

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

Muñoz, Jairo José Chávez, jajomucha@hotmail.com¹
Carvalho, Guilherme Caribé de, gccarval@unb.br¹
Alfaro, Sadek Crisostomo Absi, sadek@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, 70.910-900, Brasil.

Resumo: Esse artigo apresenta como objetivo principal uma metodologia para a procura de parâmetros que minimizem os problemas que se tem na soldagem, para ajudar nesta busca foram utilizadas técnicas como a perfilografia, a análise de sinais por Fourier e critérios de estabilidade e redução de energia na transferência metálica para obter soldas de alta qualidade com menos testes, estas soldas permitiram obter melhores camadas e aplicá-las na recuperação de pás de turbinas hidrelétricas que apresentam buracos ou defeitos originados por cavitação, entretanto na recuperação de peças com esses tipos de defeitos existem múltiplos parâmetros e aspectos técnicos que tem que ser levados em conta, assim o trabalho teve como foco a variação dos principais parâmetros para uma solda com arame tubular ESAB OK TUBROD 410 NiMo (MC) sobre uma base de aço doce (AISI 1020); escolha feita de modo a reduzir o custo experimental mas com uma metodologia que pode ser adaptada para outros tipos de aço. No estudo desses parâmetros, a metodologia a ser seguida faz uso de um modelo experimental baseado nos critérios de estabilidade para a soldagem GMAW- Pulsado e por GMAW- Convencional em busca dos valores mais aceitáveis, também se tomaram dados específicos que foram analisados por meio de gráficos de corrente e tensão, verificou-se curvas com maior estabilidade, melhor comportamento e menor consumo de energia, também foi aplicado à análise de sinais de Fourier para reconhecer pequenas falhas de estabilidade, outras ferramentas utilizadas para a identificação dos parâmetros encontrados são a técnica por perfilografia e o processo por observação direta na solda, outra razão para trabalhar com a transferência metálica GMAW- Pulsado é que apresenta uma maior estabilidade e fácil controle, produzindo um baixo aporte calórico, diminuindo a energia do processo, além disto, esta técnica permite que se atinjam os parâmetros adequados com menor quantidade de experimentos e se obtém uma melhor geometria do cordão para uma ou várias camadas apresentando poucos defeitos, sem apresentar respingos e com uma boa reprodutibilidade do processo necessário na indústria.

Palavras-chave: GMAW-Pulsado, Transferência goticular, Critérios de desenvolvimento, Fourier, Perfilografia.

1. INTRODUÇÃO

A erosão por cavitação é basicamente entendida como a perda progressiva de material de uma superfície sólida por consequência do colapso de bolhas de vapor formadas num líquido à pressão e temperaturas críticas. Este fenômeno é encontrado em turbinas e parte do sistema hidráulico de geração de energia elétrica, entre outros como é apresentado no trabalho de Calainho, J. A. et al. (1999).

As usinas hidroelétricas representam uma parte importante em 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 enchendo os buracos formados por diferentes métodos, mas ainda com muitas falhas. Por esta razão 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 pulsado (Eassa, 1983 e Slania, 1996). Determinaram-se os parâmetros aceitáveis procurando uma geometria adequada, estabilidade e homogeneidade na solda. Inicialmente foram determinados através do método de transferência convencional procurando uma gota de tamanho igual ao raio do fio e, em seguida, usando a transferência GMAW-Pulsado até determinar os melhores parâmetros seguiu-se a metodologia proposta por Amin, (1983), (Rajasekaran, Kulhkarmi e Mallya,1998) e trabalhada depois por Resende (2007).

Usando os critérios de Burnoff para encontrar parâmetros ótimos, além de utilizar os métodos de perfilografia e análises de sinais por Fourier, para fazer umas análises dos dados e dos sinais até alcançar esses parâmetros ótimos com menos experimentos feitos.

Porém, a excelente qualidade geométrica e superficial dos depósitos, a redução significativa dos defeitos de soldagem e um baixo consumo de energia aliada a uma ausência de respingos e salpicos, justificam o seu emprego nas usinas economizando tempo, energia e permitindo soldas de melhor qualidade.

Entre as principais vantagens do processo GMAW-Pulsado podem-se citar a facilidade de ser mecanizado ou automatizado, o uso de altas velocidades de soldagem, altas taxas de deposição, necessidade de limpeza mínima após soldagem, possibilidade de uso em todas as posições e boa penetração. Entre as suas limitações é a sua maior sensibilidade a variações de seus parâmetros operacionais, incluindo entre estes as características do arame. Esta sensibilidade se traduz, entre outros aspectos, em mudanças na transferência metálica.

O mapeamento de uma ampla faixa de parâmetros permitirá gerar informações que auxiliem no desenvolvimento de procedimentos de soldagem para condições diversas e o uso de Fourier permite-nos ver as diferentes falhas ou instabilidade escolhendo os melhores parâmetros cujo estudo pode-se corroborar mediante perfilografia.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO E APARATO EXPERIMENTAL.

2.1. Processos de soldagem

Idealmente, 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 isenta de defeitos na soldagem;
- 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.

Atualmente, os processos de soldagem aplicáveis que mais se aproximam dessas características ótimas 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 segundo (Wainer, Brandi e Mello, 1992).

O ponto de partida, nesta pesquisa, foram os parâmetros de soldagem utilizados no trabalho de Oliveira, M. A. (2001), para o arame maciço de aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro. Posteriormente foram feitos novos trabalhos baseados nos dados de Oliveira, M.A. (2001), em que se obteve um cordão de solda com melhor acabamento superficial, como no trabalho de Bonacorso, N. G. (2004).

Os parâmetros de partida propostos inicialmente neste trabalho para ter em conta em soldagem pulsado e empregados na posição plana ou horizontal são apresentados na Tabela 1. O material de soldagem foi feito para o recobrimento de superfícies por meio da fusão do arame tubular de aço inoxidável ESAB OK Tubrod 410 NiMo (MC), de 1,2 mm de diâmetro, sobre o aço doce (AISI 1020).

