

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTO NA SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL AISI-304 COM ARAME TUBULAR.

A.O.Dias¹; E.M. Silva¹; S.C. Costa²; E.O. Côrrea²

^{1,2} Departamento de Engenharia Mecânica – UNIFEI –, Itajubá, MG

CEP: 36500-901

e-mail: m_eduardo_silva@yahoo.com.br

^{1,2} Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, Av.BPS, 1303, CEP37500-903, Itajubá, MG

e-mail: diaswelding@yahoo.com.br¹; sccosta@unifei.edu.br²; ecotoni@unifei.edu.br²

Resumo. Os aços inoxidáveis são materiais com utilização crescente nas indústrias em função de suas características específicas, principalmente aquelas relacionadas à resistência a corrosão. São materiais que exigem cuidados especiais na sua trabalhabilidade sob o risco de comprometimento de suas propriedades mecânicas. Dentre estes riscos, uma atenção especial deve ser dada à soldagem, pois é um dos processos de fabricação mais importantes, já que procedimentos inadequados podem afetar de forma definitiva alterações significativas na região soldada, principalmente no que concerne a resistência a corrosão. Neste contexto a indústria relacionada à soldagem vem adquirindo uma importância fundamental, principalmente quando se procura atender os requisitos de produtividade, aliando qualidade com menores custos de produção. Neste sentido a otimização de procedimentos vem se tornando prática obrigatória nas instalações fabris em épocas de acirrada competição. Desta forma este trabalho tem como finalidade estudar a soldabilidade do aço inoxidável austenítico AISI-304, soldado com o eletrodo tubular austenítico AWS-E316LT1-4 no modo de transferência pulsado. Sendo as variáveis analisadas: corrente de pico (I_p), o tempo de pico (t_p), a corrente de base (I_b) e a frequência (f). Deste modo, utilizou-se na análise dos dados de entrada e das respostas a técnica estatística de projetos e análise de experimentos (DOE); empregando numa primeira fase o planejamento fatorial fracionário e numa segunda fase fez-se a otimização desses parâmetros e suas influências no índice de convexidade, penetração, rendimento e deformação. Verificou-se que os parâmetros de pulso não influenciaram significativamente na deformação da chapa após a soldagem, porém influenciaram no rendimento de deposição. A corrente de pico foi o parâmetro mais influente na penetração e sua interação com a corrente de base e o tempo de pico foi influente no índice de convexidade.

Palavras chaves: Soldagem, Aços Inoxidáveis, DOE, FCAW.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são materiais com utilização crescente nas indústrias em função de suas características específicas, principalmente aquelas relacionadas à resistência a corrosão. Além de versátil, resistente, anticorrosivo, portanto dono de uma vida útil prolongada, o aço inoxidável traz valor agregado em tempo de responsabilidades sociais corporativas. Seu alto índice de aproveitamento para reciclagem além de ecologicamente correto combina muito bem com redução de custos principalmente em tempos de crise. Porém, são materiais que exigem cuidados especiais na sua trabalhabilidade, sob o risco de comprometimento de suas propriedades físicas e mecânicas. Dentre estes riscos, uma atenção especial deve ser dada à soldagem dos aços inoxidáveis, pois é um das operações mais importantes já que procedimentos inadequados podem afetar de forma definitiva alterações significativas no metal de base, principalmente no que concerne a sua resistência a corrosão (Barbosa, 1995).

Assim num processo de soldagem é desejável que se determinem parâmetros adequados para sua realização, com a máxima acurácia possível. A busca por esses parâmetros, entretanto, passa por um processo de otimização de múltiplas variáveis, representando múltiplas características de qualidade, exigíveis ou necessárias, para um determinado processo ou produto, constituindo-se em uma tarefa de difícil execução e de eficácia improvável (Paiva et al., 2009).

Atualmente, algumas técnicas estão sendo adotadas para proporcionar alta taxa de deposição com menor distorção e penetração, dentre as quais se podem destacar os processos de soldagem arame tubular e MIG/MAG com duplo arame e a utilização de corrente pulsada e alternada no MIG/MAG. A utilização da corrente pulsada e alternada no processo MIG/MAG agrega as características de menor distorção, menor penetração e uma maior taxa de fusão (Pessoa et al., 2007).

