

AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS PERÍODOS DE PULSAÇÃO TÉRMICA SOBRE A FORMAÇÃO DO CORDÃO NA SOLDAGEM DE ALUMÍNIO PELO PROCESSO MIG-PT

Celina Leal Mendes da Silva

Professora do CEFET-Pa – Doutoranda na Universidade Federal de Uberlândia, clmsilva@mecanica.ufu.br - Uberlândia, MG, Brasil

Américo Scotti

Universidade Federal de Uberlândia - LAPROSOLDA
ascotti@mecanica.ufu.br – Uberlândia, MG, Brasil

***Resumo:** MIG com pulsação térmica (MIG-PT) é um processo novo que consiste da associação das vantagens de dois processos de soldagem, o MIG pulsado e o TIG pulsado. Neste trabalho é apresentado o estudo da influência do efeito dos períodos de pulsação térmica (t_b e t_p) sobre a formação do cordão, para avaliar a viabilidade e vantagens deste processo. Uma série de experimentos foi realizada com combinações de t_b e t_p em quatro níveis, variando de 0,4 a 1,0 s. Os resultados mostraram que a combinação de t_p e t_b afeta significativamente a profundidade e regularidade de penetração e o aspecto visual do cordão, mas sem efeito sobre a convexidade do cordão. Regiões otimizadas de combinações podem ser determinadas.*

***Palavras-chaves:** Soldagem, MIG, Alumínio, Pulsação Térmica, Geometria de Cordão*

1. INTRODUÇÃO

O MIG é um processo de soldagem a arco voltaico que possui como características principais a elevada produtividade, a boa qualidade da solda produzida e a flexibilidade associada. Contudo, sua eficiência é muito dependente do tipo de transferência metálica. Uma das principais formas de se conseguir uma transferência metálica eficiente é através da pulsação da corrente, com a qual a corrente de base é utilizada para manter o arco aberto e a corrente de pulso deve ser alta o suficiente para provocar o destacamento das gotas. Neste caso, o processo passa a ser denominado de MIG pulsado, cuja a transferência se assemelha a goticular (“Spray”).

Já o processo TIG tem como característica principal a concentração do calor do arco e, conseqüentemente, o melhor controle da poça de fusão. Apesar da baixa capacidade produtiva, em contraste com o MIG, o processo TIG permite realizar cordões de solda de ótimo acabamento, em todas as posições e espessuras de chapas. Esta característica do TIG é acentuada quando se usa corrente pulsada, ou seja, durante a imposição de uma corrente de pulso, há uma fusão mais efetiva da chapa e do material de adição, enquanto que durante a imposição de uma corrente de base, há um esfriamento da poça, induzindo-se melhores

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Ao se fazer diferentes combinações de τ_b e τ_p na pulsação térmica, tanto a corrente média, quanto a taxa de deposição média, assumem valores variados, o que dificulta as comparações (cordões com volumes e energias impostas distintas). Desta forma, para avaliar sistematicamente o efeito desses períodos, optou-se por manter o mesmo volume de cordão de solda em todos os experimentos, o que pôde ser conseguido mantendo-se a relação da velocidade de alimentação total (V_{a_t}) pela velocidade de soldagem (V_s) igual a uma constante (definida em um estudo exploratório para este trabalho como 26, valor que garantiu um tamanho de cordão adequado). Além disto, como a estabilização térmica da soldagem do alumínio demora a ocorrer, optou-se também por fazer cordões com comprimentos rigorosamente iguais (o que é assumido pelos autores equivaler a uma mesma massa de cordão depositado ou aproximadamente a mesma energia imposta total). Para tal, o τ_i e o τ_f também foram mantidos iguais (3 s e 1 s, respectivamente) para todos os ensaios.

Para se conseguir todas estas condições experimentais, as soldagens foram realizadas numa mesa de coordenadas automatizada (SOLDAMATIC XY) e comandada por um programa computacional (AUTO XY), com os quais se consegue acionar o equipamento de soldagem, impondo a este um τ_i para aquecimento da chapa teste, seguido por períodos cíclicos para a soldagem propriamente dita e por um τ_f para evitar cratera, quando então o programa desliga o equipamento de soldagem. Estes períodos, e a velocidade de soldagem ajustada no programa, definem o comprimento de cada cordão.