Tabela 1: Parâmetros

<i>Parâmetros variáveis</i>	<i>Parâmetros fixos</i>
Velocidade de soldagem: 6 a 12 mm/seg	A distância entre o bico de contato ou tocha e a peça (DBCP): 15 mm
Velocidade do arame: 2 a 8 m/min	
Frequência de pulsação: 55 a 300 Hz	Ângulo da tocha respeito da vertical: 0°
Corrente de pulso: 300 a 450 A	
Corrente de base: 15 a 80 A	Diâmetro do arame: 1,2 mm
Corrente separadora de gotas: 50 a 110 A	
Indutância: 0 a 50	(Stand Off) Distância do bocal com a peça: 12 mm
Tempo de base e pulso em cada ciclo	Gás proteção: Argônio + 6% de dióxido de carbono (CO ₂), Razão 15 lt/min
Tempo de pulso separador de gotas	

2.2. Materiais e equipamentos utilizados

Foram utilizados corpos de prova cortados a partir de uma barra chata de 6,35 mm (1/4 pol) de espessura, de aço 1020, para deposição de cordões sobre chapa, de modo a reduzir o custo experimental. O material de adição empregado foi o arame tubular, de 1,2 mm de diâmetro, ESAB OK Tubrod 410 NiMo (MC). O gás de proteção empregado foi uma mistura gasosa industrial constituída, nominalmente, por 94% de Argônio e 6% de CO₂. Foi usada uma Fonte Fronius TRANS PLUS SYNERGIC 5000.

2.3. Critérios de avaliação de parâmetros para GMAW – Pulsado

Para esta primeira parte do trabalho, de busca por parâmetros ótimos, foi seguida uma metodologia referenciada por (Amin, 1983 e Rajasekaran, 1998). Com este método 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 M. (1983) 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 taxa 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 os critérios foram analisados os dados de tensão e corrente, no modo de transferência convencional spray ou goticular, com um tamanho da gota próximo ou igual ao raio do arame, que é o mais adequado para obter boas características geométricas no processo GMAW-Pulsado.

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

2.4. 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 Bálsamo, P.S (2000). Neste trabalho apresenta-se a aplicação da técnica de Perfilografia para adquirir imagens da transferência metálica no processo GMAW- Pulsado usando uma câmera CMOS com uma taxa de aquisição de mil *frames* por segundo.

2.4.1 Sistema Óptico

O sistema óptico proposto para trabalhar com perfilografia é apresentado na Fig. (1). O princípio da Perfilografia se apresenta 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 expansor de feixe *laser* de tipo *Galileu* como apresenta (Weichel, 1990; Steen, 2003 e Groetelaars, 2005). O expansor utiliza uma lente divergente como entrada do feixe e uma convergente como saída, que produz idealmente uma frente de onda plana na saída do expansor, não tendo assim distorção nem ampliação nas geometrias dos elementos apresentado no trabalho de Lopera, J. E. Pinto et al. (2011).

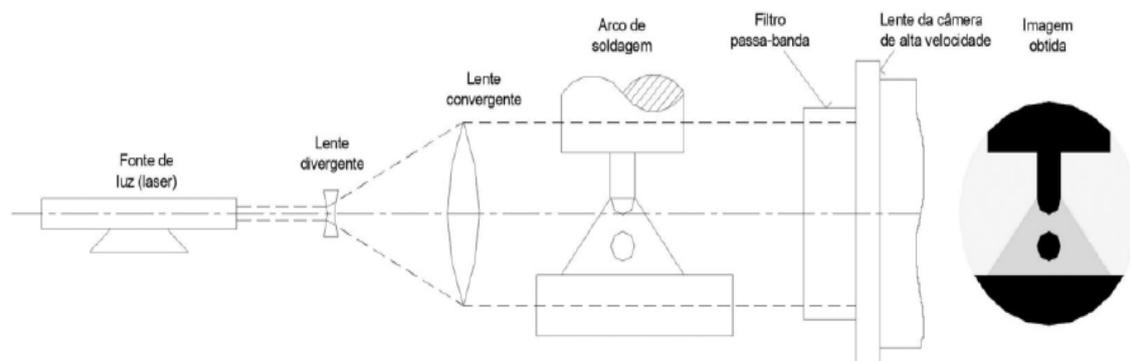


Figura 1. Princípio da perfilografia aplicado a soldagem. (Bálsamo et al, 2000)

2.5. Análises de Fourier

A série de Fourier permite descrever sinais periódicos como uma combinação de sinais harmônicos (sinusóides). 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 nosso estudo, utilizou-se a transformada discreta de Fourier, pois de tal forma pode-se reconstruir os sinais de saída determinar as frequências do sinal e comparar com um sinal ideal. E, assim, procurar falhas na solda usando a análise do sinal periódico de entrada e filtros diferentes para identificar falhas nos oscilogramas de tensão e separar essas falhas usando estes diferentes filtros, como filtros de média, mediana, filtros passa-alto “*highpass*” e passa-baixo “*lowpass*” e ampliando os resultados da análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estudo dos tipos de transferência e regiões do trabalho

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

Por meio da perfilografia, foi verificada a transferência metálica nos diferentes grupos mostrados na Figura 2, com os símbolos CC “curto circuito”, G “globular” e S “spray ou goticular”, e os números 1 para (DBCP) 12mm e 2 para um (DBCP) 15mm, os grupos mais importantes neste estudo foram as regiões G2 transferência globular e globular repulsiva com gotas de raios maiores do que o raio do arame, (DBCP) 15mm e Sg.2 transferência goticular com tamanho da gota de 1,2 a 0,9 do tamanho do diâmetro do arame. Neste estudo precisa-se de valores de corrente e tensão em que o tamanho da gota é igual ao raio do arame de interesse na transferência GMAW-Pulsado. Para os outros casos de transferência metálica GMAW-Pulsado só são indicados na Figura 2. CC1 “transferência por curto circuito com alta corrente, baixa energia e valor (DBCP) 12 mm”, CC2 “transferência por curto circuito, baixa corrente, alta energia e valor DBCP 15 mm”, Sga.2 “transferência goticular com alongamento” e Sgr.2 “transferência goticular rotacional e explosiva com alta corrente e alta energia” (Rajasekaran, 1998; Lopera, 2011; Eassa, 1983 e Slania, 1996).