Os processos usuais, mais utilizados na soldagem dos aços inoxidáveis são: eletrodos revestidos, TIG, plasma, MIG e resistência elétrica. O processo de soldagem com arame tubular assemelha-se muito ao processo MIG, porém existem poucos trabalhos a respeito da soldagem de aços inoxidáveis utilizando-se este consumível o qual fornece vantagens significativas, tanto na qualidade do cordão de solda, como na diminuição dos custos soldagem. Neste trabalho utiliza como metal de base o aço AISI-304 e como metal de deposição o consumível (AWS E316LT1-4), pela extensa aplicação do mesmo como a soldagem em todas as posições e a alta resistência mecânica do cordão de solda (Dias, 2009).

Paiva (2008), afirma que várias metodologias estatísticas têm sido utilizadas frequentemente, tais como projeto e análise de experimentos (DOE), Metodologia de superfície de respostas (MRS) e Taguchi. Porém dentre estas ferramentas o Projeto e análise de experimentos tem se destacado por criar os modelos do processo e por permitir uma redução no tempo e gastos desnecessários nas tomadas de decisões.

A técnica de Projeto e Análise de Experimentos foi desenvolvida entre 1920 e 1930 por Sir Ronald A. Fisher e, posteriormente aperfeiçoada por outros importantes pesquisadores como Box, Hunter e Taguchi, dentre outros. Assim o Projeto e Análise de Experimentos é uma metodologia introduzida após a Segunda Guerra Mundial, nos processos industriais de empresas nos Estados Unidos e Europa, cuja notória eficácia fez dela uma das principais ferramentas de melhoria de processos. A partir de uma análise sistematizada acerca de um problema, busca-se avaliar a magnitude de várias fontes de variação que influenciam um processo (Paiva et al., 2009).

Segundo Montgomery (2001), o processo deve se iniciar com a identificação e seleção dos fatores que possam contribuir para a variação, proceder-se, em seguida, à seleção de um modelo que inclua os fatores escolhidos, determinar seus níveis e planejar experimentos eficientes para estimar seus efeitos.

Assim a condução adequada dos experimentos, de acordo com o planejamento elaborado, garante o sucesso do problema em estudo. Durante a sua realização, deve-se estar atento para detectar as anormalidades ocorridas, além de documentá-las para posterior análise, quando, então, serão estimados os fatores incluídos no modelo utilizando métodos estatísticos adequados, culminando na inferência, interpretação, discussão dos resultados, além da recomendação de melhorias, quando necessário.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, gera-se uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais. O arranjo mais comum é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, elevado ao número de fatores. No caso típico de fatoriais em dois níveis, o número de experimentos é dado por $N=2^k$. Fatoriais completos cobrem todo o espaço experimental. Entretanto, devido ao seu crescimento exponencial, arranjos com grande número de fatores podem tornar um processo de experimentação inviável. Para esses casos, Montgomery & Runger (2003), afirmaram que, se houver pouco interesse nas interações, pode-se negligenciá-las, gerando-se frações do experimento completo sem comprometer, entretanto, a detecção da presença de fatores influentes.

Em função das limitações dos trabalhos anteriormente citados este artigo visa ampliar as possibilidades de utilização do mesmo na aplicabilidade da soldagem de chapas finas de aço inoxidável austenítico AISI-304 na posição plana, através da utilização do modo pulsado de soldagem. Além disso, analisar a influência dos parâmetros de pulsação do processo sobre aspectos relativos às características geométricas do cordão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes foram utilizados neste trabalho, corpos de prova de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304, cujas dimensões são 80x30x3,1 mm em soldagem com simples deposição. Como consumível de soldagem foi utilizado o arame tubular com proteção gasosa AWS E316T1-4 de 1,2mm de diâmetro. Usou-se uma distância bico de contato peça de 16 mm com recuo do bico de 5 mm. O gás utilizado foi uma mistura contendo 75% de argônio e 25% de dióxido de carbono (C25), com uma vazão de 14l/min. Permaneceram constantes a tensão em 25 V, a velocidade de soldagem em 30 cm/min, e a polaridade CC+. Utilizou-se uma fonte multiprocesso, Inversal 300 com comando digital (2), a qual permite ajustar os parâmetros de pulso com imposição de corrente. A figura 1 mostra os detalhes do banco experimental.