As soldagens foram realizadas em CC+, na posição plana, por simples deposição sobre chapa de alumínio AA5052, de dimensões 250 x 50 x 6,35 mm. Utilizou-se a fonte eletrônica do fabricante nacional ajustada para o MIG com pulsação térmica e uma tocha do tipo impulso-retração refrigerada a água, com 10° de inclinação no sentido empurrando. O gás utilizado como proteção foi o argônio, a uma vazão de 15 l/mim, e como metal de adição, utilizou-se um arame da classe AWS ER4043, de 1,0 mm de diâmetro, com uma distância bico de contato-peça (DBCP) de 15 mm. Para minimizar o efeito de possíveis curtos-circuitos (outro diferencial desta fonte), ajustou-se uma tensão e corrente de curto-circuito em 6 V e 350 A, respectivamente. A Tabela 1 apresenta os demais valores de ajustes.

Tabela 1 – Parâmetros de ajustes para os ensaios de avaliação do efeito de τ_b e τ_p sobre a formação do cordão

Parâmetros	Período inicial (t_i)	Período final (t_f)	Período da Base Térmica (t_b)	Período do Pulso Térmico (t_p)
I_m (A)	110	50	50	110
I_p (A)	200	200	200	200
t_p (ms)	2,2	2,2	2,2	2,2
I_b (A)	44	20	20	44
t_b (ms)	3,1	11,2	11,2	3,1

Para monitorar as velocidades de alimentação, que variam rapidamente com o tempo durante o processo, foi projetado e construído um sensor que tivesse sensibilidade e resposta dinâmica suficientes para monitorar este parâmetro. Para tal, foi usado um encoder (modelo C58, fabricado pela Suprasonic, com 500 pulsos por volta). Este encoder (sensor) foi conectado a um eixo do trem de polias do alimentador de arame, através de um acoplamento de precisão. O sinal elétrico de saída foi tratado numa interface eletrônica especialmente projetada para tal, correspondendo à velocidade imposta ao arame. Um sistema de aquisição e processamento dos dados, trabalhando numa frequência de 10 kHz por canal e em 12 Bits, foi

usado para adquirir os valores instantâneos da velocidade de alimentação, assim como da tensão e corrente. A Figura 2 ilustra a montagem esquemática dos dispositivos utilizados.

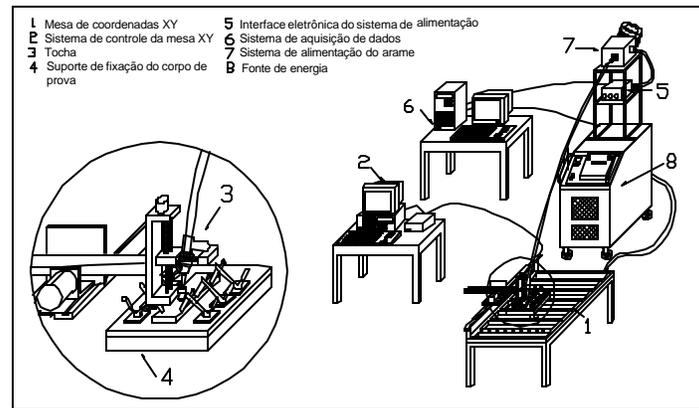


Figura 2 – Montagem esquemática dos dispositivos utilizados nos ensaios de avaliação do efeito de τ_b e τ_p sobre a formação do cordão

Dezesseis combinações de τ_b e τ_p foram planejadas, como mostra a Tabela 2. Os valores das parcelas V_{ab} e V_{ap} não foram ajustados exatamente constantes em função de τ_b e τ_p , visando a manutenção de um comprimento do arco o mais constante possível, $5,0 \pm 0,5$ mm (avaliado por filmagem de alta velocidade). A Tabela 2 também indica o valor monitorado da corrente média total (I_{mt}), tensão média total (U_t) e a velocidade de alimentação média total (V_{at}) e, na seqüência, o valor calculado da relação entre a corrente média e a velocidade de soldagem (I_m/V_s). Nota-se que os valores de I_m/V_s sugerem que o calor imposto foi praticamente o mesmo para todos os ensaios.