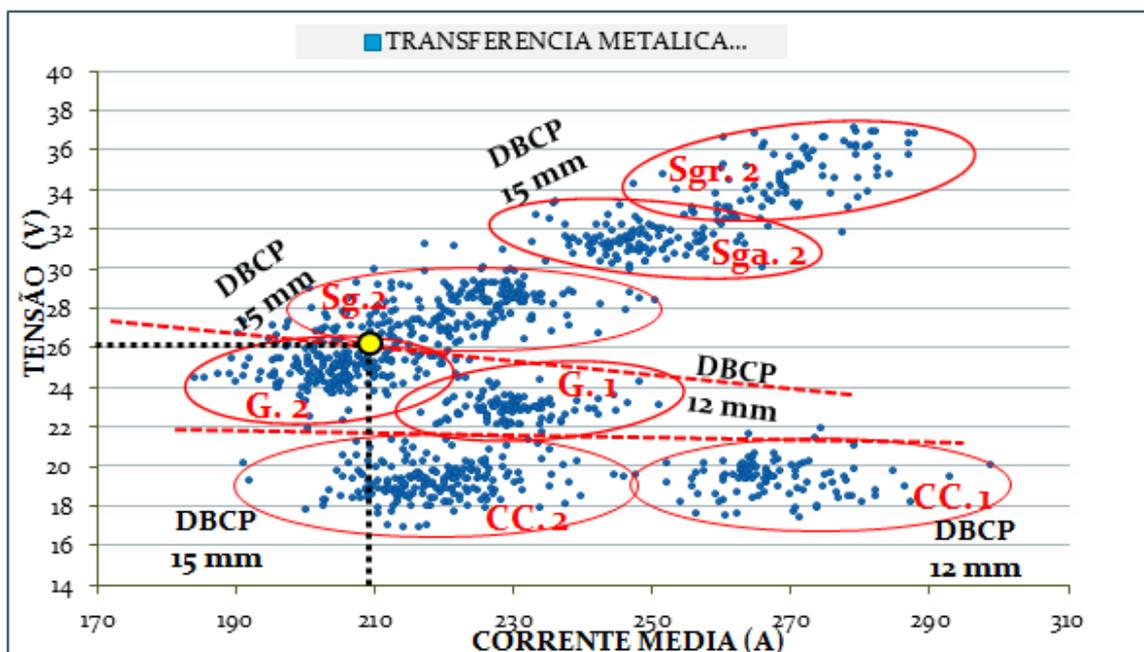


Figura 2. Mapeamento para os tipos de transferência de metal de acordo com a tensão e a corrente. Seleção de regiões por tipo de transferência de metal, Região Curto Circuito (18 a 22 v) “CC”. Região Globular (22 a 26 v) “G” Região Goticular o Spray (26 a 36v) “S”

A primeira análise mostra um valor ótimo para a tensão em GMAW-P entre 26 v e 30 v, obtendo gotas de raio aproximadamente ou igual ao raio do arame, com a corrente de transição entre 190 A e 220 A para a transferência convencional, o ponto de transição foi calculado na figura 2 em 26 v e 199 A.

3.2. Análise de solda de acordo com critérios.

3.2.1. Critério de Burnoff.

Buscando satisfazer o critério de Burnoff descrito acima, foram realizados cordões, inicialmente utilizando GMAW-Convencional e logo GMAW-Pulsado para diferentes velocidades de alimentação de arame, sendo os parâmetros ajustados para se 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 vs. I_m .

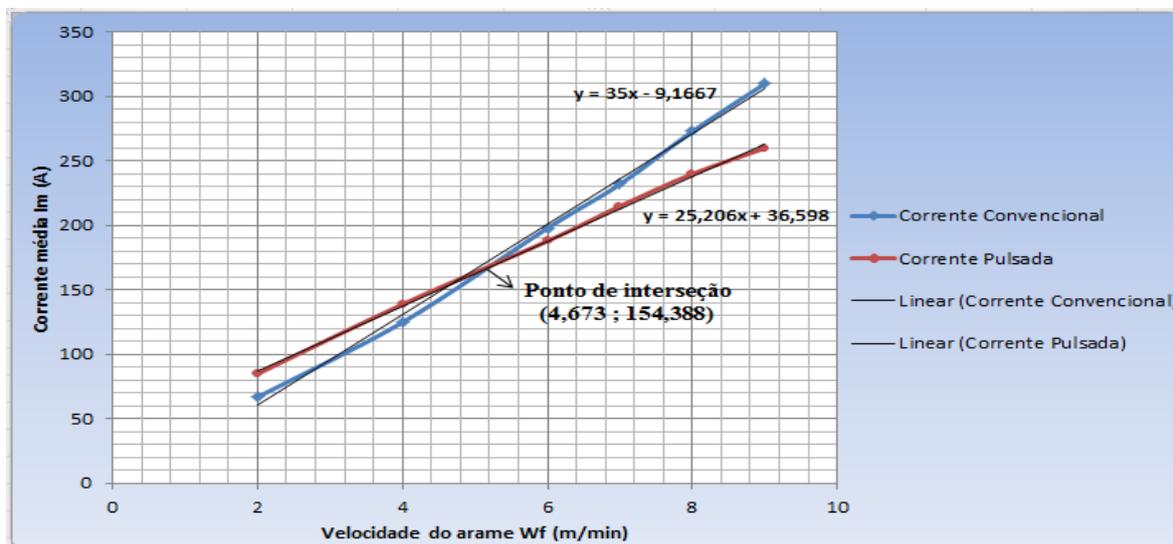


Figura 3. Ajuste de pontos por linhas retas e busca de sua interseção para as curvas V_a “versus” I_m obtido para o processo convencional e pulsado