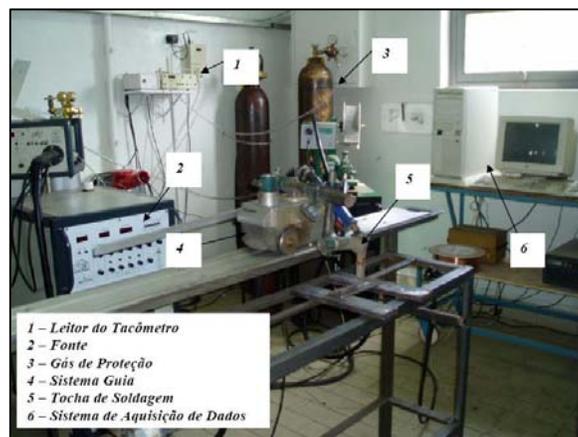


Figura 1 - Banco de Testes.

A tocha de soldagem (5), que guia o eletrodo consumível e conduz a corrente elétrica e o gás de proteção para a área de trabalho foi acoplado a um dispositivo de controle de velocidade de movimentação na posição plana (4), onde foi possível ajustar a velocidade de soldagem nos níveis desejados. O comprimento do arame consumido em cada teste, bem como o tempo de soldagem, foi avaliado com o auxílio de um tacômetro acoplado a um medidor de velocidade do arame – MVA-1 (1). A vazão do gás de proteção, mantida constante durante a realização da soldagem, foi registrada no medidor de vazão. Para todos os testes utilizou-se um sistema de aquisição de dados, denominado OSCILOS-4, para determinação das características dinâmicas de tensão, corrente e alimentação do arame com tempo de aquisição de 5 milissegundos. Pode-se com este procedimento verificar a compatibilidade dos parâmetros de controle com os ajustes pretendidos. O tempo total de soldagem foi medido com um cronômetro.

Em função do número de fatores a serem analisados (04) optou-se por utilizar o Delineamento dos Experimentos-fatorial fracionário (2^{n-1}), onde n é o número de parâmetros. Foram utilizados dois pontos centrais e uma replicagem, perfazendo um total de 18 experimentos. A partir do software comercial Minitab versão 14, foram processadas todas as análises estatísticas dos ensaios, sendo os parâmetros mantidos em dois níveis, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Fatores e seus respectivos níveis.

Fatores	Unidades	Níveis	
		Mínimo	Máximo
<i>Corrente de pico (Ip)</i>	A	250	350
<i>Tempo de pico (tp)</i>	ms	2	3
<i>Corrente de base (Ib)</i>	A	60	80
Frequência (f)	Hz	50	100

Vale ressaltar que a fixação destes níveis somente foi possível após a realização de uma série de testes preliminares que permitiam obter, nas condições extremas de soldagem. Para determinar as características geométricas dos ensaios, inicialmente todos os corpos de prova foram pesados antes da soldagem, seccionados em duas partes, polidos e atacados quimicamente. O reagente utilizado na análise de perfil foi o Vilela (45 ml de Glicerol/Glicerina + 15 ml de HNO₃ (1.40) + 30 ml de HCl), com tempo de ataque de segundos a minutos [11]. A aplicação deste reagente é para os aços inoxidáveis com alto teor de Cr e aços Cr-Ni. Preparadas as amostras e com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registraram-se as áreas de penetração (Sp) e de reforço (Sr), e a correspondente diluição, bem como a penetração do cordão (p), sua largura (b) e reforço (r), conforme esquema mostrado na figura 2. Esses valores encontram-se na tabela 2.