Tabela 2 – Combinações de τ_b e τ_p e demais respectivos parâmetros de ajustes e calculados utilizados nos ensaios de avaliação do efeito de τ_p e τ_b sobre a formação do cordão

Ensaio	Parâmetros ajustados					Parâmetros monitorados			Parâmetro calculado
	Base Térmica		Pulso Térmico		V_s (cm/min)	U_t (V)	I_{mt} (A)	V_{at} (m/min)	
τ_b (s)	V_{ab} (m/min)	τ_p (s)	V_{ap} (m/min)	I_m/V_s (Amim/cm)					
44-1	0,4	3,6	0,4	7,1	20,0	22	82	5,1	4,1
46-2	0,4	3,6	0,6	7,1	22,0	23	86	5,9	3,9
48-3	0,4	3,5	0,8	7,2	23,4	23	90	6,1	3,8
41-4	0,4	3,6	1,0	7,2	24,1	23	95	6,3	3,9
64-5	0,6	3,7	0,4	7,2	19,4	22	76	5,1	3,9
66-6	0,6	3,7	0,6	7,2	20,9	22	82	5,5	3,9
68-7	0,6	3,6	0,8	7,2	22,0	23	86	5,7	3,9
61-8	0,6	3,6	1,0	7,2	22,8	23	90	5,9	3,9
84-9	0,8	3,7	0,4	7,2	18,6	22	72	4,9	3,9
86-10	0,8	3,7	0,6	7,2	19,8	22	78	5,2	3,9
88-11	0,8	3,6	0,8	7,2	21,0	23	82	5,5	3,9
81-12	0,8	3,5	1,0	7,2	21,8	23	90	5,7	4,1
14-13	1,0	3,7	0,4	7,3	17,8	22	70	4,7	3,9
16-14	1,0	3,7	0,6	7,2	19,1	22	76	5,2	4,0
18-15	1,0	3,6	0,8	7,2	20,3	23	80	5,3	3,9
11-16	1,0	3,6	1,0	7,2	21,0	23	83	5,5	4,0

Primeiramente fez-se uma análise visual dos cordões de solda. Em seguida, as chapas de teste foram seccionadas transversalmente, rigorosamente nas mesmas posições, subdividindo-as em 4 partes (descartou-se as duas extremidades). Depois, mediu-se o número de escamas nos 2 segmentos, calculou-se o número médio de escamas por unidade de comprimento (Esc/mm) e avaliou-se visualmente a regularidade das mesmas (as 2 seções permitiram avaliar a progressão do cordão).

As seções transversais dos segmentos centrais foram, então, atacadas com o reagente Tucker's para avaliação geométrica dos cordões. No caso, mediu-se reforço (r) e largura (L) e calculou-se o índice de convexidade (r/L) em 3 das 4 seções dos 2 segmentos, usando-se um sistema digital de tratamento de imagens (GLOBAL LAB IMAGE). Por último, cortou-se cada segmento no sentido longitudinal, de tal forma a se obter a mediatriz do cordão. Cada segmento, após atacado, teve 9 medições das distâncias entre a superfície inferior da chapa e a área fundida, com espaçamento de 4,5 mm entre medidas (Figura 3). Estes valores foram usados para quantificar a penetração (Pv) e os respectivos desvios padrões (DpPL) foram usados para avaliar a variação da penetração ao longo do cordão de solda.

Os resultados foram avaliados pelo tratamento estatístico de correlação parcial, com o auxílio de um programa comercial, considerando-se um nível de significância (α) igual a 5%, ou seja, com uma confiabilidade dos resultados de 95% (Box e Hunter, 1978).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os valores médios referentes às grandezas geométricas e afins, enquanto a Tabela 4 apresenta os resultados da análise estatística destas grandezas. Percebe-se que Esc/mm e Pv são significativamente afetados pelo ajuste de τ_b e τ_p . Como esperado, o aumento de um dos τ faz reduzir o valor Esc/mm. Já para Pv, o comportamento é diferente, quando aumenta-se τ_b , diminui-se a penetração e o inverso acontece com τ_p , ou seja, o seu aumento leva a aumentar a penetração. Quanto às demais grandezas, os resultados sugerem que não existe uma consistência entre o efeito de τ_b e τ_p .