A interseção das linhas na Figura 3 determina a velocidade mínima de alimentação para obter uma transferência spray estável e o valor da corrente média necessária, com correntes mais altas. Neste ponto, o processo é estável e com a técnica GMAW – Pulsado são obtidos valores mais baixos de corrente e energia do que com a GMAW - Convencional e acima do ponto de interseção, com aumento óbvio de consumo de energia. Haja vista que a penetração da poça de fusão é muito grande, o ideal é trabalhar perto do ponto de interseção. Porém para transferência convencional, precisam-se de valores mais altos para obter uma transferência goticular ou spray. Já para pulsado, pode-se obter com valores menores, mas quando os valores de corrente são muito baixos, gera-se instabilidade 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 para diminuir a energia, mas eles têm que estar muito próximos do ponto de interseção encontrado para ter uma boa estabilidade. Entretanto, para convencional, neste mesmo valor, o ponto de interseção ainda apresenta muita instabilidade e gotas na transferência globular ou de transição. Conforme a Figura 3, o ponto com os valores em que se espera melhor estabilidade na transferência e bom tamanho da gota com GMAW-Pulsado é a velocidade de alimentação de 4,673 m/min e o valor da corrente média de 154,388 A. Estes valores podem ser ainda diminuídos em pulsado tendo corrente média muito mais baixa. Entretanto se baixarmos muito o valor da corrente, a instabilidade e a formação de respingos na solda serão cada vez maiores e se aumentamos, aumentam-se o calor gerado e a penetração da poça.

Neste trabalho, foram analisados grupos abaixo do ponto de interseção para corroborar com as afirmações e grupos acima do mesmo para as velocidades de alimentação 5, 6 e 7 m/min, com correntes médias de 175, 188 e 200 A. As correntes médias se apresentaram altas em função da densidade e do ponto de fusão do arame. Entretanto, a corrente acima de 154,388 amperes é necessária para uma boa estabilidade.

Com base na Figura 3 e os valores encontrados pode-se determinar domínios paramétricos. Entretanto deve ser considerado que o nosso atual sinal de entrada é uma onda quadrada, cuja função para a corrente média na transferência GMAW-Pulsado é:

$$I_m = (T_p \cdot I_p + T_b \cdot I_b) / (T_p + T_b) \quad (1)$$

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.

3.2.2. Critério de transferência de Metal

Rajasekaran (1998) em sua pesquisa considera o volume da gota igual ao produzido por uma esfera “Eq. (2)”, onde, r = raio do arame (mm) = 0,6 mm e VD = Volume da gota (mm^3).

$$VD = (4/3).\pi.r^3; \quad VD = 0,90478 \text{ mm}^3 \quad (2)$$

Sabemos, também, que a quantidade de material depositado sobre o metal de base é o produto do volume (VD) da gota, pela frequência do pulso (F), ou o produto da área da seção transversal do eléctrodo (s) com a velocidade (v). Ou seja:

$$VD.F = s.v \quad (3)$$

Onde: $VD = (4/3).\pi.r^3$ e $s = \pi.r^2$ Substituindo em (3): $(4/3).\pi.r^3.F = \pi.r^2.v$

Finalmente é obtido: $v = (2/3).d.F$ ou $F = 3 v / (2d)$ (4)

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

$$F = 3 * 100/2 * 1.2 \text{ então; } F = 125 \text{ Hz e } T_c = 8 \text{ ms}$$

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

Para 6 ms $F = 167 \text{ Hz}$; Para 5 ms $F = 200 \text{ Hz}$; e $TC = T_p + T_b$ (5)

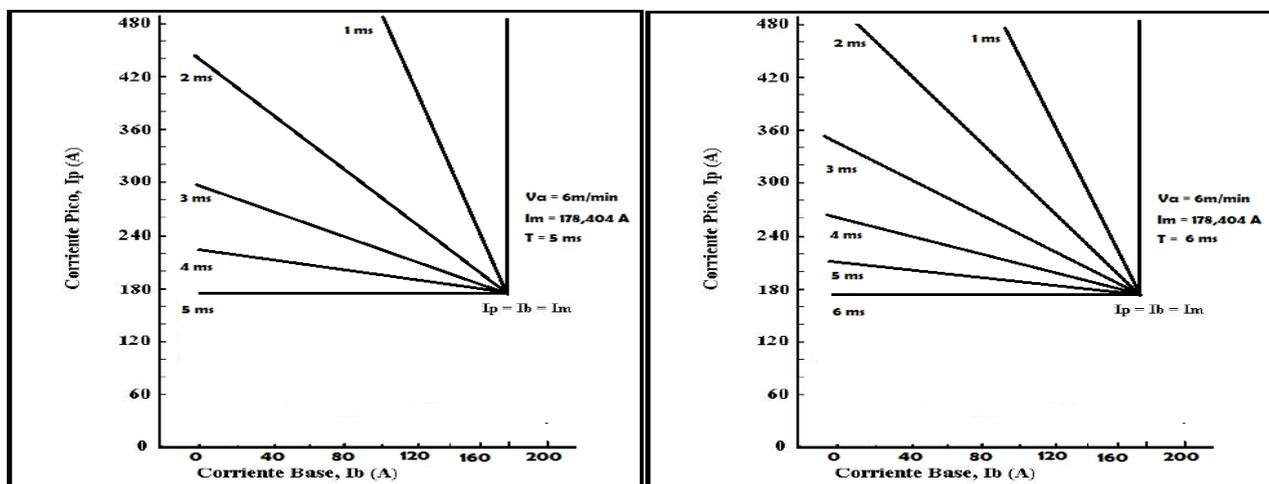


Figura 4. - Zonas paramétricas de acordo com o critério de Burnoff. (T = 5 ms e T= 6 ms)

3.2.3. Outros critérios considerados.

Limitar o pico de corrente (Ip) e tempo de pico (Tp): Determina as condições de corrente de base e tempo de base mais adequados para estabelecer a relação Ip vs Tp na transferência spray.