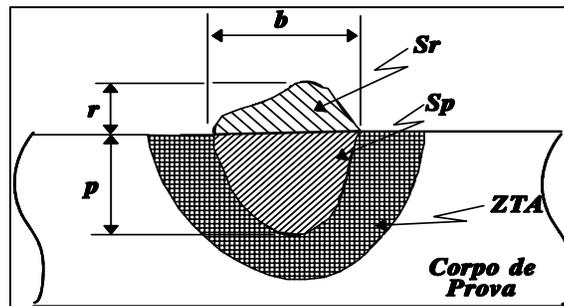


Figura 2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

Tabela 2. Matriz de experimentação e resultados obtidos.

Testes	Fatores				Respostas			
	Ip	lb	tp	f	IC	P	R	D
-	A	A	ms	Hz	%	mm	%	%
1	250	60	2,0	50	27,69	0,23	89,06	8,06
2	350	60	2,0	100	23,04	1,70	90,23	9,40
3	250	80	2,0	100	23,46	1,33	91,91	10,20
4	350	80	2,0	50	23,53	1,92	91,62	8,70
5	250	60	3,0	100	23,16	1,78	91,01	8,30
6	350	60	3,0	50	24,69	1,56	87,84	9,10
7	250	80	3,0	50	23,03	1,32	91,71	7,40
8	350	80	3,0	100	23,02	1,48	91,00	6,70
9	250	60	2,0	50	30,65	0,40	89,85	7,97
10	350	60	2,0	100	23,16	1,48	90,54	8,80
11	250	80	2,0	100	22,99	1,35	92,47	7,95
12	350	80	2,0	50	22,89	1,58	91,79	6,80
13	250	60	3,0	100	23,40	1,45	89,74	7,92
14	350	60	3,0	50	22,89	1,60	72,98	8,11
15	250	80	3,0	50	23,67	0,85	91,86	9,65
16	350	80	3,0	100	24,80	3,60	77,37	10,46
17	300	70	2,5	75	21,86	1,98	89,63	8,58
18	300	70	2,5	75	23,91	1,85	89,75	8,75

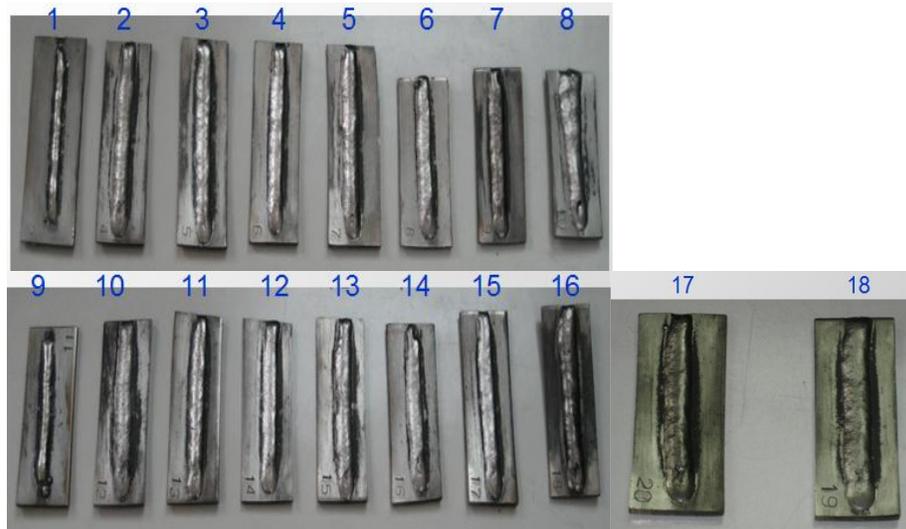


Figura 3 - Perfis das soldas obtidas.

3 RESULTADOS

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores empregados sobre as respostas observadas, estas foram submetidas à análise de variância - ANOVA. Neste trabalho, considerou como critério de análise que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma resposta, quando o nível de significância (α) obtido for inferior a 5%, ou seja, uma confiabilidade estatística de 95%. Entretanto como muitos resultados se situaram em um nível de significância um pouco maior, para efeitos de análises ampliou-se o nível α para 6%. Esta metodologia foi usada para garantir a confiabilidade dos efeitos das variáveis de influência nos resultados [12].