Tabela 3 - Resultados das medições geométricas

Ensaio	Esc/mm	r (mm)	L (mm)	r/l	Pv (mm)	DpPL
44-1	0,39	2,52	13,73	0,18	2,72	0,62
46-2	0,28	2,27	12,43	0,18	2,61	0,33
48-3	0,22	2,46	11,62	0,21	2,60	0,25
41-4	0,20	2,47	11,59	0,21	2,72	0,29
64-5	0,32	2,51	11,98	0,21	2,20	0,32
66-6	0,26	2,53	12,03	0,21	2,33	0,36
68-7	0,20	2,52	11,37	0,22	2,42	0,43
61-8	0,18	2,36	11,74	0,20	2,92	0,42
84-9	0,29	2,36	11,72	0,20	2,35	0,40
86-10	0,25	2,67	12,11	0,22	1,70	0,30
88-11	0,18	2,48	11,66	0,21	2,50	0,62
81-12	0,17	2,53	13,02	0,19	2,50	0,42
14-13	0,25	2,26	12,70	0,18	1,85	0,37
16-14	0,22	2,40	13,26	0,18	2,05	0,37
18-15	0,18	2,23	13,92	0,16	2,48	0,51
11-16	0,15	2,29	14,03	0,16	2,41	0,52

Como avaliar um cordão de solda pode ser algo subjetivo, resolveu-se definir como

parâmetros essenciais aqueles que são fundamentais no desempenho da junta soldada. E como não essenciais, os que estão mais relacionados com aspectos visuais. Dentro desta classificação, resolveu-se ,ainda, qualificar cada parâmetro de acordo com um grau de qualidade (Bom-B, Regular-R e Insuficiente-I). Esses graus foram subjetivamente estabelecidos, como mostra a Tabela 5.

Tabela 4 - Coeficientes α da análise de correlação parcial ($\alpha < 0,05$ significa que o efeito de τ_b e τ_p é estatisticamente significativo. O sinal negativo indica que a relação é inversa)

	τ_b	τ_p
Esc/mm	-0,0000	-0,0000
r/L	-0,0771	-0,9093
Pv	-0,0067	0,0146
DpPL	0,3213	0,7951

Tabela 5 - Os parâmetros de acordo com um grau de qualidade (Bom-B, Regular-R e Insuficiente-I)

Parâmetros	Classificação	Grau de qualidade		
		Bom (B)		Insuficiente (I)
Esc/mm	Não Essencial	0,18 \geq B \geq 0,30		I < 0,18 e I > 0,30
r/L	Essencial	0,20 \geq B \geq 0,30	0,15 \geq R > 0,20	I < 0,15 e I > 0,30
Pv	Essencial	B \geq 40% da e	35% da e \geq R > 40% da e	I > 35% da e
DpPL	Essencial	B \leq 0,35	0,35 > R \geq 0,50	I > 0,50

O primeiro parâmetro dos essenciais é o DpPL. As Figuras 3 a 5 ilustram os diferentes formatos da penetração ao longo do cordão de solda, em função das combinações τ_p e τ_b . Percebe-se que alguns cordões apresentaram um formato ondular (maiores DpPL, Figura 3), portanto indesejáveis, e outros com um formato linear (menores DpPL, Figura 4). Entretanto, o uso isolado do DpPL para avaliar a regularidade de um cordão pode levar a erros. Por exemplo, o aumento da penetração ao longo do cordão do ensaio 44-1 (Figura 5), devido ao contínuo aquecimento da chapa de teste, resultou em um valor de DpPL igual a 0,62, considerado grande, embora não houvessem grandes irregularidades no formato do mesmo (por isto conceituado como Bom). Entretanto, se compararmos o resultado do DpPL do ensaio 44-1 com o do ensaio 88-11 (Figura 3), percebe-se que valores iguais de DpPL (= 0,62) podem levar a um comportamento totalmente diferente, apresentando grande irregularidade na penetração ao longo do cordão. Mas, é importante ressaltar que, entre os 16 ensaios, somente no ensaio 44-1 houve uma grande variação da penetração ao longo do cordão (comportamento inesperado) e talvez seja esta a principal razão de não se ter conseguido significância na análise de correlação parcial.