Determinação de parâmetros de Destacamento (kV): Utilizando GMAW convencional para obter o modo de transferência spray, é registrado valores de Im para cada Va, obtiveram-se os tempos entre sucessivos desprendimentos de gota subsequentemente a obtenção do valor modal da gota DTM e volume modal da gota VMD para cada velocidade de alimentação (VMD = 0,913-1,35 mm³), com a construção de gráficos é determinado o parâmetro de destacamento kV.

Aporte calórico e quantidade de energia por gota, por ciclo e no cordão: Esta análise foi realizada para determinar as correntes de pulso confiável considerando a energia liberada e energia eficaz.

De acordo as referencias (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 desse 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)

- 65% E - Calor fornecido para o arame e o gás (plasma); 20 %E - Calor fornecido na poça;
- 10%E - Calor liberado para o meio por condução, convecção e radiação; 5%E - Luz e Som.

Onde E é: Energia Total gerada na fonte e Q: Calor; A energia dissipada = 35%; Energia efetiva = 65%

Portanto: $Q_{total} = Q_{dissipado} + Q_{fusão\ do\ arame} = 30\% E_{total} + 65\% E_{total} = Q_{dissipado} + (m \cdot C_e \cdot \Delta T)$

$$Q_{total} = Q_{dissipado} + (m \cdot C_e \cdot \Delta T) \quad (6)$$

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

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

$$VD = \frac{4}{3} \pi R^3 = 4,1888 \cdot (0,6)^3 = 0,9047808 \text{ mm}^3. \quad (7)$$

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 (V) usada foi de 26 v, com uma frequência de 240 Hz, com a qual se tem mais estabilidade nos testes e melhor geometria do cordão.

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

$$E = P1 \cdot T_p + P2 \cdot T_b \quad (8)$$

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

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

Onde D = Densidade e VD = Volume da gota

$Q_{total} = 95\% E_{total} = 28,1736 \text{ J} \cdot 0,95 \text{ J} = 26,7649 \text{ J} = 26,76 \text{ J}$;

$Q_{fusão} = 65\% E_{total} = 28,1736 \cdot 0,65 \text{ J} = 18,3128 \text{ J} = 18,31 \text{ J}$ por ciclo. Esta energia é 33% energia no plasma e 67% energia na fusão da gota (12,268J).

Com esses dados, pode-se calcular a corrente de pico e corrente de base, tendo em conta que a área do eixo $I=0$ até a curva representa a média de corrente e pode-se calcular a energia média por ciclo.

3.3. Análise de oscilogramas

De acordo com os dados encontrados acima foram feitos 26 testes, numerando-os de 1 a 26 para cada cordão, organizados em grupos onde um parâmetro é variado e o resto foi fixado para chegar aos parâmetros confiáveis, os parâmetros variáveis são descritas na Tabela 1. Em seguida, apresentam-se os oscilogramas de duas das amostras mais representativas com uma boa geometria de cordão.

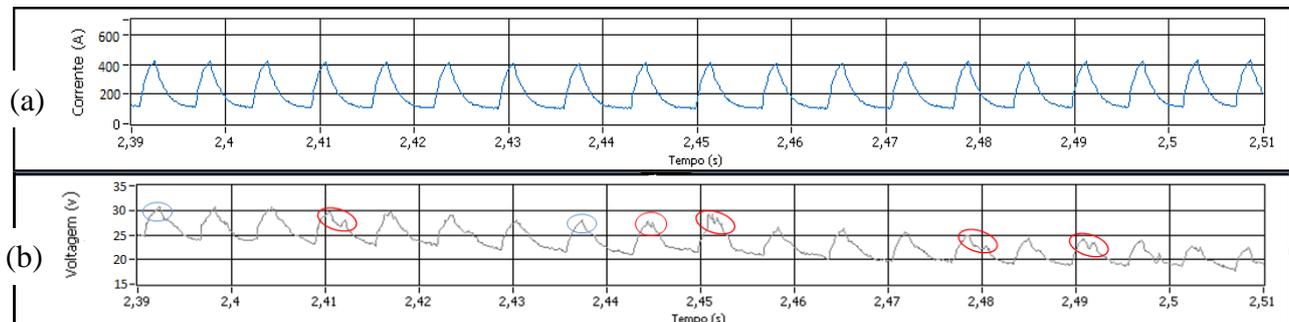


Figura 5. Cordão 10, alta indutância, I_p 385A, I_b 80 A, Tensão 26v, V_a 6m/min e F 180Hz. a) Gráfico (I vs T) b) Gráfico (V vs T)

A alta indutância não permite que o tempo de pulso fique no ponto máximo por mais tempo diminuindo a energia e a potência suficiente para a formação de uma gota. A figura 5(a) mostra o gráfico de corrente para o cordão 10 que é homogêneo e não apresenta curtos com alta indutância, portanto o aporte energético é menor. Figura 5(b) mostra o gráfico de tensão do cordão 10 sinalizando os pulsos com um único pico e dois picos os quais são relacionados com a quantidade de gotas isoladas.

