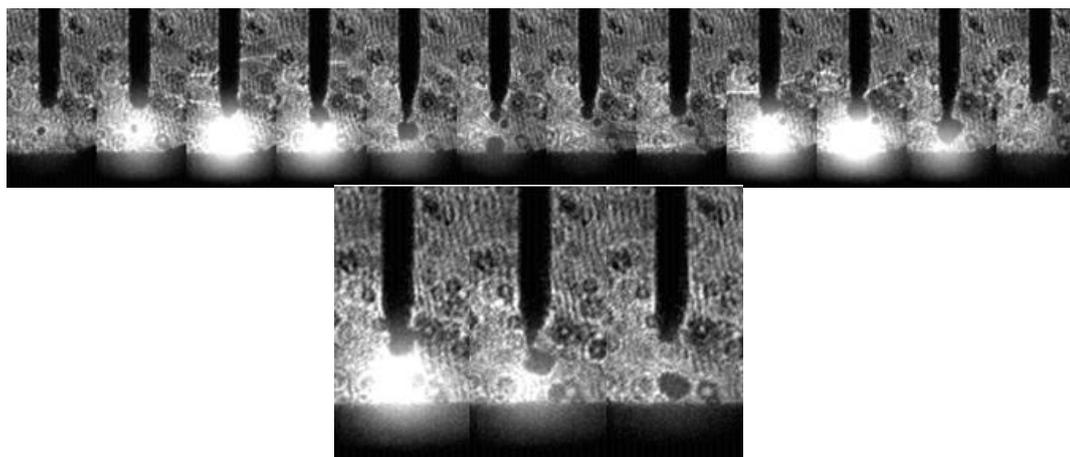


Figura 4.58. Tamanho da gota por pulso amostra cordão 20.

Pode-se observar que o tamanho da gota tem o diâmetro igual ao diâmetro do arame.

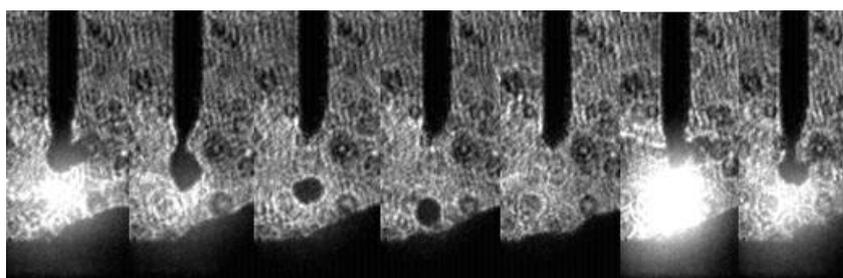


Figura 4.59. Imagens em GMAW-P de uma gota por pulso.

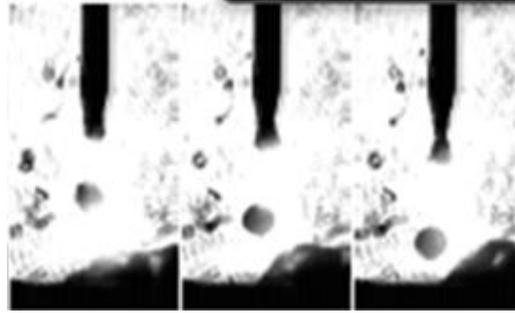


Figura 4.60. Imagens em GMAW-P de duas gotas por pulso.

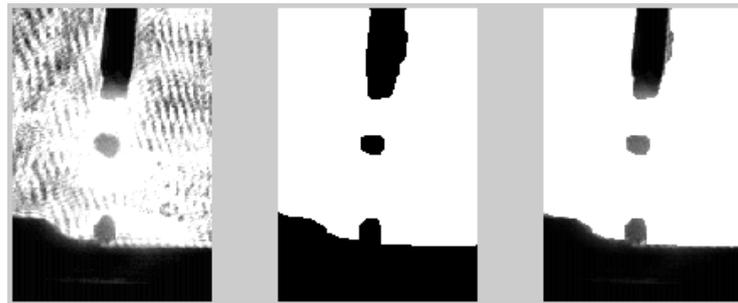


Figura 4.61. Procesamento de imagens em GMAW-P com duas gotas por pulso

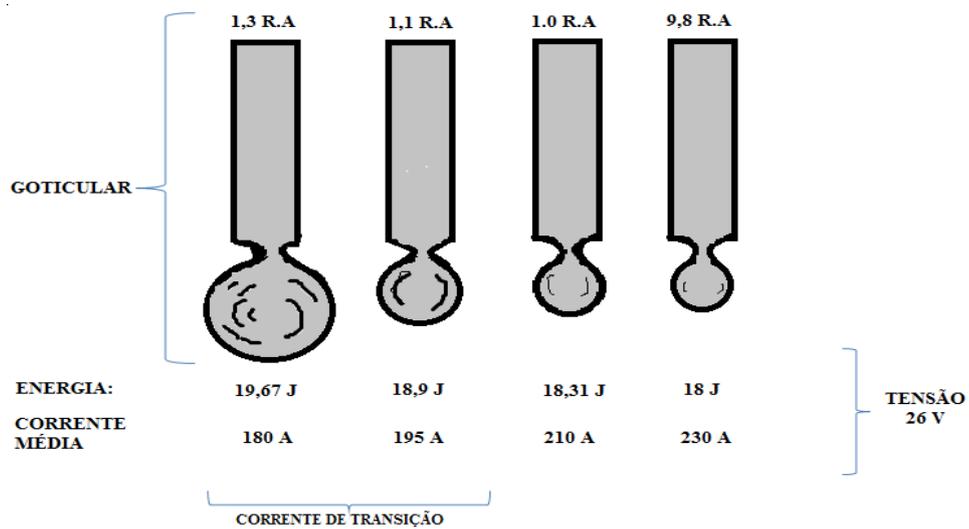


Figura 4.62. Cálculo do tamanho da gota em goticular com diferentes correntes.

4.6. MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Depois de fazer a análise dos melhores parâmetros para o trabalho final na programação do robô, a fim de obter camadas com boas características, é indispensável determinar os valores das medidas de um cordão com boas características, para isso se colocarão as medidas dos cordões mais estáveis e com melhor geometria, cordão 1, 10, 20,

21, 23 e 24. Ver tabela 4.15 e 4.14 das medidas da geometria e parâmetros, respectivamente. Neste item foram analisadas as medidas dos melhores cordões, as análises das camadas e superposição de cordões com os resultados obtidos aqui é feito no item 4.8.

4.6.1. Cálculo da largura, reforço e área transversal feito pelo scanner

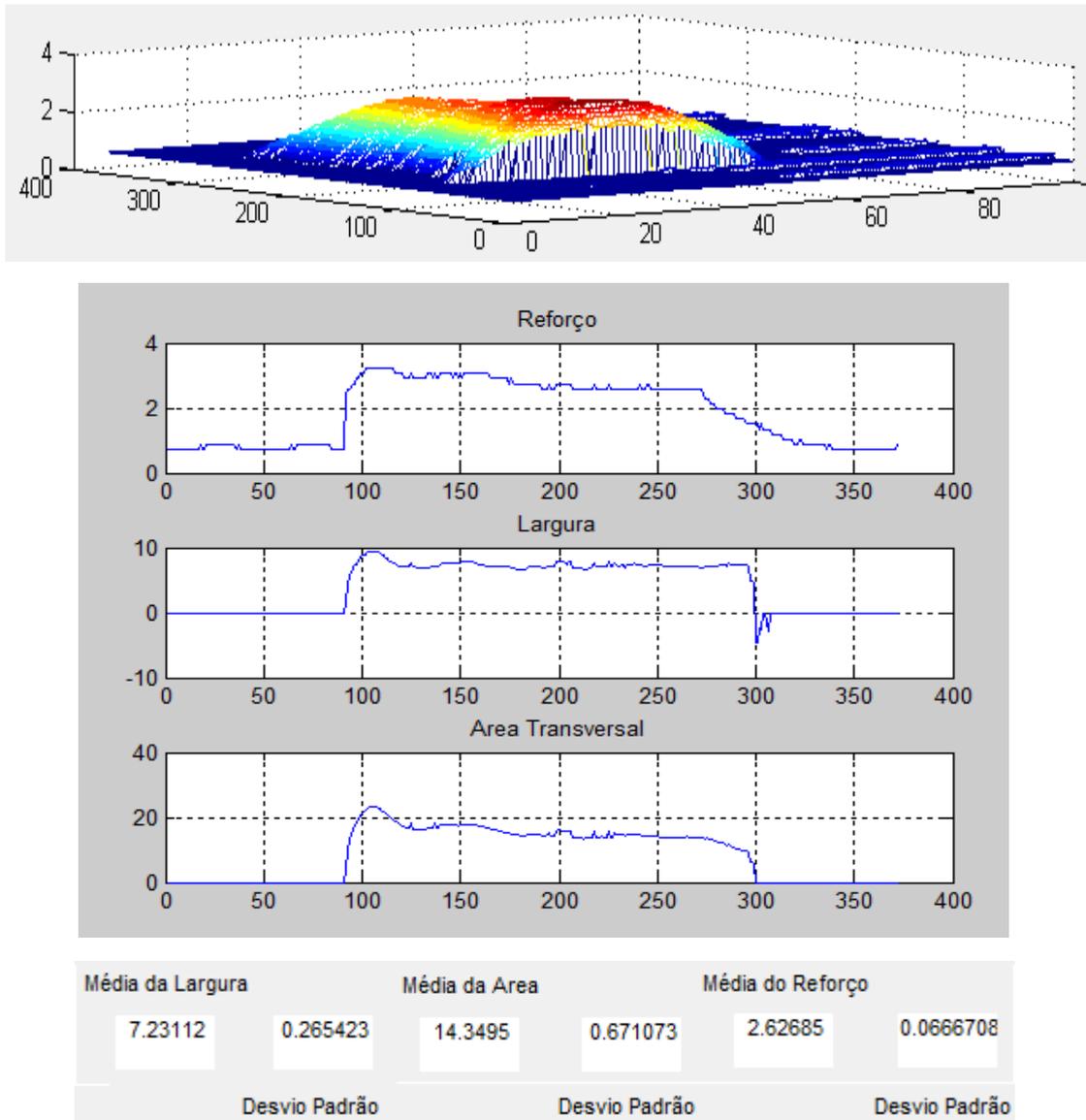


Figura 4.63. Medidas do scanner (amostra 20).

A seguir se tomaram as imagens dos cordões com melhores características, inicialmente os cordões com baixa energia e baixa frequência que apresentaram menos respingos o cordão 2 e cordão 1 respectivamente, e dois cordões do grupo final com

frequência 240 Hz que não apresentaram respingos e que tiveram maior estabilidade, como por exemplo o cordão 20 e 24, respectivamente.