Tabela 3 - Resultado da análise de variância – (ANOVA)

	IC	P	R	D
Ip	0.334	0.038	0.006	0,116
Ib	0.302	0.072	0.011	0,083
tp	0.373	0.064	0.006	0,100
f	0.711	0.226	0.008	0,196
IpxIb	0.182	0.182	0.163	0,061
Ipxtp	0.386	0.386	0.006	0,066
Ipxf	0.105	0.105	0.008	0,322
IpxIbtp	0.050	0.050	0.026	0,102
IpxIbxf	0.103	0.103	0.287	0,784
Ipxtpxf	0.393	0.063	0.008	0,066
Ibtpxf	0.063	0.105	0.089	0,057
IpxIbtpxf	0.944	0.106	0.519	0,340
R ² ajust.	50.55	98.29	99.97	97.52

A tabela 3 mostra os valores do nível α para as respostas referentes aos parâmetros estudados e interações entre parâmetros para o modo de transferência pulsado. Os números em negrito da tabela acima indicam que os valores médios das respostas analisadas foram estatisticamente afetados pelos fatores de controle com 94% de confiabilidade, ou seja, valores menores que o nível de significância $\alpha = 0,06$ é estatisticamente influente para cada resposta analisada.

Analisando a tabela 3, verifica-se que o índice de convexidade foi influenciado pela interação entre a corrente de pico a corrente de base e a frequência (IpxIbxf). Ao passo que a penetração (P), foi influenciada em ordem de significância pela corrente de pico (Ip) seguida pela interação da corrente de pico a corrente de base e a frequência (IpxIbxf). Porém, o rendimento da solda (R), foi influenciado pela corrente de pico (Ip), o tempo de pico (tp), e pela interação entre a corrente de pico e o tempo de pico (Ip*tp) seguida pela interação da corrente de pico pela frequência (Ip*f) seguida pela interação da corrente de pico, corrente de base e o tempo de pico (Ip*Ib*tp).

A deformação (D) foi influenciada pela interação da corrente de base, tempo de pico e a frequência (Ib*tp*f) seguida da interação da corrente de pico com a corrente de base (Ip*Ib).

3.1 Análise da Convexidade do cordão.

O índice de convexidade do cordão está relacionado com a velocidade de alimentação do arame e o comprimento do arco, assim esta resposta tem uma influência nas

propriedades mecânicas e possíveis falhas no aspecto visual do cordão. Assim segundo Silva et al (2000), para critério de aceitação este índice deve se situar entre 20 e 30%.

A figura 4 (a) e (b) apresentam o gráfico da interação entre a corrente de pico a corrente de base e o tempo de pico, observa-se que todas as condições de soldagem implicam em um índice de convexidade dentro da faixa aceitável, isto representa uma boa condição de soldagem. Observa-se que, quanto maior a corrente de pico maior será molhabilidade do cordão, isto devido à maior energia de soldagem imposta à peça. Assim a condição que conduz a menor variação no índice de convexidade é conseguida através do ajuste $I_p=350$ A, $I_b=80$ A, $t_p=3$ ms, $f=50$ Hz.