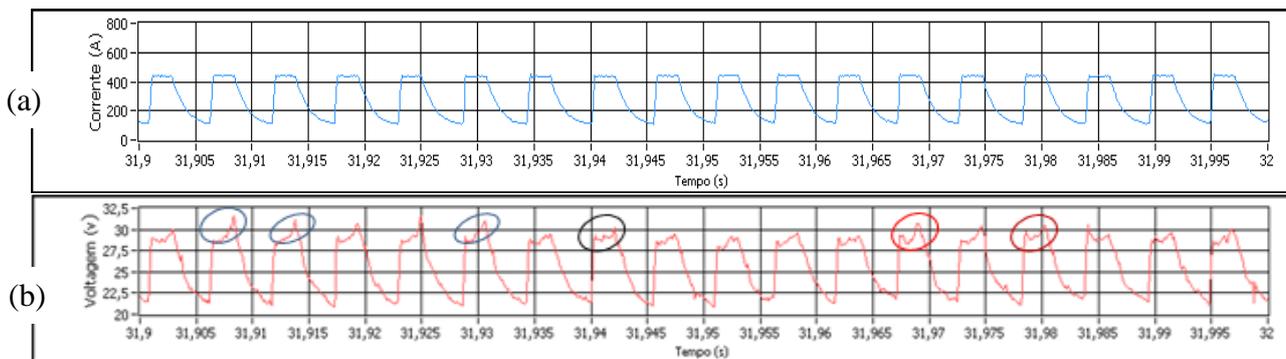


Figura 6. Cordão 18, baixa indutância, I_p 380A, I_b 80A, Tensão 26v, V_a 7m/min, Frequência 200 Hz.
 a) Gráfico (I vs T) b) Gráfico (V vs T)

Na figura 6(a) o gráfico de corrente para o cordão 18 é homogêneo, muito estável não apresenta curtos. Apresenta-se o oscilograma expandido entre 31,9 a 32s. Na figura 6 (b) o gráfico de tensão para o cordão 18 sinalizando os pulsos com um único pico e dois picos os quais são relacionados com a quantidade das gotas isoladas.

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

3.4. Análise de Fourier

Para a análise dos oscilogramas de todas as amostras foi feito um programa em Matlab que calcula a energia eficaz, estabilidade e homogeneidade baseado em medidas de áreas entre os pulsos dos oscilogramas com suas variâncias também foi realizado uma análise de Fourier dos sinais de corrente e tensão, onde se obteve dados como a identificação dos diferentes defeitos na solda durante a soldagem com as mudanças nos sinais. A análise de Fourier foi feita para todas as mostras apresentando melhores resultados para as amostras 20, 21, 23 e 24 com $F=240\text{Hz}$, I_m entre 230 e 250A e $V_a=7\text{m/min}$. Um exemplo de como a análises de Fourier nas sinais pode determinar e classificar falhas no processo de soldagem é apresentado como segue na amostra 15 que tem alguns defeitos por curto-circuitos e de instabilidade, neste exemplo o oscilograma foi feito só para 500 dados onde se tem alterações no pulso, sua intensidade frequência e homogeneidade da sinal por ciclo, assim perceber melhor a análise feito com transformada discreta de Fourier.

Na primeira parte se passa o sinal por um filtro de mediana de três dados e se faz uma troca do domínio do tempo a frequência por Fourier com o sinal original e o sinal tratado para este sinal em frequência se faz novamente um filtro de média e um filtro de mediana e é trocado novamente ao domínio do tempo Figura 7.

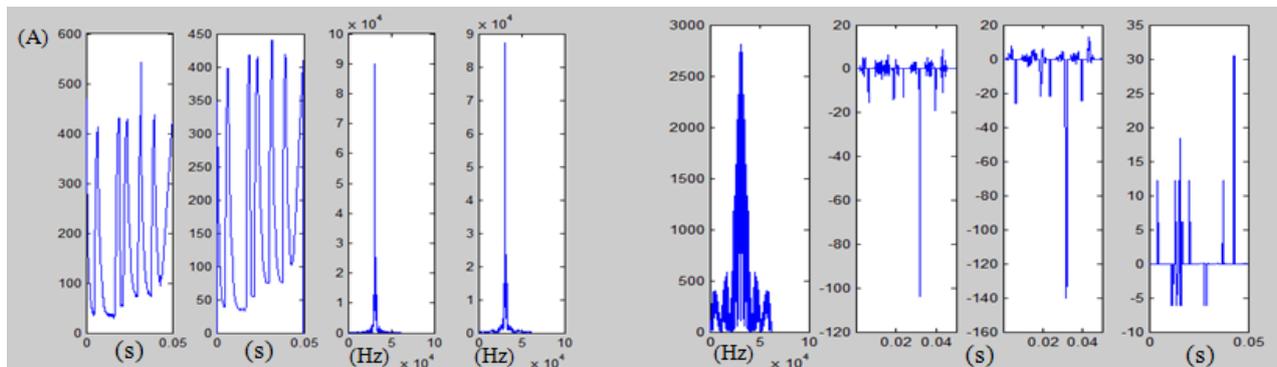


Figura 7. Sinal no domínio do tempo e de frequência e aplicação de filtros de média e mediana, cordão 15.