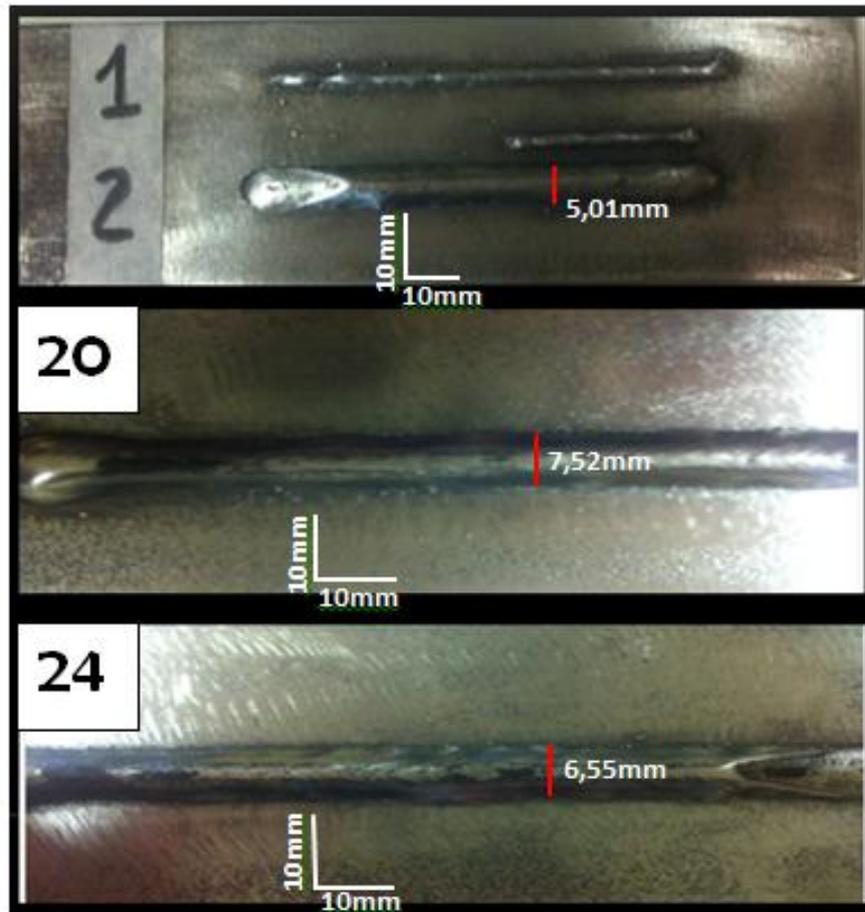


Figura 4.64 Imagens dos cordões 1, 2, 20 e 24 com boas características

4.6.2. Medida da penetração para amostras selecionadas (corte e macrografia dos cordões).

As amostras foram cortadas com um disco especial de corte fino para aço, depois foi feito um lixado especial com várias lixas iniciando pela mais grossa, número 240, e logo passando para a 300, 400, 600, 800, 1200 até a mais fina, 2400, por último se fez um polido com um pano e um líquido com micropartículas de alumínio para lograr um polido tipo espelho.

Na etapa final, para determinar as mudanças dos diferentes aços e suas misturas na penetração do cordão, se fez um ataque químico com 6% de Ácido Nítrico (HNI) em Etanol

(C₂H₆O). Um esquema com imagens do cordão 20 segue para determinar a penetração da solda na formação da poça de fusão, os passos próximos devem ser seguidos.

1) Corte do cordão com um disco para cortes de aço.

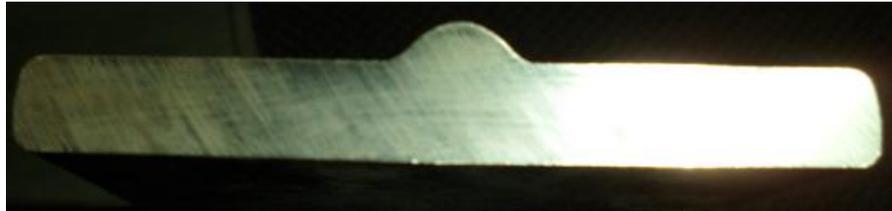


Figura 4.65. Corte transversal do cordão 20.

2) Lixar e polir para um acabamento espelhado.



Figura 4.66. Lixado e polido cordão 20.

3) Ataque químico

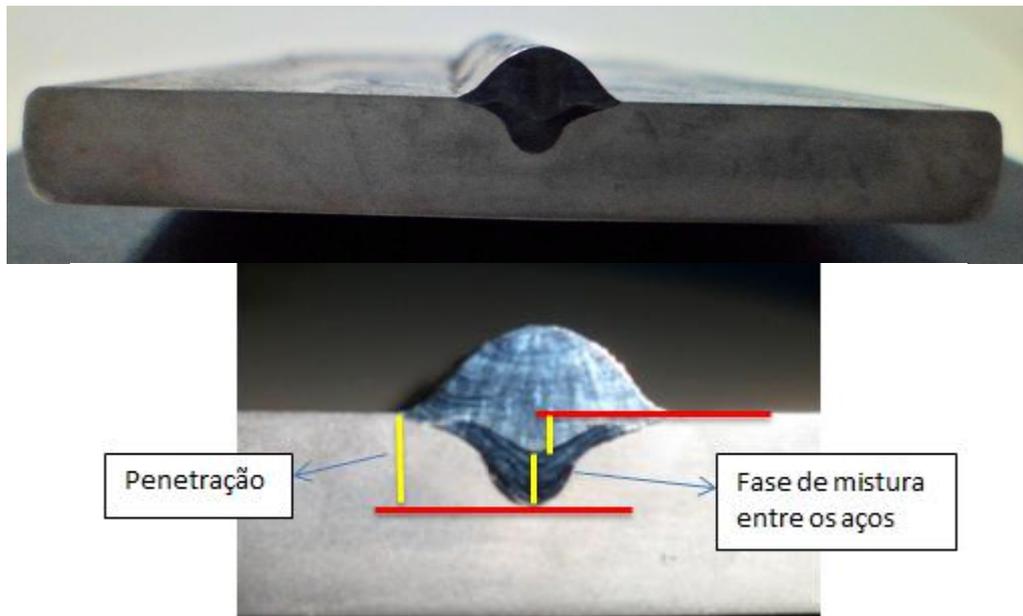


Figura 4.67. Ataque químico no corte transversal do cordão 20

Tabela 4.19. Medidas de altura e penetração da solda.

Referência	Altura desde a base (mm)	Penetração da solda (mm)	Comprimento da fase de mistura entre os aços (mm)	Altura total do cordão (mm)
Cordão 1	1,45	0,65	0	2,10
Cordão 10	2,62	2,69	1,16	5,31
Cordão 23	2,87	3,08	2,05	5,95

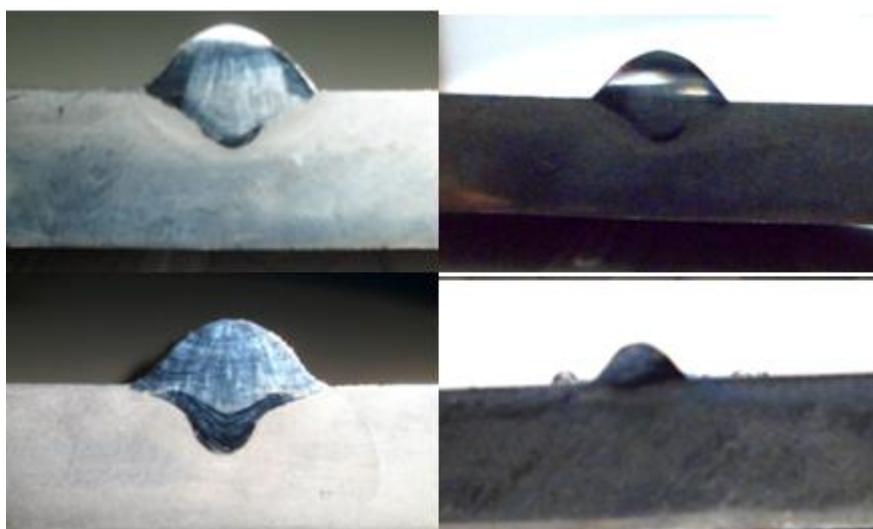


Figura 4.68. Medida de penetração para testes com corrente e tensão diferente

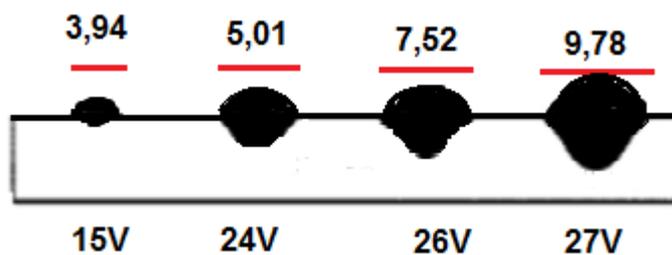


Figura 4.69. Medida de largura com diferente tensão

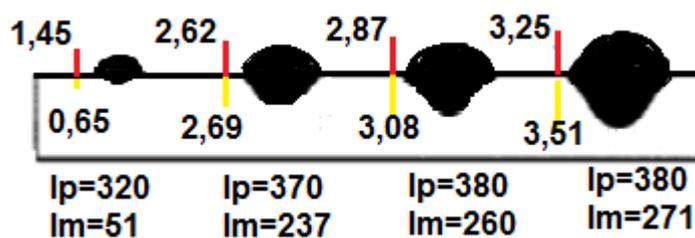


Figura 4.70. Medida de penetração com diferente I_p e I_m

4.6.3. Medidas do comprimento do arco:

O comprimento do arco varia com as variações dos parâmetros principalmente pela variação de tensão e corrente, respectivamente; também há uma pequena variação com as mudanças de velocidade do arame, já que ao aumentá-la aumenta também a corrente e a fusão do arame equilibrando um pouco o comprimento.

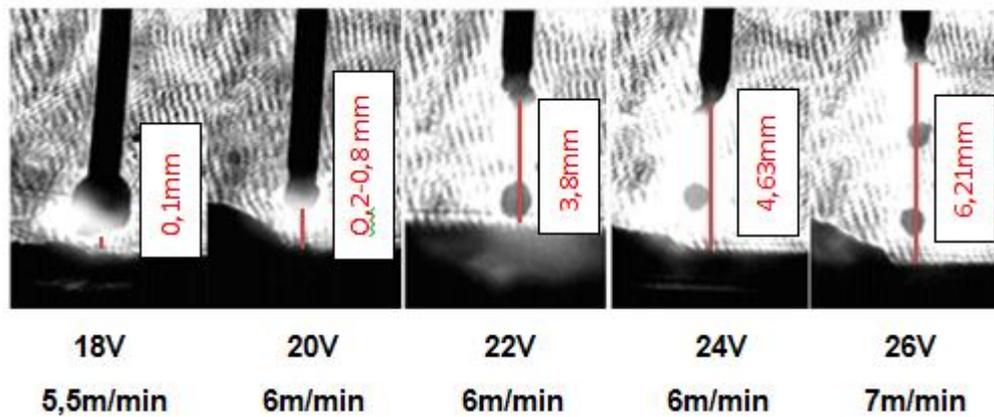


Figura 4.71. Medida de comprimento do arco para GMAW Convencional

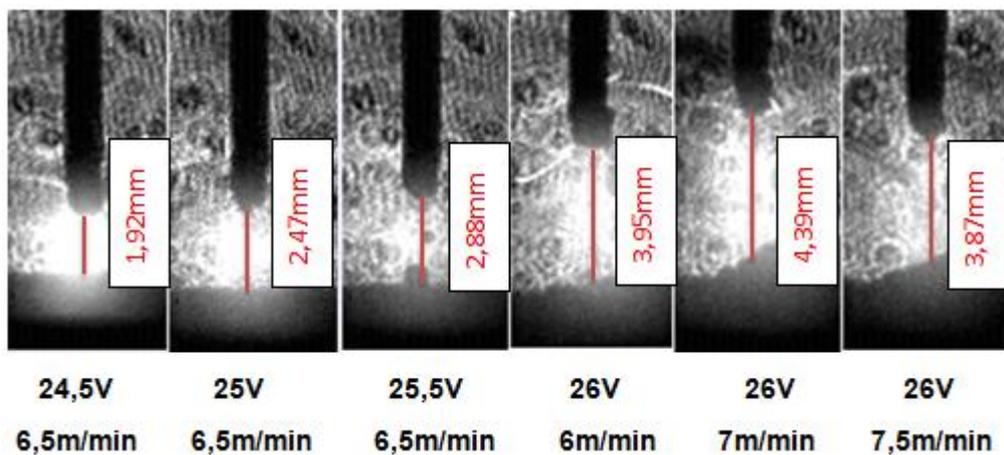


Figura 4.72. Medida de comprimento do arco para GMAW-P

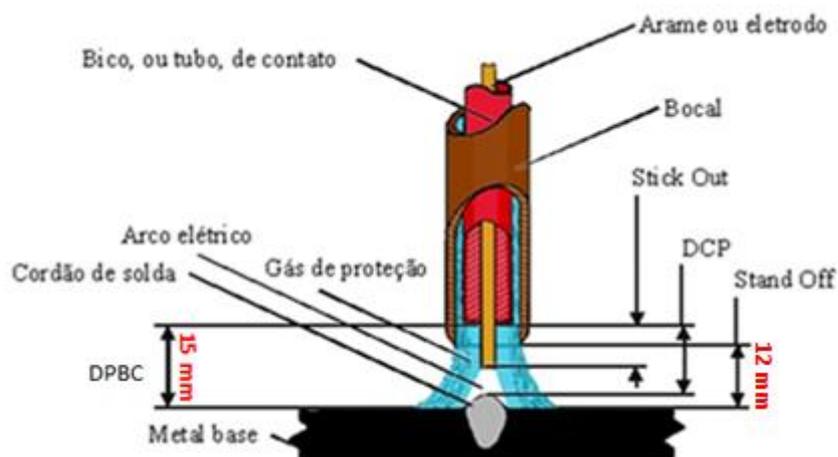


Figura 4.73. Esquema geral dos comprimentos de arco, arame e tocha (figura adaptada de Albuquerque Filipe)

4.7. CÁLCULO DE PARÂMETROS PARA AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM

Este aço é muito utilizado na construção de pás de turbinas. Para encontrar os parâmetros aceitáveis neste novo aço foi utilizado o critério de Burnoff e baseado nas outras análises feitas no aço doce (AISI 1020) e trabalhando com o mesmo arame, portanto se encontrou alguns valores similares de trabalho indicados na tabela 4.20.