Em função da falta de correlação entre duas das variáveis na análise estatística (Tabela 4), uma outra forma de visualizar a existência desta seria através de mapas de graus de qualidade, como ilustrado na Figura 6. Percebe-se que a regularidade é maior para valores pequenos de τ_b e, em escala menor, para os valores menores de τ_p . Assumindo a regularidade como essencial, só se poderia soldar usando-se um τ_b de 0,4 s.

Já a análise do segundo parâmetro essencial, Pv, poderia ser feita apenas pelos índices da Tabela 4, que indicam que a penetração média cresce para menores valores de τ_b e maiores de τ_p . A Figura 7 ilustra como, mesmo mantendo-se o mesmo volume de solda por unidade de comprimento, as profundidades de penetração podem ser distintas. Esta característica do

MIG-PT pode ser trabalhada favoravelmente. Por exemplo, escolhendo a combinação de τ que dê menor penetração para chapas finas. Mas, a utilização do mapa de grau de qualidade permite uma visão mais clara, como mostra a Figura 8. Fica mais clara visualizar as regiões de maiores e menores penetrações, permitindo até imaginar uma programação de sinergismo, onde os parâmetros de pulsação seriam automaticamente corrigidos para peças com seções de diferentes espessuras, mas ainda mantendo o enchimento do mesmo volume de solda. É importante chamar a atenção para o fato de que a região de penetração alta coincide com a região de boa regularidade do cordão, mas a região de baixa penetração levaria a uma região de regularidade apenas regular.

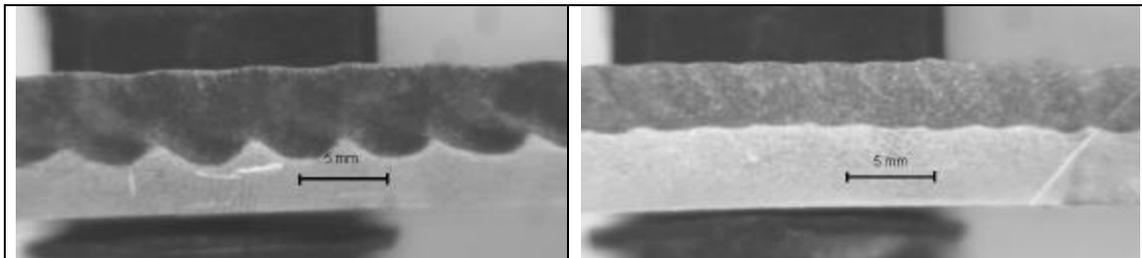


Figura 4 – Aspecto típico da distribuição da penetração longitudinal conceituada como **I** (ensaio 88-11)

Figura 5 – Aspecto típico da distribuição da penetração longitudinal conceituada como **B** (ensaio 66-6)

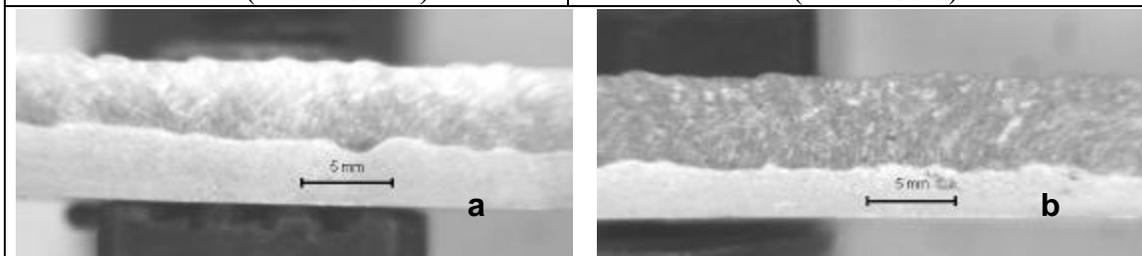


Figura 6 – Aspecto típico do aumento da distribuição da penetração longitudinal (ensaio 44-1), a) representa o segundo segmento e b) representa o terceiro segmento