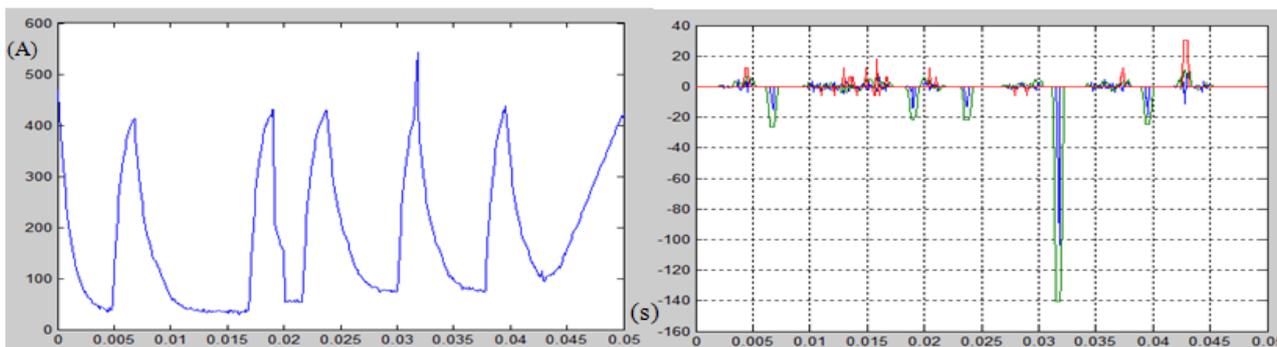


Figura 8. (a) Sinal original de 500 dados no domínio do tempo. (b) Sinal no domínio do tempo tratado por Fourier com os diferentes filtros, linha azul primer filtro com o sinal original, verde e vermelho segundo filtro.

Nos gráficos acima onde foi usado Fourier com diferentes filtros de média e mediana foram destacados as diferentes falhas sobre a corrente com a qual teve instabilidade pode ser visto em cor azul na figura 8(b) todas as falhas e, em seguida quando os filtros são aplicados no mesmo gráfico, podem ser vistas as falhas separadas, com cor verde para a instabilidade o aumento da corrente e vermelho para flutuações ou instabilidade do pulso harmônico na base.

Na figura 9(a) a seguir pode-se ver como os picos que superam o valor de corrente pico são detectados com cor verde e as falhas de instabilidade da onda harmônica com vermelho e na figura 9 (b) é aplicado um filtro para deixar os sinais mais representativos e ampliar o sinal.

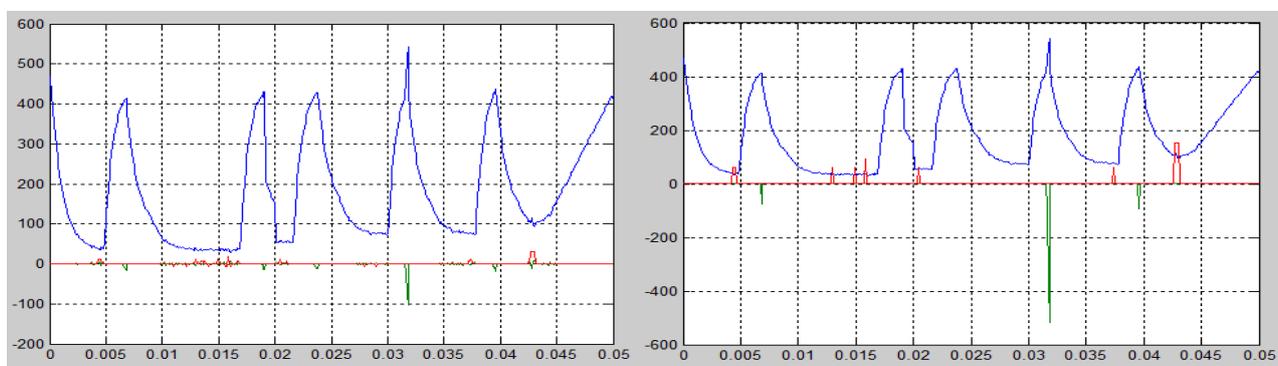


Figura 9. (a) Superposição dos sinais na figura 8. (b) Expansão do sinal que contém as falhas e aplicação do filtro passa-altas.

3.5. Análise por perfilografia.

Com aplicação desta técnica foi comprovado que é gerada uma gota por pulso nos cordões que têm uma elevada estabilidade e boa geometria como mostrado na figura 11. Em alguns oscilogramas foi gerada mais de uma gota a qual é olhada no oscilograma de tensão com dois picos em cada pulso e com Fourier é olhado no sinal. Portanto com perfilografia se verifica isso.

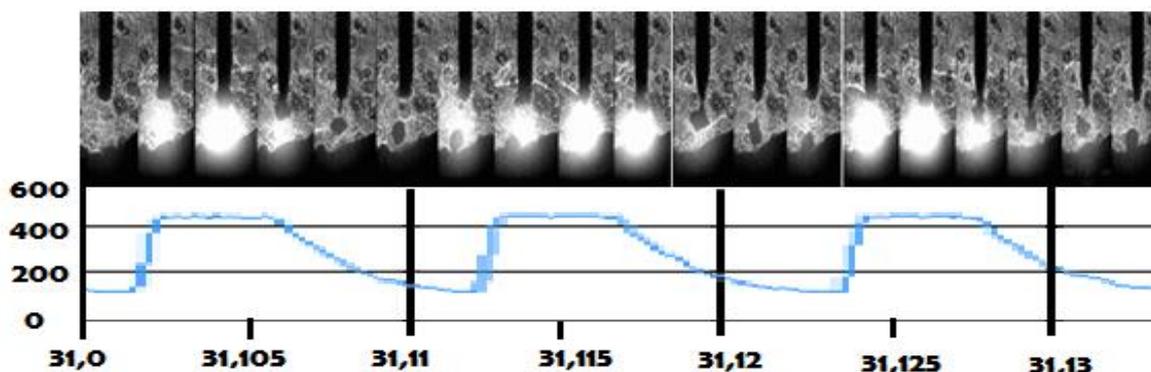


Figura 10. Sequência de imagens por perfilografia com a comparação de o oscilograma de corrente da mostra 20.

4. CONCLUSÕES

Os diferentes critérios trabalhados e a metodologia proposta nos permitiram atingir mais facilmente os parâmetros perto dos valores ótimos sem a realização de muitas experiências e testes. Permitiram ainda encontrar os valores iniciais em que podemos ter a certeza de trabalhar com conjuntos de dados que fornecem bons resultados para uma boa geometria do cordão. Logo, isso significa que outros dados fora destes limites não são aceitáveis.