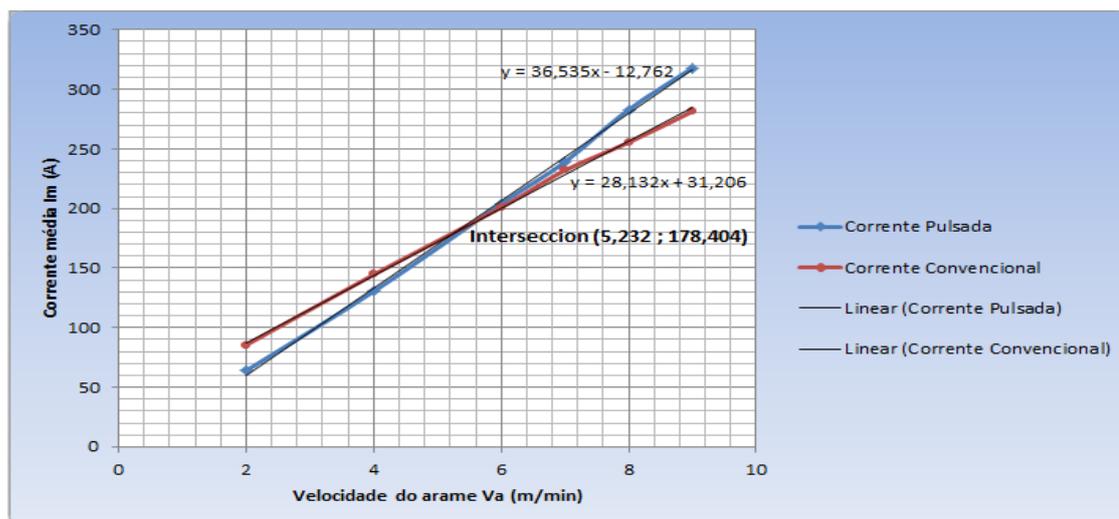


Figura 4.74. Aplicação do Critério de Burnoff no aço martensítico ASTM A743 CA-6NM.

Os valores dos parâmetros para este novo material de base segundo os critérios adotados nas análises anteriores.

Tabela 4.20. Parâmetros para o aço martensítico ASTM A743 CA-6NM.

	VALOR SEGUNDO OS CRITÉRIOS	REFERÊNCIA PARA DIFERENTES AÇOS	EXPERIMENTALMENTE
TENSÃO	26 v	(20 – 30)v	(25 – 26)v
CORRENTE	(170 – 190)A	(60 – 240)A	(180 – 210)A
VELOCIDADE DO ARAME	7m/min	(4 – 8)m/min	7m/min
TEMPO DE CICLO	(4 – 6)ms	(4 – 18)ms	4ms
FREQUÊNCIA DO PULSO	(200 – 250)Hz	(100 – 220)Hz	240Hz

Os resultados com este novo aço tiveram como variante o aumento de corrente para cada conjunto de parâmetros trabalhados, portanto, mostrou um aumento de calor de fusão, para o arame e principalmente na poça de fusão, mas os parâmetros aceitáveis para uma boa estabilidade e geometria do cordão são parecidos com os trabalhados anteriormente com aço doce. O ponto de interseção com o critério de Burnoff foi um pouco mais alto que com o anterior aço, já que com a mesma velocidade de arame se obteve uma corrente um pouco mais alta, tanto em GMAW Convencional como em GMAW-P, como se pode ver, comparando as figuras 4.74 com aço martensítico e 4.36 com aço doce.

Para os análises dos cordões e com os valores acima já encontrados se fez alguns testes para a procura da melhor geometria variando inicialmente a frequência com valores fixos de $I_p = 380A$; $I_b = 80A$; tensão 26v; $V_a = 7,0m/min$; $V_t = 10mm/seg$ e $Ind = 0,1\%$ marcando com um X o melhor resultado. Depois foi variada a velocidade de arame, corrente de pico e tensão seguindo essa ordem de mudanças e deixando fixos os valores do teste anterior que deu melhores resultados, marcando com X se foi o caso de melhores resultados em relação aos anteriores.

Tabela 4.21. Testes com a técnica GMAW-P e aço martensítico ASTM A743 CA-6NM.

REFERENCIA	lb	lp	Tp	Fr	Tensão	Va	ls	Ts	Ind	Vt	Melhor Geometria
Cordão 1	80	380	2,5	200	26	7,0	110	0,8	0,10	10	
Cordão 2	80	380	2,4	240	26	7,0	110	0,8	0,10	10	X
Cordão 3	80	380	2,2	280	26	7,0	110	0,8	0,10	10	
Cordão 4	80	380	2,4	240	26	6,5	110	0,8	0,10	10	
Cordão 5	80	380	2,4	240	26	6,0	110	0,8	0,10	10	
Cordão 6	80	375	2,4	240	26	7,0	110	0,8	0,10	10	X
Cordão 7	80	370	2,4	240	26	7,0	110	0,8	0,10	10	
Cordão 8	80	375	2,4	240	27	7,0	110	0,8	0,10	10	
Cordão 9	80	375	2,4	240	25	7,0	110	0,8	0,10	10	X
Cordão 10	80	375	2,4	240	24,5	7,0	110	0,8	0,10	10	X
Cordão 11	80	375	2,4	240	24	7,0	110	0,8	0,10	10	

4.8. PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ DE SOLDA PARA REALIZAR PASSES E CAMADAS

Para a programação do robô é necessário determinar os valores de superposição e a metodologia para a formação de camadas e preenchimento de buracos. Para tanto foi feito o cálculo matemático dos melhores valores de superposição e uma simulação.

4.8.1. Análises para a superposição de cordões, tendo em conta a direção dos cordões e a temperatura de aquecimento da chapa

Nesta pesquisa, trabalhou-se com dois modos na formação de camadas. O primeiro foi feito com cordões seguidos um atrás do outro e o segundo modo foi com cordões intercalados em diferentes formas.

Modo 1: Nesse modo para a formação dos cordões consecutivos trabalhou-se com o robô para que ele fizesse os cordões pares em sentido positivo e os cordões ímpares no sentido negativo diminuindo as falhas no início e no final do cordão, conforme se observa na Figura 4.75.

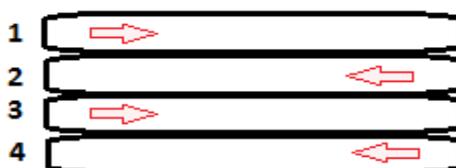


Figura 4.75. Direção da formação dos cordões - Modo 1.

Modo 2: Nesse modo a direção dos cordões foi a mesma feita no modo 1 para diminuir as falhas no início e no final do cordão, porém a distribuição da formação dos cordões é diferente, fazendo duas variações na deposição dos cordões, mas permanecendo sempre os que têm sentido negativo no final para que a formação desses cordões finais seja feita no meio dos outros dois, evitando diferenças na camada. A segunda variação nesse modo 2 é para evitar o aquecimento dos cordões que ficam do lado.

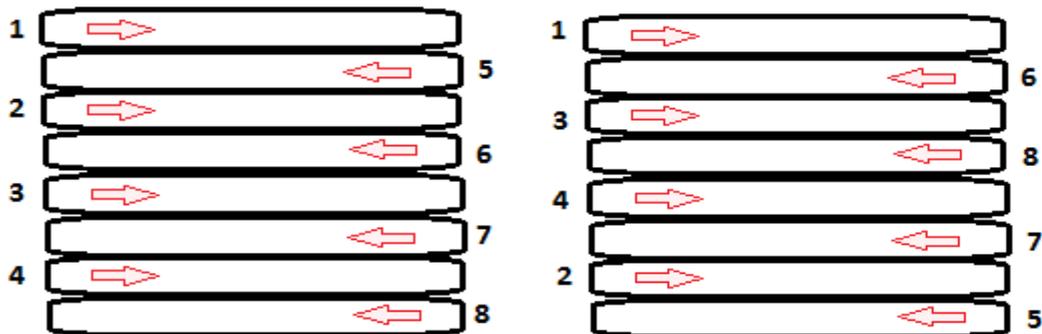


Figura 4.76. Direção da formação dos cordões - Modo 2.



Figura 4.77. Imagens de camadas com passes com o modo 1 e modo 2.

4.8.2. Análise matemática para calcular distâncias entre cordões na deposição de material em uma camada

Para a análise de superposição dos cordões devemos analisar inicialmente qual deve ser o deslocamento exato l entre dois cordões para que a deposição seja a mesma de um cordão perfeitamente semicircular, levando em conta o valor da área superficial ou corte

transversal de um cordão. As análises feitas são considerações para cordões semicirculares e semielípticos com uma área igual em tudo o cordão, mas o cordão não sempre tem a mesma área, e pode apresentar áreas irregulares. Sua altura e largura muda com os parâmetros, no entanto sua tendência é semicircular ou semielíptica.

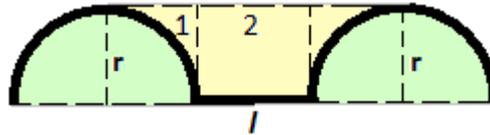


Figura 4.78. Deslocamento entre cordões aproximadamente semicirculares.

$$\text{Área do cordão é: } A_c = (\pi r^2)/2$$

$$\text{Área da região 1 é: } A_1 = r^2 - (\pi r^2)/4$$

$$\text{Área da região 2 é: } A_2 = r * l$$

A área da zona com cor amarela na Figura 4.78 deve ter a mesma área que uma das zonas de cor verde, pertencentes à área transversal do cordão, portanto, igualamos as duas áreas para determinar o valor de l .

$$lr + 2 \left(r^2 - \frac{\pi r^2}{4} \right) = \frac{\pi r^2}{2}$$

Levando em conta l :

$$l = \frac{\pi r^2 - 2r^2}{r} = \pi r - 2r = r(\pi - 2) = 1,1416 * r$$



Figura 4.79. Superposição entre dois cordões.

Portanto, para o comprimento de $l = 1,1416 * r$ o valor da superposição é de 21,5% para que a área onde vai ser efetuada a deposição seja igual a área transversal do cordão

depositado quando se faz um cordão no meio de dois cordões. No entanto, fez-se testes para superposições entre cordões a 22%, 30%, 40% e 50%, onde l diminui até 0 para uma superposição de 50%. Na prática, os melhores resultados foram para 40% e 30%, respectivamente.

Também foi feita a análise matemática para cordões com características elipsoidais onde sua altura é muito menor que sua largura e os cálculos para l foram iguais.



Figura 4.80. Deslocamento entre cordões semielípticos.