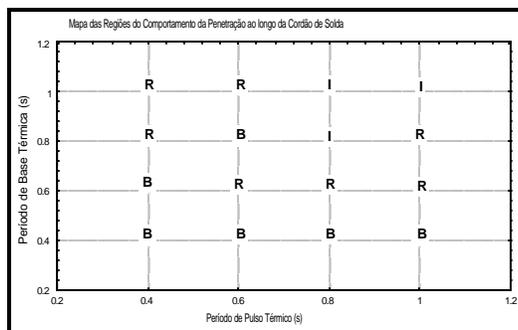


Figura 6. - Mapa de graus de qualidade referente à regularidade de penetração ao longo do cordão de solda em função de τ_b e τ_p (B = Bom, R = Regular e I = Insuficiente)

A importância do parâmetro essencial convexidade (r/L) se deve às propriedades mecânicas de uma junta, principalmente quando o componente soldado trabalha sob esforços de fadiga. Como manteve-se constante o volume de material depositado por unidade de comprimento da solda, pressupõe-se cordões de solda de geometria semelhante. Este fato pode ser o responsável pela obtenção da diferença estatisticamente irrelevante dos valores da relação r/L na Tabela 4. A Figura 9 ilustra que, de uma forma geral, a convexidade foi boa para a maioria dos casos.

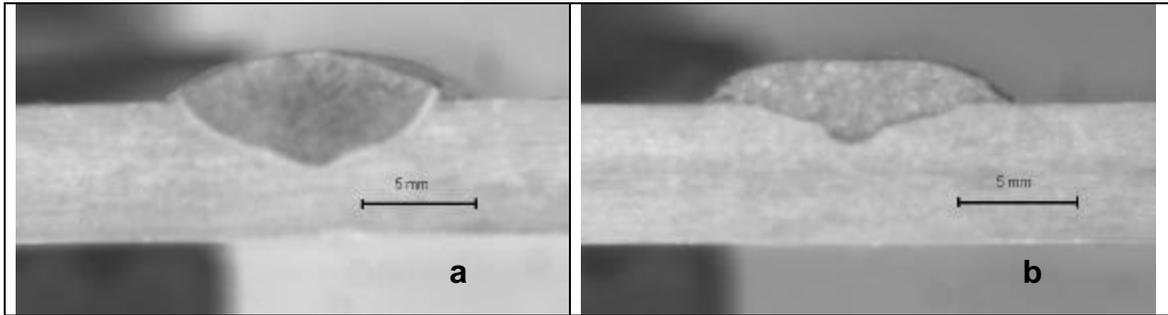


Figura 8 – Aspecto da penetração. (a) uma maior P_v - ensaio 61-8. (b) uma menor (insuficiente) P_v – ensaio 14-13

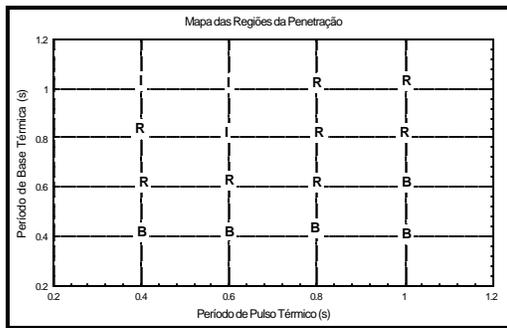


Figura 8 - Mapa de graus de qualidade referente à penetração média do cordão de solda (P_v) em função de τ_b e τ_p (B=Bom, R=Regular e I=Insuficiente)

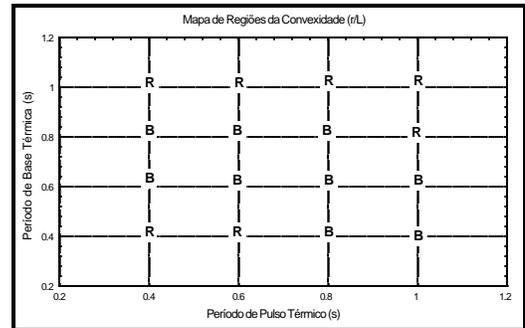


Figura 9 - Mapa de graus de qualidade referente ao índice de convexidade (R/L) em função de τ_b e τ_p (B=Bom, R=Regular e I=Insuficiente)