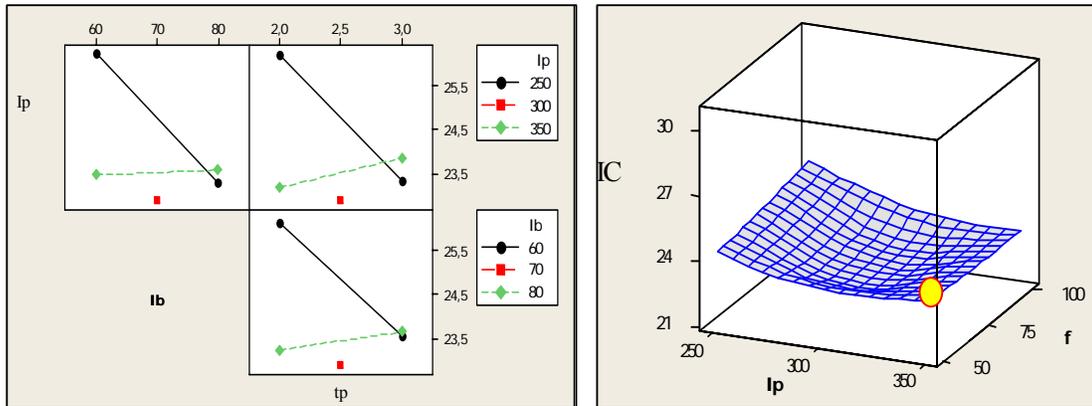


Figura 4 - Índice de Convexidade (a) Interação $I_p \cdot I_b \cdot t_p$ (b) Superfície de contorno da interação $I_p \cdot f$.

3.2 Análise da Penetração

A penetração está relacionada com a imposição de calor na peça, porém na soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos esta variável é bastante crítica, pois geralmente a máxima penetração está ligada a máxima deformação devido o fato que os aços inoxidáveis apresentam baixa condutibilidade térmica faz com que a dissipação de calor seja pequena, gerando bastante deformação.

A figura 5 mostra o gráfico da interação entre a corrente de pico, a corrente de base e o tempo de pico, observa-se que para maximizar a penetração e necessário a seguinte condição $I_p=350$ A, $t_p=3$ ms e $I_b=80$ A.

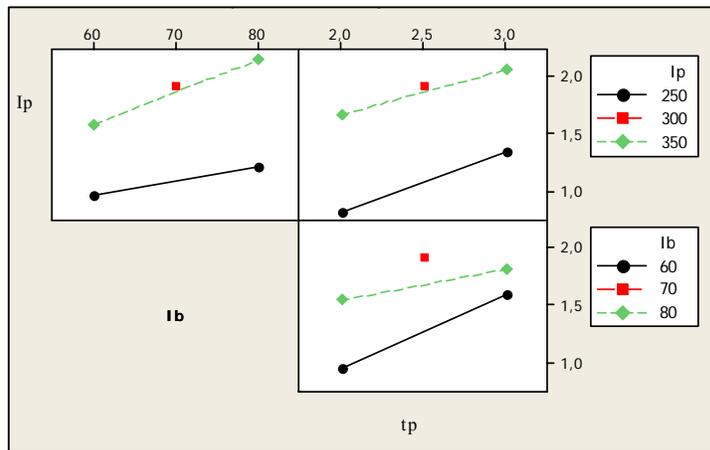


Figura 5 - Influência da Interação $I_p \cdot I_b \cdot t_p$ na penetração.

3.3 Análise do Rendimento

O rendimento é uma característica importante na análise de um processo de soldagem, pois influencia diretamente no aporte de calor e nos custos de soldagem. Os fatores que levam ao decréscimo no rendimento são normalmente as perdas por formação de respingos (Saito, 2001). Para uma utilização econômica mais efetiva do processo FCAW, normalmente se torna imperativo o estabelecimento de condições de soldagem que garantam taxas de deposição superiores às obtidas pelo processo com arame sólido, visto que o custo do arame tubular normalmente é superior ao arame sólido. A figura 6 apresenta o gráfico dos efeitos principais dos fatores sobre o rendimento, observa-se, que para maximizar o rendimento é necessário que esses fatores estejam ajustados $I_p=250$ A, $t_p=2ms$, $I_b=80$ A, $f=50$ Hz.

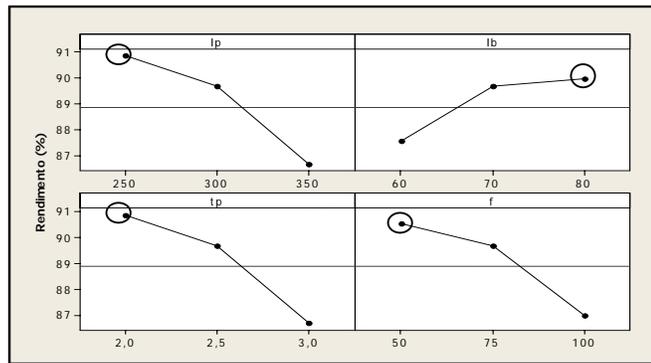


Figura 6 - Influência dos fatores principais no rendimento.