Para cordões, um atrás do outro, fez-se testes com superposição de 40%, 45% e 50%; os melhores resultados foram obtidos para 45% e 50%, respectivamente, mas, no caso de 50%, apresenta-se um aumento maior da altura para cada cordão sucessivo devido ao fluxo de massa já depositado, que causa efeitos nos cordões seguintes. A mudança é dada até o quarto cordão e a partir do quinto cordão a mudança da altura é muito menor, estabilizando-se. Um exemplo disso pode ser visto na figura 4.81 para uma camada de 5 cordões:

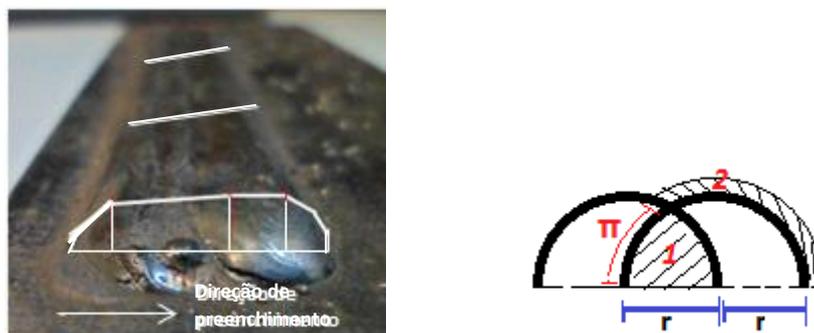


Figura 4.81. Cordões com Superposição de 50%.

Na figura 4.81 à direita na superposição dos cordões se apresentam duas zonas para explicar a deposição do fluxo de massa: A primeira zona com o número 1 apresenta a interseção dos cordões com superposição 50%; o valor da área sombreada é o fluxo de massa deixado de preencher pelo cordão 2, que já foi preenchido pelo primeiro cordão, sem superposição. Já a zona com o número 2 é o fluxo dispersado, que foi depositado acima e ao

lado do cordão, aumentando sua altura e largura, portanto, o cordão 2 vai ser deslocado para cima e a direita. Foi feito o cálculo teórico de deslocamento para uma superposição de 50%. Na tabela 4.22 estão os valores experimentais de deslocamento para uma camada de 5 cordões.

Tabela 4.22. Deslocamentos de largura e reforço de cada cordão sucessivo da figura 4.77 para a amostra 20 numa camada de 5 cordões com superposição 50%.

	Reforço (mm)	Largura (mm)	Varição de r (mm)
Passe 1	3,31	7,51	3,755
Passe 2	3,78	11,32	3,81
Passe 3	4,05	15,16	3,84
Passe 4	4,12	18,99	3,83
Passe 5	4,14	22,83	3,84

O valor do ponto da interseção das curvas dos dois cordões tem o valor de r já que se tem o valor de π vezes a quantidade de raios nessa curva do cordão semicircular; agora, o restante do semicírculo, depois dessa interseção seria: $\pi r - r$, tendo como base que o fluxo que preencheria a zona 1 vai ser depositado na zona 2. Fazendo um cálculo dessas áreas e igualando as áreas para obter o valor de o deslocamento se tem como resultado as seguintes equações:

Resumindo as análises das áreas e expressões temos:

Área 1 da zona 1:

$$A1 = \frac{\pi * \gamma^2}{6} + \left(\frac{\pi * \gamma^2}{6} - \frac{1}{2} * \gamma^2 * \sin\theta \right)$$

$$A1 = 2 * \gamma^2 * \frac{\pi}{6} - \frac{1}{2} * r^2 * \sin\theta = \frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \quad (4.1)$$

Onde $\theta = 60^\circ$ para este caso com superposição 50% e raio $r = \gamma$

Área 2 da zona 2:

$$A_2 = \frac{2\pi\gamma^2}{6} - \left(\frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \quad (4.2)$$

Igualando A1 e A2 para encontrar a relação de γ' com γ , já que o fluxo de massa depositado deve ser igual, as áreas também devem ser iguais e tendo conhecimento que a velocidade do arame por sua área transversal é igual ao volume da gota depositada por unidade de tempo, que também é igual a área transversal do cordão pela velocidade de soldagem; portanto, a área do cordão sempre é igual, com fluxo constante, como indica a seguinte equação 4.3:

$$A_c = (V_a * \text{Área do arame}) / V_t \quad (4.3)$$

Onde: A_c =área do cordão formado, V_a = velocidade do arame e V_t =Velocidade de soldagem (Avanço da tocha).

Resolvendo a igualdade das equações 4.1 e 4.2.

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} &= \frac{2\pi\gamma^2}{6} - \left(\frac{\pi}{6} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \right) - \left(\frac{\pi\gamma^2}{2} - \left(\frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \right) \\ \frac{2\pi}{6} * \gamma^2 &= \frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} + \left(\frac{\pi}{6} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \right) + \left(\frac{\pi\gamma^2}{2} - \left(\frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \right) \\ \gamma^2 \left(\frac{2\pi}{6} \right) &= \gamma^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \\ \gamma^2 \left(\frac{2\pi}{6} \right) &= \gamma^2 \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2} - \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \end{aligned}$$

Onde: $\gamma' = 1,2596 * \gamma$

Este valor indica um aumento de 26% no valor da largura ou raio e 26% de aumento na altura do cordão, no entanto, o valor encontrado nos testes experimentais foi de 18% para a largura e 24% para sua altura; isto pode ser devido a deposição da massa mais deslocada para a parte superior direita do cordão e só parte da massa fica na parte central superior e inferior

lateral do cordão; também, a diminuição do valor é devida a outras variantes, como, por exemplo, mudança de parâmetros no comprimento do arco, presença de respingos na solda e mudanças de geometria no primeiro cordão principalmente como consequência da fusão do primeiro cordão durante o passe do segundo cordão.

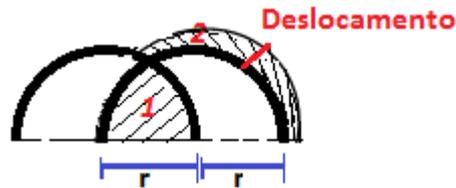


Figura 4.82. Cordões semicirculares com superposição de 50% com deslocamento mais próximo do real.

Portanto, na programação do robô deve ser corrigido o valor de deslocamento para cada cordão sucessivo, o valor do deslocamento normal de 50% que é o valor do raio do cordão e o deslocamento dado pela correção do fluxo adicional para cordões consecutivos.

Fez-se as mesmas análises para cordões elípticos e suas interseções com 50% de superposição. As equações iniciais são um pouco diferentes e seu desenvolvimento, mas se chegou aos mesmos resultados de valor de deslocamento, com aumento de 26% no valor da largura ou raio e 26% de aumento na altura do cordão.

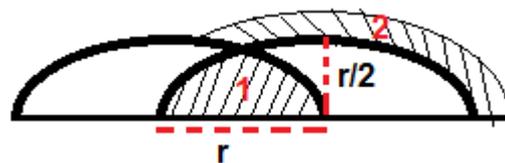


Figura 4.83. Cordões semielípticos com Superposição de 50%.

$$\text{Área da elipse} = \pi * a * b$$

Área 1 da zona 1:

$$A1 = \frac{\pi * \gamma * \gamma / 2}{6} + \left(\frac{\pi * \gamma * \gamma / 2}{6} - \frac{\gamma^2}{4} * \sin^2 \theta \right)$$

Onde $\theta = \arcsen \frac{a}{\gamma / 2}$ e raio $r = \gamma$

Área 2 da zona 2:

$$A_2 = \frac{\pi * \gamma' * \gamma' / 2}{2} - \left(\frac{\pi * \gamma * \gamma / 2}{6} - \left(\frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \right) - \left(\frac{\pi * r * r / 2}{2} - \left(\frac{\pi * r * r / 2}{6} - \left(\frac{\pi}{3} * \gamma^2 - \gamma^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \right) \right) \quad (4.4)$$

Igualando: $\gamma^2 * \left(\frac{\pi}{2} + \frac{3}{2} * 0,62665 \right) = \frac{\pi}{2} * \gamma'^2$

Onde: $\gamma' = 1,26428 * \gamma$

Em seguida, são apresentadas as fotos das camadas feitas com superposição a 50% com os parâmetros para o cordão 20.

A quantidade de fluxo é muito importante, mas os valores de superposição e o tamanho da gota, também influenciam na formação da área do cordão e na sua geometria devido a muitas causas. Portanto, a deposição do material é influenciada pelas características da gota e da poça de fusão. Também é importante se a deposição foi feita numa superfície plana e ainda depende da densidade do material, viscosidade, temperatura e efeitos termodinâmicos durante a solda, parâmetros que não são considerados neste trabalho.



Figura 4.84. Camada de 10 cordões com superposição 50% e parâmetros do cordão 20.

4.9. SIMULAÇÃO PARA O PREENCHIMENTO DO BURACO POR CAMADAS SUCESSIVAS

Para a análise de preenchimento dos buracos foi escolhido somente um tipo de figura para o buraco, neste caso, a mais fácil para analisar é uma figura retangular cujas dimensões se seguem nas Figuras 4.85 e 4.86. Também foi escolhido o valor das paredes do buraco com forma oblíqua a 45° já que com testes para soldas em buracos com paredes retangulares apresentava defeitos na borda devido à formação de dois arcos quando o bico de contato ou arame fica muito perto da parede, esta formação de dois arcos ocorre quando a distância é igual ou menor à distância do arame com o fundo do buraco, isto é, resolvido com amanteigamento ou desbaste da peça nas bordas, ou com mudanças de ângulo da tocha em suas bordas. A simulação do preenchimento foi feita em Ansys e Rhinoceros .



Figura 4.85. Exemplo de buraco retangular para as provas.

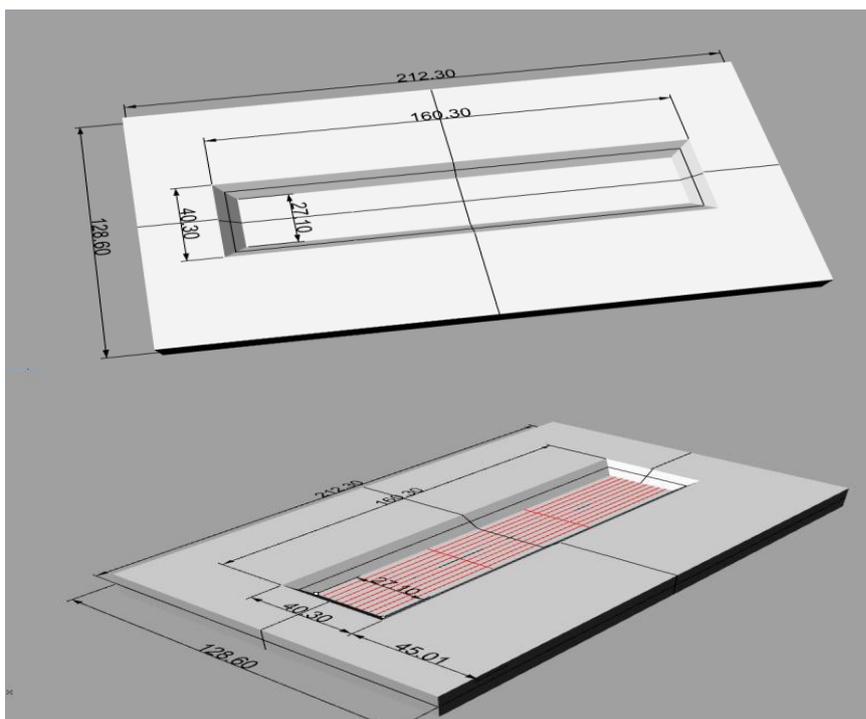


Figura 4.86. Desenho do buraco em ANSYS e RHINOCEROS com os valores reais.