Os cordões mais homogêneos e com melhor geometria são fornecidos quando é gerada uma ou duas gotas por pulso as quais têm um raio proporcional ao do arame. Para observar a geração de uma única gota por pulso pode ser utilizada a técnica perfilografia.

Os oscilogramas de corrente e tensão analisados por Fourier podem reconhecer a instabilidade dos sinais que determinam quais são os melhores parâmetros que proporcionam mais homogeneidade no cordão e também uma boa geometria, isso pode ser verificado por perfilografia e observação direta do cordão.

Foram obtidos muitos testes bons em pulsado onde é usada uma energia mais baixa, mas um pouco menos estável, a energia utilizada para esse arame é alta devido à densidade, entretanto, com a técnica GMAW-Pulsado se pode diminuir a corrente média e a energia comparada à transferência GMAW-Convencional.

5. REFERÊNCIAS

- Amin, M. 1983, "Pulsed current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding". *Metals construction*, 272-278.
- Bálsamo, Vilarinho, Vilela, and Scotti, 2000, "Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy", *International Journal - Joining of Materials*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-12.
- Bonacorso, N. 2004, "Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando à recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte". Universidade Federal De Santa Catarina.
- Calainho, J. A. L., Horta, C.A., Gonçalves, C. & Lomônaco, F. G. 1999, "Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil". XV SNPTEE, Foz do Iguaçu.
- Dupont and Marder, "Thermal Efficiency of Arc Welding Processes," *Welding Journal*, vol. 74, pp. 406s-416s, 1995.
- Eassa, H. E. Et Al. 1983, "A High Performance Welding Power Source And Its Application". *Ieee*. P. 1241-1244.
- Fuerschbach, "Measurement and Prediction of Energy Transfer Efficiency in Laser Beam Welding," *Welding Journal*, vol. 75, pp. 24s-34s, 1996.
- Fuerschbach, "Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum," *Welding Journal*, vol. 77, pp. 76s-85s, 1998.
- 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.
- Lopera, J. 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". 6º congresso brasileiro, COBEF.
- Okada, "Application of Melting Efficiency and its Problems," *J. of the Japan Welding Society*, vol. 46, pp. 53-61, 1977.
- Oliveira, M. A. 2001, "Estudo do Processo de Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame, Visando sua Utilização em Revestimentos Metálicos". Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis.
- Rykalin, *Calculation of Heat Flow in Welding*. Moscow: Translated by Zvi Paley and C. M. Adams Jr., 1951.
- Resende, A. *Mapamento Paramétrico da Soldagem GMAW com Arames de Aço Inoxidável Ferrítico e Austenítico*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2007.
- Smartt, J. A. Stewart, and C. J. Einerson, "Heat Transfer in Gas Tungsten Arc Welding," presented at ASM International Welding Congress, Toronto, Canada, 1985.
- 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.
- Steen, W. and Watkins K., 2003, "Laser Material Processing", Ed. Springer, London, United Kingdom, 423 p.
- Swift-Hook and A. E. F. Gick, "Penetration Welding with Lasers," *Welding Journal*, vol. 52, pp.492s-499s, 1973.
- Rajasekaran, S. Kulkarni, Mallya, Chataverdi, 1998, "Detachment and plate fusion GMAW". *Welding Journal*, 254.
- Wainer, E. Brandi, S. D. & Mello, F. D. H. 1992, "Soldagem Processos e Metalurgia". Editora Edgard Blücher Ltda.
- Wang, Z. and Zhang, Y., 2007, "Image Processing Algorithm for Automated Monitoring of Metal Transfer in Double-Electrode GMAW", *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, No.7, pp. 2048-2058.
- Weglowski, M., Huang, Y. and Zhang, Y. (2008). "Effect of Welding Current on Metal Transfer in GMAW", *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 33, pp. 49-56.
- Weichel, H., 1990, "Laser Beam Propagation in the Atmosphere", Ed. SPIE, Washington, USA, 108 p.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

OBTAINING GREAT PARAMETERS IN GMAW- PULSED WELDING USING DEVELOPMENT CRITERIA OF METAL TRANSFER, FOR APPLICATION IN THE RECOVERY OF HYDRO TURBINE BLADES.

Muñoz, Jairo José Chávez, jajomucha@hotmail.com¹
Carvalho, Guilherme Caribé de, gccarval@unb.br¹
Alfaro, Sadek Crisostomo Absi, sadek@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, 70.910-900, Brasil.

Abstract. *This article presents the main objective of a methodology for the search of optimal parameters that minimize the problems you have in welding. To help in this quest they used techniques such as shadowgraphy , signal analysis by Fourier and optimization criteria and stability for high quality welds that enabled for better solder layers and apply them in the recovery of hydro turbine blades that have holes or defects generated by cavitation.*

Due to the existence of multiple parameters and technical aspects to take into account the recovery of parts with such defect, the work focused on the variation of the main parameters for a tubular wire welding with ESAB OK Tubrod 410 NiMo (MC) on a base of mild steel (1020) studied the main parameters . For the study of these optimal parameters , follows a methodology that makes use of an experimental model based on optimization criteria and stability for the GMAW -pulsed welding and GMAW -conventional. They take up specific data that have been optimized and analyzed through graphs of current and voltage, using Fourier analysis. It also can analyze the process by direct observation in the solder and shadowgraphy, in order to identify the optimal parameters. The technique used was the forward - pulsed GMAW metal transfer that presents greater stability and easy control, producing a low caloric intake , decreasing the energy of the process . Moreover, this technique allows to achieve appropriate experiments with less parameters and you get a better bead geometry for one or more layers having few defects , without showing splash. Nevertheless , good metallurgy were achieved and good reproducibility of the process characteristics, something required in the industry.

Keywords: *GMAW-Pulsed, droplet transfer, development criteria, Fourier, shadowgraphy.*