3.4 Análise da Deformação

A deformação num processo de soldagem está relacionada com a quantidade de energia imposta à peça, ou seja, quanto maior o aporte térmico maior será deformação. Entretanto de modo geral o estado final de tensões e deformações numa solda real é bastante complexo e depende de diversos fatores, tais como: material, propriedades mecânicas e espessura das peças, grau de rigidez da estrutura, dimensões, posição, geometria e quantidade das soldas (Marques et al.2009).Assim como se pretende minimizar a deformação ocorrida pelo aporte térmico é necessário o seguinte ajuste dos fatores $I_p=250$ A, $I_b=60$ A, $t_p=2ms$, $f=100Hz$, conforme a figura 7 (a) e (b).

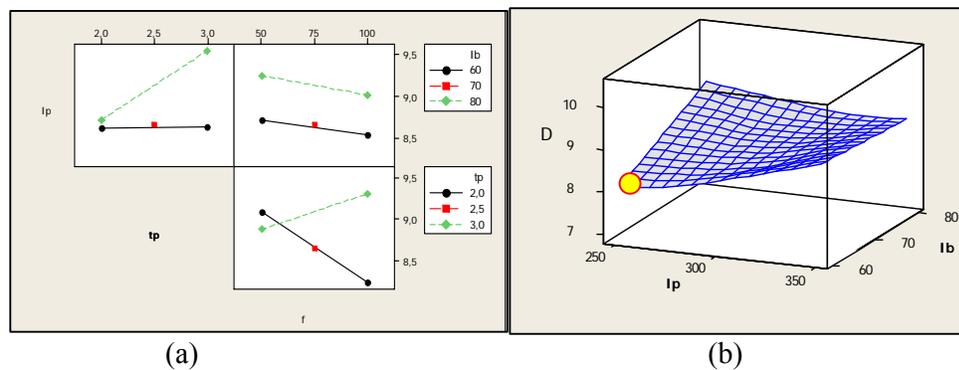


Figura 7 - Deformação (a) Interação I_p*t_p*f (b) Superfície de contorno da interação I_p*I_b .

Nas análises anteriores procurou-se encontrar uma condição adequada para cada resposta separadamente, entretanto num processo de soldagem é desejável que se determine parâmetros adequados para a sua realização com a máxima eficiência. Assim a

busca por esses parâmetros passa por um processo de otimização de múltiplas variáveis representando múltiplas características de qualidade exigíveis ou necessárias para um determinado processo ou produto constituindo uma tarefa de difícil execução e de pouca eficácia (Paiva et al .2009).Assim para tentar encontrar uma condição otimizada para os parâmetros de pulsação utilizou-se a ferramenta “Response Optimizer” do software comercial MINITAB-14, conforme a tabela 4 abaixo.Nesta tabela observa-se os níveis de ajustes pretendidos para cada respostas.

Tabela 4 - Níveis de ajustes pretendidos a partir do MINITAB-14.

Respostas	Condição	Mínimo	Centro	Máximo
P	Maximizar	0,50	1,60	-
R	Maximizar	87,84	91,86	-
D	Minimizar	-	8,30	9,70
Ic	Minimizar	-	25	30

A figura 8 mostra as condições previstas pelo software, bem como a desejabilidade para cada resposta analisada. Assim chegou a uma combinação que satisfaz todas as combinações de otimização desejada, ou seja, uma solução global onde $I_p=350$ A, $I_b=80$ A, $t_p=2$ ms, $f=100$ Hz.