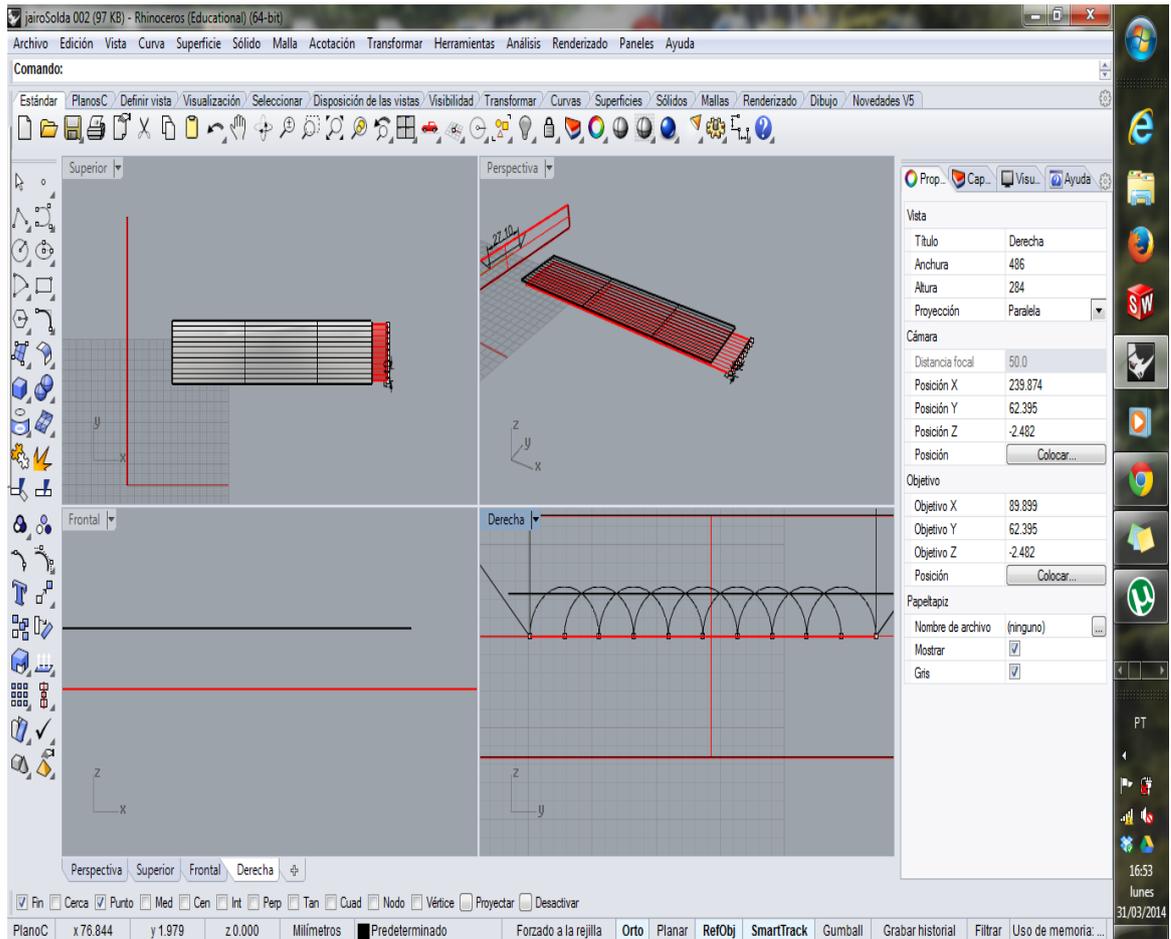


Figura 4.87. Cálculo de quantidade de passes com superposição 50% na primeira camada.

O cálculo foi de 9 passes na primeira camada com largura 5,42, altura 2,7 e superposição 50%. Desta forma, com 3 camadas os cordões chegam até a borda do buraco no ponto de interseção lateral entre eles e não se tem falta de material para o buraco e o cordão fica um pouco acima do nível do buraco para ser lixado no final, na etapa de acabamento.

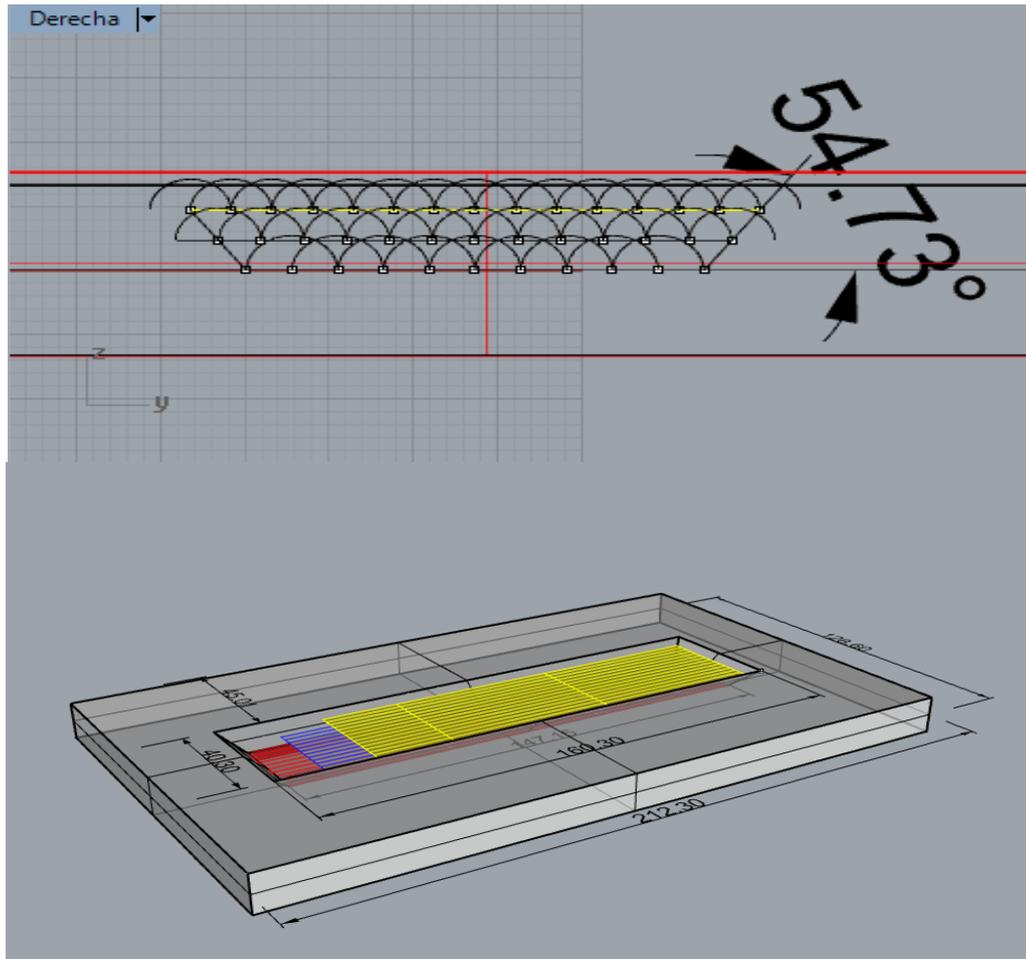


Figura 4.88. Cálculo da quantidade de passes com superposição 50% nas três camadas e cálculo de ângulo ótimo para o buraco.

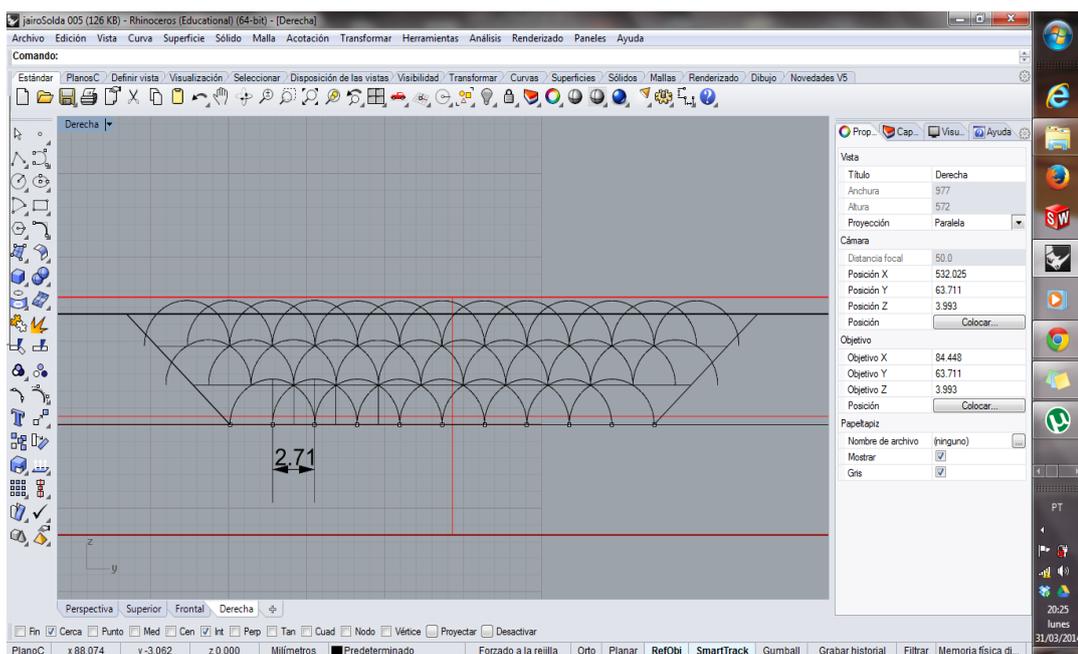


Figura 4.89. Cálculo do valor da largura ótima para o cordão.

Para preencher o buraco com superposição 50% é necessário um cordão com largura de 5,42 mm, assim, podemos diminuir a corrente e a velocidade do arame; para obter um cordão com essas características, com a utilização das tabelas feitas para os cordões que apresentaram as melhores características é mais fácil encontrar esses valores requeridos baseando-se em valores já parametrizados para cordões com boas características geométricas e de estabilidade.

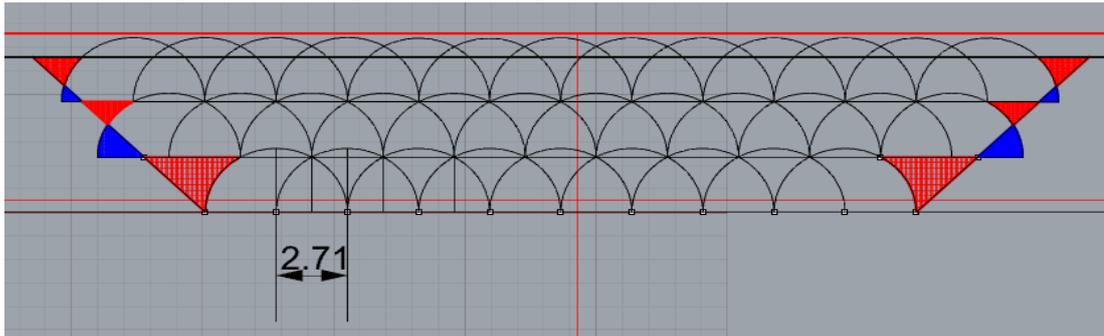


Figura 4.90. Cálculo de defeitos por fluxos de massa.