Finalmente, a análise do parâmetro não essencial Esc/mm , que correlaciona-se apenas com a aparência da solda, leva à conclusão (Tabela 4) de que o aumento de τ , seja de base ou pulso térmico, implica em uma redução no número de escamas/mm (piora o aspecto visual) verdadeiro. A Figura 10 ilustra este comportamento de uma forma mais genérica. Não foi verificada nenhuma progressão no números de escamas nos segmentos (1 a 3).

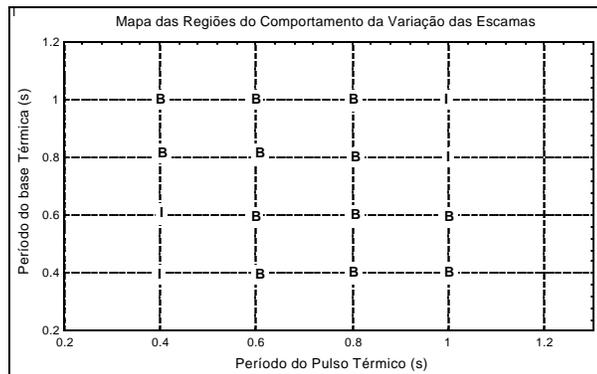


Figura 10 - Mapa de graus de qualidade referente ao número de escamas por unidade de comprimento da solda (D_{pPL}) em função de τ_b e τ_p (B=Bom e I=Insuficiente)

4. CONCLUSÃO

Nas condições estabelecidas neste trabalho, pode-se afirmar que:

- τ_p e τ_b têm efeito significativo sobre a profundidade e regularidade da penetração, sendo que os melhores resultados são alcançados para um τ_b de 0,4 s e qualquer valor de τ_p ;
- τ_p e τ_b têm também efeito significativo sobre o aspecto visual do cordão, avaliado pelo número de escamas por unidade de comprimento. Um melhor aspecto é alcançado para os menores valores dos parâmetros de pulsação;
- τ_p e τ_b não têm efeito significativo sobre a convexidade do cordão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU, pelas condições laboratoriais disponibilizadas. Também são gratos à ALCAN, pelo fornecimento de material de base, à White Martins, pelo fornecimento dos gases de proteção, e à IMC (fabricante do equipamento) pelas informações técnicas e adaptações no equipamento de soldagem.

REFERENCIAS

- DUTRA, J.C; OLLÉ, L.F.; JÚNIOR, R. G.: “O Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação térmica”. XXI ENTS, Caxias do Sul, 1995
- DUTRA, J.C.;TEICHMANN, E.W. “Assessoria Técnica na Recuperação por Soldagens das Partes Erodidas por Cavitação da Turbina N^o 2 da Salto Santiago”. Relatório, UFSC/ELETROSUL, 1997.
- BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S.. “Statistics for Experimenters”. John Wiley & Sons,1978.

ASSESSMENT OF THE THERMAL PULSATION PERIOD EFFECTS ON BEAD FORMATION IN ALUMINUM WELDING BY THE MIG-TP PROCESS

Abstract: *Thermal Pulsation MIG (MIG-TP) is a novel welding process consisting of an association of the advantages of two process, Pulsed MIG and Pulsed TIG. In this work, a study on the influence of the thermal pulsation periods (τ_b and τ_p) on bead geometry formation is presented. This study aims to assess the viability and advantages of this new process. A series of experiments was carried out with τ_b and τ_p combination at four levels, varying from 0.4 to 1.0 s. The results showed that the τ_p and τ_b combination significantly affects penetration depth and regularity, as well as bead visual aspect. There is no effect on bead convexity. Optimized combination regions can be determined.*

Keywords: *Welding, MIG, Aluminum, Thermal Pulsation, Bead geometry*