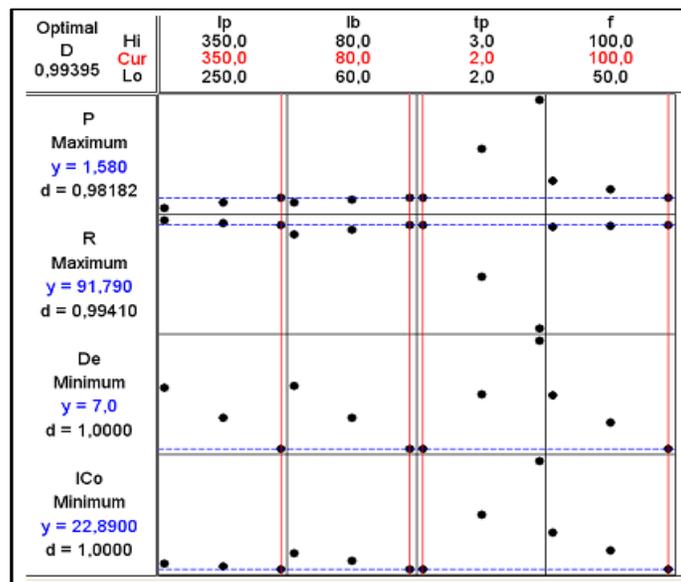


Figura 8 - Níveis de ajustes pretendidos utilizando a ferramenta “Response Optimizar”.

4 CONCLUSÕES

Em função dos resultados e das análises realizadas no estudo da influência dos parâmetros de pulso na soldagem do aço inoxidável austeníticos AISI-304 com arame tubular AWS E316LT1-4, este trabalho permitiu concluir que: A utilização da Metodologia de Projeto e Análise de Experimentos-DOE é muito útil na modelagem de processos de soldagem, com uma pequena quantidade de experimentos. De acordo com os resultados do método de otimização este sugere que as melhores condições de soldagem são a corrente de pico de 350 A, tempo de pico de 2 ms, corrente de base de 80 A, e a frequência de 100 Hz. Assim uma maior aplicabilidade poderá se conseguida utilizando métodos de

otimização multivariada como Análise dos Componentes Principais (ACP) e o erro quadrático multivariado (EQMM).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNIFEI, ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio dado a realização do trabalho.

5 BIBLIOGRAFIA

- Barbosa, R.P.,1995. “Efeito do tipo de Metal de Adição e do Aporte Térmico na Corrosão sob Tensão de Juntas Soldadas de Aço Inoxidável Austenítico AISI-304”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 104p.
- Dias, A.O.,2009. “Análise da Influência dos Parâmetros de Pulsação na Soldagem do Aço Inoxidável AISI-304 Através do Arame Tubular AWS E316LT1-4”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 138p.
- Marques, P.V. Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q.,2009. “Soldagem Fundamentos e Tecnologia”, 3ª Ed. UFMG, p.362.
- Montgomery, D.C., 2001. “Design and Analysis of Experiments”, Fourth Ed.,Wiley,New York.759p.
- Montgomery, D.C. Runger,G.C., 2003.“Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”,LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,2ª Ed.,p.570.
- Paiva, E.J., 2008. “Otimização de Processo de Manufatura de Múltiplas Respostas Baseada em Índices de Capacidade”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, 118p.
- Paiva, E.,J et al.,2009. “Otimização do Processo de Soldagem FCAW usando o Erro Quadrático Médio Multivariado”, Soldagem & Inspeção, pp.1-8.
- Pessoa, A RP, Pessoa, EF, Filho, FA, Motta, MF, Miranda, HC.,2007, “Avaliação do Aspecto Superficial e da Geometria de Cordões de Solda Realizados com o processo MIG/MAG Duplo Arame nos modos Corrente Alternada, Contínua e Pulsada”, Anais do XXXIII-CONSOLDA, Congresso Nacional de Soldagem, Caxias do Sul.
- Saito, S.M.,2001. “Análise da Influência dos Parâmetros de Pulso sobre a Geometria do Cordão de Solda e Rendimento de Deposição Obtidos pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular Utilizando Arco Pulsado”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da UNESP-Bauru, Março, p. 146.
- Silva, C., Ferraresi, V. A., Scotti, A.,2000. “A Quality and Cost Approach for Welding Process Selection”, Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences, vol. XXIII, nº 3, pp. 389-398.

6 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.