As zonas representadas em vermelho são zonas onde há ausência de fluxo de massa e as zonas em azul são zonas de massa restante. Já as zonas em azul iriam cobrir as zonas em vermelho, mas com um erro, devido a pequenas diferenças da área; outro erro está nas superposições entre cordões e nos deslocamentos de massa calculados anteriormente que o programa não calcula. Portanto, o valor de massa ficará sempre acima do valor calculado no programa. A análise foi feita em Ansys e se realizou principalmente para a análise das bordas do buraco. Os valores calculados são apresentados abaixo:

Vermelhas: Área acumulativa = 5.60683626 (+/- 1e-09) milímetros quadrados para 3 superfícies

Azuis: Área acumulativa = 1.57995229 (+/- 1e-09) milímetros quadrados para 2 superfícies

Vermelho 1 Área = 1.08315591 (+/- 1e-09) milímetros quadrados

Vermelho 2 Área = 0.870547618 (+/- 1e-10) milímetros quadrados

Vermelho 3 Área = 3.65313274 (+/- 1e-09) milímetros quadrados

Azul 1 Área = 0.270027123 (+/- 1e-10) milímetros quadrados

Azul 2 Área = 1.30992517 (+/- 1e-09) milímetros quadrados

Azul 3 Área = 2.88403392 (+/- 1e-09) milímetros quadrados

Área semicírculo Área = 11.5361662 (+/- 1e-08) milímetros quadrados

CONCLUSÕES

Os diferentes critérios e a metodologia proposta nesta pesquisa permitiram atingir parâmetros ótimos para o modo de transferência GMAW-P diminuindo a realização de experiências ou testes. Ainda, permitiram encontrar uma faixa de valores onde podemos encontrar conjuntos de dados que fornecem resultados satisfatórios para uma boa geometria do cordão.

A técnica para as análises de sinais com a Transformada Rápida de Fourier e aplicação de filtros permite verificar as irregularidades e instabilidade do sinal no domínio da frequência em setores que apresentaram mudanças na homogeneidade e intensidade dos pulsos, causadas por variações de corrente, tensão e mudanças na frequência.

Os cordões com boa geometria e com ausência de respingos em GMAW-P são fornecidos quando se têm sinais com pulsos uniformes de alta frequência, acima de 230 Hz, e quando é gerada uma gota por pulso que tem um raio proporcional ao do arame ou menor. Para observar a geração de uma única gota por pulso foram analisados os oscilogramas de tensão e avaliados mediante a técnica de perfilografia.

Obteve-se uma diminuição de energia e corrente média, com o modo de transferência GMAW-P, comparado com o modo goticular na transferência GMAW Convencional, para correntes acima da corrente de transição.

A determinação de parâmetros e modos de transferência metálica com o mapeamento dos dados, análises de oscilogramas da corrente e tensão, junto com as imagens obtidas por meio da filmagem de alta velocidade, concordam obtendo a mesma tendência nos resultados na determinação de boas características do cordão.

A técnica de mapeamento de correntes e tensão com análises de sinais por Fourier requer um menor custo computacional, e pode ser utilizada com sucesso para trabalhos que exijam maior velocidade da informação.

A análise das imagens obtidas pela técnica de perfilografia junto com estudos dos oscilogramas possibilitou a delimitação de uma região de estudo com boas características da geometria do cordão e com ausência de respingos, apresentada no modo de transferência goticular tanto para a transferência GMAW Convencional quanto para Pulsado.

A frequência de queda da gota é menor com GMAW-P que com GMAW Convencional, mas com o modo Pulsado se tem mais uniformidade na frequência de queda da gota e no tamanho da gota com mais estabilidade durante o processo e desprendendo só uma gota por pulso com frequência sempre igual, apresentando um desvio padrão pequeno na variação do fluxo de massa por unidade de tempo.

As considerações matemáticas das superposições de cordões e as simulações feitas em *Rhinoceros* para avaliar os deslocamentos nas superposições e a geração de camadas estão de acordo com os resultados experimentais desta pesquisa, mas cabe ressaltar que ocorreram, na fase experimental, problemas adicionais que tiveram que ser corrigidos, como, por exemplo, as mudanças na estabilidade e na geometria durante a formação de camadas, ocasionados pela geração de fumaça e aumento de calor no material de base.

As imagens de alta velocidade obtidas mediante a técnica de perfilografia são de muita utilidade na avaliação de outras técnicas que não requerem uma densidade alta de informação ou de baixo custo computacional, o qual é importante na hora de fazer controle *online*.

O processamento de imagens com aplicação de vários filtros e técnicas feitas em MatLab apresentou excelentes resultados na determinação das medidas, do tamanho, da frequência, comportamento e destaque da gota, atendendo às expectativas esperadas.

6. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados desta pesquisa, sugerem-se que alguns aspectos sejam melhor explorados.

1 - Realizar controle de variáveis de saída controlando a estabilidade da solda mediante controle *online*, utilizando a técnica de análise de Fourier para detecção de falhas nos sinais de corrente e tensão junto com técnicas que não utilizem recursos computacionais para aumentar a velocidade no processo de controle. Uma sugestão é utilizar análises de frequências de som, que permitirão, juntamente com a técnica de análise de Fourier, controlar o modo de transferência, os parâmetros de saída e ter uma velocidade maior no processo de controle com menor densidade de informação dos dados, contrário à captura de imagens.

2 - Integrar diferentes modelos teóricos neste modelo para descrever o processo de transferência com os diferentes parâmetros e suas mudanças junto com ajuda de simulações.

3 - Determinar a Zona Paramétrica e os parâmetros para outros aços inoxidáveis industriais, outro material de base e com outros gases de proteção.

4 - Fazer um estudo detalhado das características microestruturais, metalúrgicas, mecânicas, influências térmicas e um estudo de parâmetros de saída, tais como condição e qualidade superficial no cordão, propriedades anticorrosivas no material, aprofundando com técnicas de Microscopia Eletrônica (Barrido e Transmissão).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACESITA, S. A. 2011, “Soldagem dos Aços Inoxidáveis” - Acesita S.A. Associada à USINOR.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM A240/A240M. 2003, “Standards specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications” West Conshohocken, PA. 6 pp.

AMIN, M. 1983, “Pulsed current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding” *Metals construction*, p. 272-278.

AWS Welding Handbook – 1991, “Welding Processes – Arc and gás welding and cutting, brazing and soldering” 8ª. ed. Miami, AWS, v. 2, 955p.

BAAS. 1996, “Recommended welding procedure for cladding and joining with metal cored wire PZ6166” Fillarc Weling Industries. Suíça.

BALCH, K. 1999, “High Frame Rate Electronic Imaging” Copyright Motion Video Products.

BAIXO, C. E. I. 1990, “O estudo da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG através de projetor e de tratamentos oscilográficos de tensão e corrente” Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis.

BAIXO, C. E. I.; DUTRA, J. C. 1991, “Registro fotográfico do arco e relações paramétricas tensão/corrente em duas metodologias para o estudo da otimização da soldagem MIG/MAG” UFSC, Santa Catarina.

BÁLSAMO, P. et al. 2000, “*Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy*” *The International Journal for the Joining of Materials*, vol. 12, n. 1, pp. 1-12.

BOCCANERA, L. et al. 1998, “Influência do acabamento e porosidade superficial na resistência à erosão por cavitação de revestimentos soldados” CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DA FABRICAÇÃO, 6., Fortaleza, 1998..

BRANDI et al. 2000, “Soldagem: processos e metalurgia” 2ª. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA.

BRACARENSE, A. Q. et al. 2009, “*Gas metal arc welding*” Belo Horizonte: Editora UFMG, 3ª. ed.

BUSCHINELLI, A. J. et al. February, 1996, “Influência do acabamento e porosidade superficial na resistência à erosão por cavitação de revestimentos soldados” *Welding Journal*, P. 43-49.

CALAINHO, J. A. L., Horta, GONÇALVES, C. A; LOMÔNACO, F. G. 1999, “*Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil*” XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 6p., Foz do Iguaçu.

CHIAVERINI, V. 2002, “Aços e Ferros Fundidos” 7ª ed. São Paulo: Editora ABM.

DUTRA, J. C., BAIXO, C. E. I. 1991, “Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MaAG por Curto Circuito” Artigo para o Congresso LABSOLDA/UFSC, Universidad Federal de Santa Catarina.

EASSA, H. E. et al. 1983, “*A High Performance Welding Power Source And Its Application*” IEEE, p. 1241-1244.

EPRI. ELECTRICAL POWER RESEARCH INSTITUTE. 1986, “*Cavitation Pitting Mitigation in Hydraulic Turbines*” – vol. 1: Guidelines and Recommendations, Journal of Fisheries Management, San Diego, Califórnia.

FARIAS, J. P. et al. 2005, “Efeito da soldagem MIG/MAG em corrente alternada sobre a geometria da solda” Revista Soldagem & Inspeção, vol. 10, n. 4., out./dez.

FERRARESI, V. A.; LUZ, T. S.; BÁLSAMO, P. S. S. 2005, “Análise da transferência metálica do arame tubular com proteção gasosa” In: III COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, v. 1, p. 1-10. Joinville.

FIGUEIREDO, K. M., FERRARESI, V. A. 2001, “Mapas de transferência metálica em soldagem MIG de alumínio” Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação, 1., Curitiba.

GIOSA, J. A. 2003, “Influência de Diferentes Meios Oxidantes na Repassivação de um Aço Inoxidável Ferrítico Tipo AISI 430” Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GONÇALVES, B.H.B., 2007, “Estudo Comparativo da Resistência à Erosão por Cavitação do Metal de Solda Depositado por um Arame Tubular Tipo 13%Cr-4%Ni-0,4%Mo e do Aço Fundido ASTM A 743 CA-6NM”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, M-G, Brasil.

GROETELAARS, P.J., 2005, “Influência da Variação de Parâmetros de Soldagem Sobre a Transferência Metálica e Perfil do Cordão no Processo MIG/MAG Duplo-Arame”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M-G, Brasil.

HABERLIN, M. M. 1980. “*Program-controlled MIG Welding of Austenitic Steel*” *Developments in Mechanized Automated and Robotic Welding, London, England.*

HERMANS, M. J. M.; OUDEN, G. D. April, 1999, “*Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding*” *Welding Research Supplement*, p. 137s-141s.

HECHT, E. 2002. “*Optics*” San Francisco, USA, 698 p: Ed. Addison Wesley.

HURTADO, A. A. Novembro 2004. “Caracterização De Juntas Com Soldas De Aço Inoxidável AISI / SAE 304 Por GMAW Pulsado” Universidad Central de Venezuela. Caracas.

INUI, K. et al. 2003, “*Development of the Ferritic Stainless Steel Welding Wire Providing Fine Grain Microstructure Weld Metal for the Components of Automotive Exhaust System*” SAE International.

JONSON, J. A. et al. April, 1991, “*Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode*” *Welding Research Supplement – Welding Journal*, Miami, pp. 91s-99s.

KIM, Y.; EAGAR, T. W. Jun. 1993. “*Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding*” *Welding journal*, Miami, v. 72, n. 6, p. 269 – 278.

LACOMBE, P.; BAROUX, B.; BERANGER, G. 2000. *Stainless Steels. Les editions de Physique*, p. 437-462.

LANCASTER, J. F. 1986. “*The physics of welding*” 2ª. ed. *Pergamon Press, International Institute of Welding*,

LOPERA, J. E. P. 2010, “Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW baseada em técnicas de processamento de imagens digitais e superfícies de resposta” Universidade De Brasília, Distrito Federal.

LOPERA, J. E. P. et al. 2011, “Uso da técnica de perfilografia para visualização dos modos de transferência metálica no processo de soldagem GMAW usando uma câmera

CMOS de alta velocidade” Artigo COBEF - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, Brasil.

MAIA, T. C. G., 2001, “Utilização de Técnicas de Processamento Digital de Imagens no estudo de Transferência Metálica em Soldagem a Arco Voltaico”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M-G, Brasil.

METALS HANDBOOK. 1961, “*Properties and Selection*” 8ª. ed. Miami: *American Society for Metals*. v. 1, 1300p.

MODENESI, P. J. 2004, “Transferência de metal na soldagem GMAW – Manual aula prática” Editora UFMG. Belo Horizonte.

MODENESI, P. J.; COSTA, C. M. 2002. “Influência de Alguns Parâmetros Operacionais na Instabilidade de Arco do Processo MIG” Artigo COBEF.

MODENESI, P. J.; AVELAR, R. C. 1999, “*The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability*” *Materials Processing Technology*. p. 226-232.

OLIVEIRA, H. M. 2005, “Análise de Sinais para Engenheiros: Uma Abordagem via Wavelets” São Paulo: Editora Manole.

PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. 2000. “Wavelet Methods for Time Series Analysis” *Cambridge Press*, 2000. 594 p.

PEREIRA, A. S.; BUSCHINELLI, A. J. A.; HENKE, S. L.; NIÑO, C. E. 2001, “Estudo comparativo do reparo por soldagem dos aços inoxidáveis martensíticos AISI 410 e CA-6NM” I Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Curitiba, 2001. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.

PONOMAREV, V., SCOTTI, A., NORRISH, J., LUCAS, W., 2009, “*Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification*”. In: 62nd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding, 2009, Singapore. IIW 2009. Paris: IIW, 2009. v. CD. p. 1-15.

QUINN, T. P.; MADIGAN, R. B.; SIEWERT, T. A. 1994, “An electrode extension model for gas metal arc welding” *Welding journal*, Miami, v. 10, n. 73.

RAJASEKARAN, S.; KULKARNI, S. MALLYA, C. 1998, “*Detachment and plate fusion GMAW*” *Welding Journal*, p. 254.

RAMOS, E. G. 2011, “Análise da oscilação da poça de solda em GMAW por meio de processamento de imagens obtidas por perfilografia” Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM 02/2011, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.

RENAUDOT, N.; et al. 2000, “*430LNb – A new ferritic wire for automotive exhaust applications*” *SAE technical paper*.

RESENDE, A. 2007, “Mapeamento Paramétrico da Soldagem GMAW com Arames de Aço Inoxidável Ferrítico e Austenítico” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

RHEE, S.; KANNATEY, A. J. E. 1992, “*Observation of metal transfer during gas metal arc welding*” *Welding journal*, v. 71, n. 10, pp. 381s-386s, Miami, out.

ROMERO S. P. 2012, “*Influencia del Modo de Transferencia por Arco Pulsado en el Proceso de Soldadura GMAW con Alambre Compuesto con Núcleo Metálico Sobre La Soldabilidad del Acero ASTM A 131 grado AH32*” Dissertação de mestrado na Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica Bogotá, Colombia

SANTOS, M. 2013, “Determinação da Emissividade e Análise Microestrutural do Aço Inoxidável Martensítico ASTM 743 CA6NM Decorrente da Soldagem GMAW em Múltiplos Passos com Metal de Deposição AWS 410 NiMo” Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília.

SCOTTI, A.; CLARK, D. E.; KENNEY, K. 1998, “Mapeamento da transferência metálica em MIG com aço inoxidável” ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, Associação Brasileira de Soldagem. Fortaleza.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. 2008, “*Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*” São Paulo: Artliber Editora.

SILVA, R. C. R. 2000, “*Aços Inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos*”.

SLANIA, J. 1996, “*Determination of the Conditions for Stable Transfer Of Metal From the Electrode to the Molten Pool During MAG-Welding with Short-Circuiting and Pulsating Arcs*” *Welding International*, v. 10, p. 849-852.

STENBACKA, N.; PERSSON, K. A. 1992, “Gases de proteção para soldagem MIG/MAG de aços inoxidáveis” Rio de Janeiro, AGA.

SVETSAREN, 2003, “MIG/MAG Welding”, vol. 58, n. 2.

TRUCCO E., VERRI, A., 1998, “Introductory Techniques for 3-D Computer Vision”, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 343 p.

VAZ, C. T. 2004, “Avaliação da resistência à erosão por cavitação do metal de soldas produzidas com consumíveis tipo 13% Cr - 4% Ni - 0,4% Mo” Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VILARINHO, L. O. 2000, “Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio” Dissertação de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia – MG.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. 1992, “Soldagem, Processos e Metalurgia” Rua Pedroso Alvarenga, 1245 - cj.22, São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blucher LTDA.

WEICHEL, H., 1990, “*Laser Beam Propagation in the Atmosphere*”, Ed. SPIE, Washington, USA, 108 p.

ZBIGNIEW, D. J. 1979, “*Naturaleza y Propiedades de los Materiales para Ingeniería*”. 2ª. ed. México: Interamericana,. p. 323-327.

8. PUBLICAÇÕES

Artigo publicado e apresentado no congresso CONEM 2014, na área de Mecatrônica:

“OBTENÇÃO DE PARÂMETROS EM SOLDAGEM GMAW-PULSADO, USANDO-SE CRITÉRIOS DE DESENVOLVIMENTO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA, APLICADOS NA RECUPERAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS”

APÊNDICE

PROGRAMAÇÃO PARA O TRATAMENTO DE IMAGENS EM PERFILOGRAFIA

```
close all;clc;clear all;
fname = uigetfile('*.bmp');
    I = imread(fname);
se = strel('ball',4,4);
I2 = imdilate(I,se);

I2 = imerode(I2,se);
% I2 = imdilate(I2,se);
figure(1), imshow(I2), title('Dilated')
% I2=I;

h = fspecial('gaussian',4,4);
I2a=double(imfilter(I2,h));
for j=5:144-5
    for i=7:220-7
        %         if aux(i,j)==0;
            I2(i,j)=median(median((I2a(i-6:i+6,j-4:j+4))));
        %     end
    end
end
end
% h = fspecial('gaussian',3,3);
% I2=imfilter(I2,h);

h = fspecial('gaussian',10,10);
I3=imfilter(I2a,h);

figure(2)
subplot(1,3,1), imshow(uint8(I));
subplot(1,3,2), imshow(uint8(I2));
subplot(1,3,3), imshow(uint8(I3));
```

```

figure(3)
for i=5:220-5
    for j=5:144-5
        %     if aux(i,j)==0;
            I2(i,j)=median(median((double(I2(i-4:i+4,j-4:j+4)))));
        %     end
    end
end
I2=medfilt2(I2);
I3=medfilt2(I3);
subplot(1,3,1),imshow(uint8(I));
subplot(1,3,2),imshow(uint8(I2));
subplot(1,3,3),imshow(uint8(I3));
aux=mean(mean(double(I2(1:100,1:50)))));
% aux=mean(mean(double(I2(140:170,71:73)))));
I2a=double(I2<aux*0.9);
for i=1:150
    for j=1:60
        I2a(i,j)=0;
    end
end
for i=1:150
    for j=95:144
        I2a(i,j)=0;
    end
end
a=0.7;
I4=(double(255-I).*I2a);
I4=uint8(255*(I4.^a)/(255^a));
figure(4)
subplot(1,3,1),imshow(I);
subplot(1,3,2),imshow(uint8((1-I2a)*255));I2a=uint8((1-I2a)*255)
subplot(1,3,3),imshow(uint8(255-I4));
% imwrite(I2a,imagErDilGausBi,bmp)

```

PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ:

Programação para camadas com cordões com movimentos intercalados e em sentido contrário para evitar problemas de aquecimento.

COMMENT Ensaio SMD

V=100.0 MAX=1500.0

TCP 1

RECT COORD

FRAME 0

COMMENT Reset Weld Start

RESET OUTP 5

COMMENT Pwr Src ErrReset

SET OUTP 6

RESET OUTP 6 DELAY 0.01 S

COMMENT Sel Manual Mode

LET R 1 = 3

TRANSFER R 1 TO PORT NO 1

POS V=100.00% FINE X=1270.38 Y=-0.50 Z=800 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000
Q4=0.000000

POS V=30.00% FINE X=1290 Y=120 Z=700 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

POS V=20.00% FINE X=1418 Y=123 Z=582.13 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

FRAME 3

POS V=10.00% C2 X=0 Y=0 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

COMMENT Ativa com input

LET R2 = 0.39

COMMENT Ativa cordao 1

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=10.00% C2 X=0 Y=80 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

RESET OUTP 5

WAIT 0.5 S

POS V=10.00% C2 X=0 Y=80 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

POS V=10.00% C2 X=6*R2 Y=0 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

COMMENT Ativa cordao 2

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=10.00% C2 X=6*R2 Y=0 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=10.00% C2 X=6*R2 Y=80 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

RESET OUTP 5

WAIT 0.5 S

POS V=10.00% C2 X=6*R2 Y=80 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

POS V=10.00% C2 X=2*R2 Y=0 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

COMMENT Ativa cordao 3

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=10.00% C2 X=2*R2 Y=0 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=10.00% C2 X=2*R2 Y=80 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

RESET OUTP 5

WAIT 0.5 S

POS V=10.00% C2 X=2*R2 Y=80 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

POS V=10.00% C2 X=4*R2 Y=0 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

COMMENT Ativa cordao 4

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=10.00% C2 X=4*R2 Y=0 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=10.00% C2 X=4*R2 Y=80 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.00000 Q3=0.00000 Q4=0.00000

RESET OUTP 5

WAIT 0.5 S

POS V=10.00% C2 X=4*R2 Y=80 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

Outro sentido

POS V=10.00% C2 X=R2 Y=80 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

COMMENT Ativa cordao 5

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=10.00% C2 X=R2 Y=80 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=10.00% C2 X=R2 Y=0 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

RESET OUTP 5

WAIT 0.5 S

POS V=10.00% C2 X=R2 Y=0 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

POS V=10.00% C2 X=3*R2 Y=80 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

COMMENT Ativa cordao 6

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=10.00% C2 X=3*R2 Y=80 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=10.00% C2 X=3*R2 Y=0 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

RESET OUTP 5

WAIT 0.5 S

POS V=10.00% C2 X=3*R2 Y=0 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

POS V=10.00% C2 X=5*R2 Y=80 Z=30 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=10.00% C2 X=5*R2 Y=80 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=10.00% C2 X=5*R2 Y=0 Z=0 Q1=1.00000 Q2=0.000000 Q3=0.000000 Q4=0.000000

RESET OUTP 5

WAIT UNTIL INP 5 = 1

CALL PROG 50

STOP

**PROGRAMAÇÃO EM MATLAB PARA CALCULAR ESTABILIDADE DA SINAL,
CORRENTE MÉDIA, CANTIDADE DE CURTOS, HOMOGENEIDADE ENTRE
PULSOS E SUA VARIÂNCIA, ENERGIA EFETIVA EM CADA TESTE OU
OSCILOGRAMA**

```
close all;clear all,clc
```

```
fprintf(1,'Introduzca en el editor en la variable b el nombre de la matriz  
o vector de excel que desea manipular, por defecto se encuentra el nombre  
lista')
```

```
fprintf(1,'Si ya lo hizo haga caso omiso de lo contrario corra de nuevo el  
programa:')
```

```
b=xlsread('prueba5.xls ',9);
```

```
J=b';
```

```
tam=input('Introduzca el tamaño de los datos: ')
```

```
t=[1:tam];
```

```
plot(t,J)
```

```
T=input('Ingrese el valor de la tension: ');
```

```
Vel=input('Ingrese el valor de la velocidad de soldadura: ');
```

```
Cp=input('Ingrese el valor de la corriente de pico: ');
```

```
Cb=input('Ingrese el valor de la corriente de base: ');
```

```
tt=input('Ingrese el valor de el tiempo en que los datos son tomados en  
segundos: ');
```

```
liminf=Cb-15;limsup=Cp+20;liminfs=Cb+20; liminfin=15; limsupsu=limsup +  
(0.3*Cp);
```

```
j=1;k=1;k1=1;k2=1;L=1;m=1;X=1;im=0;imm=0;MS=0;MI=0;MMS=0;IN=0;
```

```
ib=0;B=0;cor=0;imi=0; imim=0;ind=0;corto=2;indi=0;ps=0;
```

```
p1=0;p2=0;pt=0;imms=0;
```

```
for i=1:tam-1
```

```
    if J(i)>=liminf && J(i)<=limsup
```

```
        B(j,1)=abs((J(i+1))* (t(i+1)-t(i)));
```

```
        ib(j,1)=i;j=j+1;
```

```
    end
```

```

if J(i)>limsup && J(i)<=limsupsu
    MS(k,1)=abs((J(i))*(t(i+1)-t(i)));
    im(k,1)=i;k=k+1;
    if J(i)>limsup && J(i+1)<=limsup
        ps=ps+1;
    end
end

if J(i)>limsupsu
    MMS(k1,1)=abs((J(i))*(t(i+1)-t(i)));
    imm(k1,1)=i;k1=k1+1;ind=ind+2;
    if J(i+1)<limsupsu, imm(k2,1)=i+1;
        k2=k2+1;indi=indi+2;
    end %k2 da o numero de bicos nao desejados nos dados
end

if corto==ind && corto==indi
    cor=cor+1;
end

if J(i)<liminf && J(i)>=liminfin
    IN(L,1)=abs((J(i))*(t(i+1)-t(i)));
    imi(L,1)=i;L=L+1;
end

if J(i)<liminfin
    MI(X,1)=abs((J(i))*(t(i+1)-t(i)));
    imim(X,1)=i;X=X+1;
end

if J(i)>liminfs && J(i+1)<=liminfs
    pt=pt+1;
end

ind=0;indi=0;

end

% Tamanho de dados nas diferentes zonas
fprintf(1,'CANTIDADE DE CORTOS')

```

```

cor
fprintf(1, 'CATIDADE DE DADOS POR ZONA')
tamanhozona1=size(ib)
tamanhozona2=size(im)
tamanhozona3=size(imms)
tamanhozona4=size(imi)
tamanhozona5=size(imim)

% timm=size(imm);
Altural=mean(MS);
relcorto=100*cor/tam

fprintf(1, 'Relação entre quantidade de dados na zona 1 e quantidade de dados
total')
rel1=100*tamanhozona1(1)/tam
fprintf(1, 'Relação entre quantidade de dados na zona 2 e quantidade de dados
total')
rel2=100*tamanhozona2(1)/tam
fprintf(1, 'Relação entre quantidade de dados na zona 3 e quantidade de dados
total')
rel3=100*tamanhozona3(1)/tam
fprintf(1, 'Relação entre quantidade de dados na zona 4 e quantidade de dados
total')
rel4=100*tamanhozona4(1)/tam
fprintf(1, 'Relação entre quantidade de dados na zona 5 e quantidade de dados
total')
rel5=100*tamanhozona5(1)/tam

% corrente media

Q=sum(B)+sum(MS)+sum(IN)+sum(MI)+ sum (MMS);
Q1=sum(J);
fprintf(1, 'Corrente média baseada em áreas')
Imed=(Q)/tam
fprintf(1, 'Corrente média baseada em dados')
Imed1=Q1/tam

```

```

%Calculo de largura areas quantidade de picos e maximos.
S=2;pulso1=1; pulso2=1;G=1;
A=1; Z=1;H=1; n=1; o=1;r=1;e=1;Al=1;Ar=0;
h=0;lon=0;e=1;w=1;q=1;d=1;lon2=1;e1=1;w1=1;q1=1;C1=0;z=1;
for k=1:tam-1
    if S<(tam-2)
        S=S+2;
        for i=A:S
            if J(i)>liminfs
                Z=Z+1;
                A=S+1;
                pi(n,1)=i;
                pulso1=min(pi);
                n=n+1;
            end
            if J(i+1)<liminfs  && Z>1
                if pulso2>2 && G==1
                    for v=pulso2:pulso1
                        C1(d,1)=abs(J(v));
                        d =d+1;
                        lon2=pulso1-pulso2;
                    end
                end
                pf(o,1)=i; o=o+1;
                pulso2=max(pf);
                n=1;
                G=G+1;
            end
            if Z>1 && G>1
                for l=pulso1:pulso2
                    B1(r,1)=abs((J(l))*(t(l+1)-t(l)));
                    r =r+1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

lon=pulso2-pulso1+1;
if lon>2
AreaP=sum(B1)*tt;
AreaB=sum(C1)*tt;
Ar= sum(B1)/lon;
Ar2=sum(C1)/lon2;
Altura=max(B1);
pi=3*pi;
B1(:,1)=[];
C1(:,1)=[];
AlturaI(z,1)=Altura;
z=z+1;
MediaAltura=mean(AlturaI);
Alturamin=min(AlturaI);
Alturamax=max(AlturaI);
AreaI(e,1)=AreaP;
e=e+1;
MediaI(w,1)=Ar;
w=w+1;
Largura(q,1)=lon;
q=q+1;
AreaBI(e1,1)=AreaB;
e1=e1+1;
MediaBI(w1,1)=Ar2;
w1=w1+1;
LarguraB(q1,1)=lon2;
q1=q1+1;
end
end
r=1;
Z=1;
G=1;
end
% pmax(H,1)=max(B1)

```

```

    end
end

p1=(e-1)-ps;
p2=ps-cor;
CantPicos=(e-1 + pt)/2;
p3=cor;

fprintf(1,'Valor de intensidades de la corriente')
fprintf(1,'Intensidad o altura media de datos tomados en la zona2')
Altural
fprintf(1,'maximos de cada pico')
AlturaI
fprintf(1,'Intensidad media de todos los picos maximos de cada pico')
MediaAltura

fprintf(1,'Total de picos no oscilograma')
CantPicos
fprintf(1,'Cantidad de picos en la zona 1')
p1
fprintf(1,'Cantidad de picos en la zona 2')
p2
fprintf(1,'Cantidad de picos en la zona 3')
p3

AreaI(1,:)=[];
MediaI(1,:)=[];
Largura(1,:)=[];

AreaBI(1,:)=[];
MediaBI(1,:)=[];
LarguraB(1,:)=[];

```

```

fprintf(1, 'Media da area das correntes de pico')
MediaArea=mean (AreaI)
fprintf(1, 'Media da intensidade de corrente de pico')
MediaMediaI=mean (MediaI)
MediaLargura=mean (Largura)

fprintf(1, 'Varianzas de area corrente e largura para corriente de pico')
VarArea=std (AreaI)
VarMediaI=std (MediaI)
VarLargura=std (Largura)

fprintf(1, 'Media da intensidade de corrente de base areas e largura de
base')
MediaAreaB=mean (AreaBI)
MediaMediaBI=mean (MediaBI)
MediaLarguraB=mean (LarguraB)

fprintf(1, 'Varianza da intensidade de corrente de base areas e largura de
base')
VarAreaB=std (AreaBI)
VarMediaBI=std (MediaBI)
VarLarguraB=std (LarguraB)

indice=0.28* (2*VarArea/MediaArea) + 0.21* (2*VarMediaI/MediaMediaI)+
0.21* (2*VarLargura/MediaLargura)+0.12* (2*VarAreaB/MediaAreaB) +
0.09* (2*VarMediaBI/MediaMediaBI)+ 0.09* (2*VarLarguraB/MediaLarguraB)

indice1=0.4* (2*VarArea/MediaArea) + 0.3* (2*VarMediaI/MediaMediaI)+
0.3* (2*VarLargura/MediaLargura);

indice2=0.4* (2*VarAreaB/MediaAreaB) + 0.3* (2*VarMediaBI/MediaMediaBI)+
0.3* (2*VarLarguraB/MediaLarguraB);

Estabilidad=100 - (rel3+rel5)-0.4* (rel2+rel4)

Homogeneidad=100* (1-indice)

fprintf(1, 'Datos sobre energia y potencia utilizada')

P=Imed*T

fprintf(1, 'Energia por recorrido')

```

```

E=Q*T*tt
% fprintf(1,'Energia Total')
% E2=P*tt*tam
fprintf(1,'Energia por milimetro "Energia/mm"')
Ed=P/Vel

fprintf(1,'Energia basada en el recorrido en mm')
distancia=Vel*tt*tam
fprintf(1,'Energia para esa distancia')
EdT=(P/Vel)*distancia

fprintf(1,'Energia Total')
ET=(P/Vel)*100

fprintf(1,'Porcentagem de deshomogeneidad em os picos ou as I de pico')
Fallapicos=100-100*(1-indice1)
fprintf(1,'Porcentagem de deshomogeneidad em os tempos de espera ou I de
base')
Fallabase=100-100*(1-indice2)
fprintf(1,'Desviação de dados de entrada de I Base na calibração')
CalibracionerradaI=100*((p2/CantPicos)*(p2/CantPicos)-
((2)*VarMediaI/MediaMediaI)*(2+(p2/CantPicos)))+ 0.2*((MediaAltura-
Cp)/MediaAltura))*(1-(VarMediaI/MediaMediaI)) -
((Altural/MediaAltura)^3)*((2)*VarMediaI/MediaMediaI)- 2*((Altural-
MediaAltura)/MediaAltura)+ 1.5*(MediaAltura-
(Alturamax+Alturamin)/2)/MediaAltura
fprintf(1,'Valor de desviacion en la entrada de la corriente; valor que
debe ser adicionado al dato de entrada')
IPicoReal=((100-(1.5)*CalibracionerradaI)*Cp
+((1.5)*CalibracionerradaI)*(MediaAltura -
(Altural/MediaAltura)*(1+(VarMediaI/MediaMediaI))+ 0.1*(MediaAltura-
(Alturamax+Alturamin)/2)))/100
fprintf(1,'Reajuste')
RecalibrarI=(IPicoReal-Cp)
fprintf(1,'Valores de entrada de IPico son aceptables si Calibracion
erradaI menor a 0.2 e RecalibrarI menor a 0.05')

```

CÁLCULO DE IREGULARIDADES E FALHAS NO SINAL DE CORRENTE COM APLICAÇÃO DE TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER E FILTROS USANDO MATLAB

```
close all;clear all,clc

fprintf(1,'Introduzca no editor na variável b o nome da matriz o vector de
Excel que deseja manipular por defeito se encontra o nome da lista')

fprintf(1,'Si ja fiz, faz caso omissso do contrario corra de novo o
programa:')

%EXEMPLO:Leer arquivo de dados.
%datos=zeros(8,3); %guarda primeiro o espaço
%datos = xlsread('prueba7','Hoja9','B4:D11'); %leer arquivo de Excel
prueba7 na folha 9 de a tabela no espaço B4:D11. Si fora toda a tabela não
vai nada.

b=xlsread('prueba7.xls',9);
J=b';
tam=input('Introduza o tamanho de dados:')
tem=0.0001*tam;
t=[0.0001:0.0001:tem];
Jmedian=zeros(1,tam);
for i=4:tam-3
    Jmedian(i)=median(J(i-3:i+3));

end
Y=fft(Jmedian);
Y2=fft(J);
plot(t,J)
dw=2*pi/(tam*0.0001);
w=(0:tam-1)*dw; %vector de frequências angulares
power=abs(Y2).^2;
plot(w,power)
figure
subplot(1,4,1),plot(t,J)
subplot(1,4,2),plot(t,Jmedian)
subplot(1,4,4),plot(w,fftshift(abs(Y)))
subplot(1,4,3),plot(w,fftshift(abs(Y2)))

figure
G=abs(Y)-abs(Y2);
H=ifft((Y-Y2));
for i=1:3
    H(i)=0;
end
for i=tam-3:tam
    H(i)=0;
end

I=5*H;
L=zeros(1,tam);
P=zeros(1,tam);
for i=4:tam-3
    L(i)=mean(I(i-3:i+3));
```

```

end

for i=4:tam-3
    P(i)=median(I(i-3:i+3));
end
P=2*P;

subplot(1,4,1),plot(w,fftshift(abs(G)))
subplot(1,4,2),plot(t,H);xlim([0.0004 tem-0.0004]);
subplot(1,4,3),plot(t,L);xlim([0.0004 tem-0.0004]);
subplot(1,4,4),plot(t,P);
figure
plot(t,H,t,L,t,P)
grid on
figure
plot(t,J,t,H,t,P)
grid on
for i=1:tam
    if P(i)<=12
        P(i)=0;
    end
    if P(i)>12
        P(i)=5*P(i);
    end
end
for i=1:tam
    if H(i)<=-15
        H(i)=5*H(i);
    end
    if H(i)>-15
        H(i)=0;
    end
end
for i=1:tam
    if L(i)<=-10
        L(i)=2*L(i);
    end
    if L(i)>-10
        L(i)=0;
    end
end
end

figure
plot(t,J,t,H,t,P)
grid on
figure
plot(t,J,t,L,t,P)
grid on

```